

Diplomarbeit

UNTERSUCHUNG DER EINSATZMÖGLICHKEITEN VON HOCHLEISTUNGSELEKTROLYSEUREN FÜR NETZDIENSTLEISTUNGEN

Ausgeführt am
Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe, Technische Universität Wien
zur
Erlangung des akademischen Grades Dipl.-Ing.

unter Betreuung von

Univ.-Prof.Dr.-Ing. Wolfgang GAWLIK
Dipl.-Ing. BSc Christoph MAIER

durch

Christoph EDLER
Matr.Nr.: 00026607
2441 Mitterndorf an der Fischa

1. August 2018

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von Wasserstoff-Elektrolyseuren zur Erbringung von Netzdienstleistungen in elektrischen Energienetzen. Im Fokus steht dabei die Erbringung von Regelleistung. Die Option, dabei auch Blindleistung zu erbringen, wird allerdings berücksichtigt. Konkret wird ein Computersimulationsmodell eines PEM-Elektrolyseursystems in der Softwareumgebung MATLAB/Simulink© aus Literaturdaten erstellt. Das Modell wird in verschiedenen Varianten als Regelleistungserbringer nach Daten für die Regelzone Österreichs im Jahr 2017 eingesetzt. Im Rahmen der Primärregelung nach den Regeln für speicherbegrenzte Systeme kann dabei ein vorteilhafter Einsatz der Überlastfähigkeit von PEM-Elektrolyseuren gezeigt werden. Ein Überlastbetrieb lässt je nach in Zukunft gültiger gesetzlicher Regelung eine Verringerung der notwendigen Geräteleistung von 11,36% bis 20,43% zu, ohne die angebotene Primärregelleistung zu beeinflussen. Alternativ kann die Jahresproduktion an Wasserstoff um 41,19% bis 28,90% gesteigert werden. Im Fall der positiven Sekundär- und Tertiärregelung wird aus den veröffentlichten Kosten ein Preissystem für nicht-produzierten Wasserstoff ermittelt und mit dem Preis von Wasserstoff aus der Dampfreformation verglichen. Der Preis fällt im Fall der Sekundärregelung mit 0,146 €/kWh und im Fall der Tertiärregelung mit 0,337 €/kWh im Mittel deutlich höher aus als das mögliche Ersatzangebot aus fossilen Quellen mit 0,05 €/kWh. Im Fall der negativen Sekundärregelung wird ein sich schnell erschöpfendes Potential der Betriebsauslastung erkennbar, das im Fall der Tertiärregelung noch geringer ausfällt. Ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz der Elektrolyse zu Regelleistungszwecken ist schwierig zu realisieren, ohne dies innerhalb einer auf einen alternativen Produktionszweck ausgerichteten Wasserstoffproduktion zu tun. Abschließend wird ein Einsatz innerhalb eines lokalen Mittelspannungsnetzes simuliert, um die Auswirkung der Erbringung von bis zu 3,5 MVA an Kompensationsblindleistung auf die Wasserstoffproduktion eines 7,7 MW PEM-Elektrolyseurs zu ermitteln. Dabei gehen pro Monat 0,71% an Wasserstoffproduktion verloren.

Abstract

The scope of this paper is to scrutinize water-electrolysis in the domain of electric grid services. The focus is set on frequency control but the possibility of voltage-var control as an optional feature is considered as well. A computermodel of a PEM-electrolysis system within the MATLAB/Simulink© software environment is implemented based on data available in literature. The resulting model is utilized in various frequency control simulation settings based on 2017 data provided by the austrian transmission system operator. On the realm of frequency containment reserve (FCR), the overload capabilities of the PEM-electrolysis system provide beneficial operating modes if the rules for providers with limited energy reservoirs are applied. A reduction of the necessary rated power of the electrolysis system between 11,36% and 20,43% is viable without curtailing the FCR service. Another option is to increase the amount of produced hydrogen by 41,19% to 28,90%. Regarding automatic and manual frequency restauration reserve (FRR), (mFRR) the resulting pricing of unproduced hydrogen in case of FRR-activation is calculated. The numbers of 0,146 €/kWh for FRR services and 0,337 €/kWh for mFRR services show a clear premium in contrast to the price of hydrogen produced by steam methane reforming which is 0,05 €/kWh. Negative FRR shows fast depleting reservoirs of workload which are even more limited for mFRR operation. A sound economic utilization of water electrolysis for frequency control services is difficult to achieve without a hosting electrolysis infrastructure which follows an independent operation target. As concluding simulation scenario, a 7,7 MW PEM-electrolysis system is operated while providing reactive power to a rural grid. The loss in hydrogen production reached 0,71% in total for the month in observation.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Struktur der Arbeit	2
2. Netzdienstleistungen	4
2.1. Frequenzhaltung	5
2.2. Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung	7
2.3. Betriebsführung und Engpassmanagement	7
2.4. Weitere Systemdienstleistungen	8
3. Die Elektrolyse von Wasser	9
3.1. Elektrochemie	12
4. Elektrolyseurmodell	15
4.1. Das Elektrochemische Modell	16
4.1.1. Die Zellspannung	16
4.1.2. Stoffbilanz und Faraday-Wirkungsgrad	18
4.2. Das thermische Modell	20
4.3. Leistungselektronik	25
4.3.1. Funktionsweise der Leistungselektronik	26
4.3.2. Charakterisierung der Leistungselektronik	30
4.4. Systemwirkungsgrad	32
5. Regelleistung mit Elektrolyseuren	34
5.1. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur Primärregelleistung	35
5.1.1. Inbetriebnahme des Elektrolyseurs	35
5.1.2. Einsatz des Elektrolyseurs zur Primärregelleistung für Daten des Jahres 2017	39
5.2. Primärregelung mit PEM-Elektrolyseuren nach den Regeln für speicherbe- grenzte Systeme	41
5.3. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur positiven Sekundärregelung	57
5.4. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur negativen Sekundärregelung	65
5.4.1. Technische Umsetzung - Regelleistung durch Teilbandnutzung	67
5.4.2. Technische Umsetzung - Regelleistung durch Überlastbetrieb	70
5.5. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur positiven Tertiärregelung	72
5.6. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur negativen Tertiärregelung	77
6. Regelleistung und Blindleistungsbereitstellung in einem Mittelspannungsnetz	79
6.1. Netzbeschreibung	79
6.2. Ein Argument für Elektrolyseure auf der Verteilnetzebene	81
6.2.1. Ergebnisse des Betriebs im Beispielnetz	83
6.3. Blindleistungsbereitstellung im Verteilnetz	85
7. Zusammenfassung und Ausblick	89

Quellen	91
Abbildungsverzeichnis	95
Tabellenverzeichnis	98
Abkürzungen und Symbole	98
A. Simulink Implementierungen	105

1. Einleitung

1.1. Motivation

Das elektrische Energiesystem befindet sich im Wandel. Die Veränderungen zeichnen sich mancherorts auch offen ab, wenn sich die Photovoltaikanlagen auf den Gebäuden mehrern oder Windräder zum gewohnten Teil der Landschaft werden und im Gegenzug manchen Schornsteinen traditioneller Kraftwerke immer öfter die Rauchfahne fehlt. In Zahlen und Grafiken verdeutlicht sich diese Entwicklung z.B in Abbildung 1.

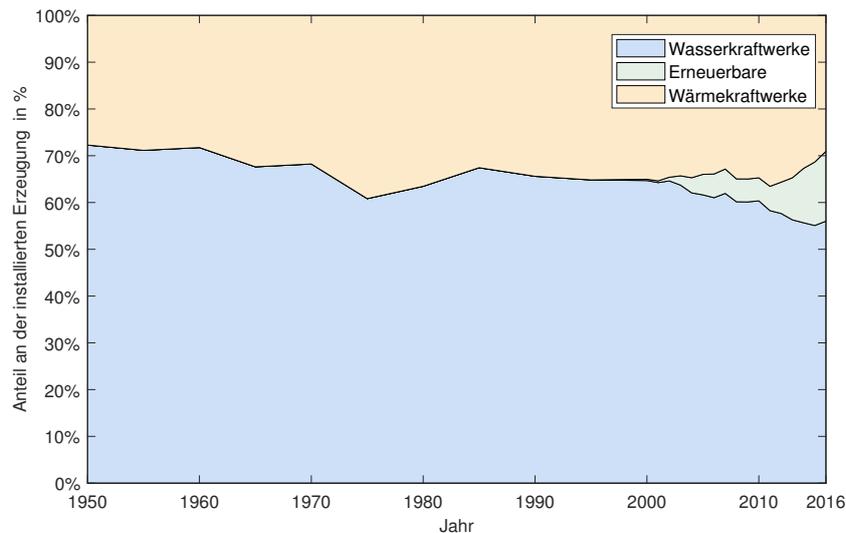


Abbildung 1: Anteil der Erzeugungstechnologien an der installierten Gesamtleistung in Österreich. Quelle: Eigene Darstellung nach Daten der e-contro)

Wenn sich traditionelle Erzeuger zukünftig am Markt nicht wirtschaftlich betreiben lassen und ihren Betrieb einstellen entstehen zunächst Erzeugungslücken für Phasen niedriger Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. Diese Erzeuger erbringen aber nicht nur elektrische Leistungen im eigentlichen Sinne, sondern auch Systemdienstleistungen die für den Betrieb elektrischer Energiesysteme unabdingbar sind. Die zentrale Kenngröße der Netzfrequenz der weiträumigen Stromnetze ist direkt mit den rotierenden Massen der Generatoren und Turbinen verbunden. Treten unerwartete Abweichungen des Gleichgewichts von Einspeisung und Entnahme im elektrischen Energienetz auf, steigt oder fällt die Frequenz. Die notwendige Balance wird durch den regelnden Eingriff einiger Kraftwerke wiederhergestellt. Diese erbringen dadurch die Systemdienstleistung Frequenzhaltung. Erneuerbare Systeme wie Photovoltaik und Windkraft sind nur in der Lage die Einspeisung zu drosseln, die verfügbare Energie geht dabei verloren. Eine Einspeisung über das natürliche Dargebot hinaus ist nicht möglich. Batteriespeichersysteme sind eine Möglichkeit die neuen erneuerbaren Energiesysteme zu ergänzen. Die Wasserstoff-Elektrolyse bzw. die Power to Gas Technologie ist eine alternative Variante, insbesondere, wenn diese als zukünftige saisonale Speichersysteme eingesetzt werden oder bislang energetisch isolierte Teile der Wirtschaft sektorkoppelnd verbinden.

die Ausarbeitung eines in der Softwareumgebung MATLAB/Simulink erstellten Modelles eines PEM-Elektrolyseursystems im Zentrum.

Der Zweck des Modellelektrolyseursystems liegt in der Simulation der Erbringung verschiedener Regelleistungsdienstleistungen und dabei, mögliche Grenzen des sinnvollen Einsatzes darzulegen. Im Fall der Primärregelung werden die sich aufgrund der jüngsten gesetzlichen Regelungen in der EU-Verordnung 2017/1485 ergebenden Möglichkeiten zur Nutzung des Überlastbetriebs von PEM-Elektrolyseuren ausgewertet. Darüber hinaus, wird ein möglicherweise notwendiger Gaspufferspeicher im Einklang der Regeln der EU Verordnung dimensioniert und das daraus folgende notwendige Einsatzverhalten bestimmt.

Im Fall der positiven Sekundär- und Tertiärregelung wird der Preis für die Nichterzeugung von Wasserstoff auf Grund der Vergütung im österreichischen Regelleistungsmarkt ermittelt und dem Preis für Wasserstoff aus fossiler Produktion gegenübergestellt.

Zur negativen Sekundär- und Tertiärregelung wird das damit jeweils mögliche Auslastungspotential der Elektrolysesysteme bestimmt.

Den Kern der Arbeit stellt die Untersuchung der Eignung der Elektrolyseure zur Erbringung von Regelleistung dar. Daneben erlaubt das erstellte Computermodell, die Auswirkung einer Blindleistungsbereitstellung auf den Regelleistungsbetrieb des Elektrolyseurs zu untersuchen.

Ergänzend wird im letzten Kapitel der lokale Einsatz eines PEM-Systems in einem Mittelspannungsverteilnetz simuliert und der Einfluss der Erbringung von negativer Sekundärregelung und Blindleistungskompensation auf die Wasserstoffproduktion und die Verwertung lokal produzierter Energie aus Photovoltaik und Windkraft ermittelt.

2. Netzdienstleistungen

Um den stabilen Betrieb eines elektrischen Verbundnetzes für alle Netzbenutzer zu schaffen und aufrechtzuerhalten, müssen charakteristische Betriebsparameter eingehalten werden. Die Aufgabe der Einhaltung dieser Parameter obliegt den einzelnen Netzbetreibern und kann unter dem Begriff der Netz- oder Systemdienstleistung zusammengefasst werden. Die Netzdienstleistungen werden als Systemdienste in den Technisch Organisatorischen Regeln - Teil B [13] definiert. Darunter fallen:

- Frequenzhaltung
- Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung
- Aufrechterhaltung der Spannungsqualität
- Versorgungswiederaufnahme
- Betriebsführung inklusive Engpassmanagement
- Erstellen der Austauschprogramme und Verbundabrechnung
- Koordination der Verbundabrechnung

Der Regelzonenführer und Übertragungsnetzbetreiber in Österreich, Austrian Power Grid (APG) muss in seiner speziellen Rolle alle genannten Tätigkeiten wahrnehmen. Alle anderen Netzbetreiber sind von den Aufgaben der Frequenzhaltung und vom Erstellen der Austauschprogramme entbunden, erfüllen aber alle anderen Dienste. Die deutsche Energie-Agentur sammelt in der Studie unter [12] die Punkte Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau und Betriebsführung unter dem Begriff Systemdienstleistung. Die tatsächliche Umsetzung der einzelnen Systemdienstleistungen unterscheidet sich jeweils. Für die Frequenzhaltung werden geeignete Netzteilnehmer, die sich für diese Dienstleistung beworben haben, beauftragt. Die Spannungshaushaltung erfolgt durch die Netzbetreiber, die einerseits auf die Einhaltung von vereinbarten Übergabegrenzwerten für Spannung und Blindleistung durch die Netzteilnehmer achten, aber andererseits mit Spannungsregelungselementen wie Längsregler die Spannung direkt beeinflussen. Zusätzlich wird an geeigneten Stellen Blindleistung in das Netz eingespeist oder entnommen, um einerseits den Bedarf an Blindleistung der aus den vorgelagerten Netzen bezogen wird, zu verringern oder um den Spannungshaushalt durch eine gezielte Veränderung der Blindleistungsflüsse zu verändern.

2.1. Frequenzhaltung

Grundsätzlich ist für den stationären Betrieb das Gleichgewicht zwischen in das Netz eingespeister und gleichzeitig entnommener elektrischer Leistung zwingend notwendig. Ein elektrisches Leistungsungleichgewicht wirkt sich auf die Drehzahl der rotierenden Massen wie Generatoren und Turbinen der Erzeugungseinheiten aus. Mit der Drehzahländerung geht eine Änderung der Netzfrequenz einher. Das angestrebte Gleichgewicht wird grundsätzlich durch auf den voraussichtlichen Verbrauch abgestimmte Erzeugungsfahrpläne erreicht. Sehr kurzfristige Änderungen, die durch den Ausfall großer Erzeuger oder Verbraucher sowie durch Prognosefehler erneuerbarer Energien ausgelöst werden, müssen durch einen Regelmechanismus ausgeglichen werden. Diese, im europäischen Verbundsystem implementierte Regelung, ist sowohl zeitlich als auch regional gestaffelt organisiert und besteht aus der Primär- (PRL), Sekundär- (SRL) und Tertiärregelung.[15] ¹

Die Regelleistungshierarchie baut auf einer Kopplung des elektrischen Netzes mit rotierenden trägen Massen auf. Diese träge Masse drückt sich in der Momentanreserve aus, die die implizite Basis der Frequenzregelung bildet. Im Netzgebiet der ENTSO-E ist diese vergleichsweise groß und muss nicht als zusätzliche Dienstleistung formuliert werden. Siehe dazu auch [2].

Primärregelung Die Primärregelung wird über das Gebiet der ENTSO-E gemeinschaftlich erbracht. Dazu wird ein angenommener Referenzfall erstellt, dem der plötzliche Ausfall von jeweils 3000 MW an Erzeugungs- oder Lastkapazität zu Grunde liegt. Jeder Regelzone wird ein zur jährlichen Erzeugung proportionaler Anteil zugeordnet. Für die Regelzone der APG in Österreich waren dies beispielsweise im Jahr 2017 ± 62 MW. Ein Regelleistungsabruf erfolgt automatisch durch eine Abweichung der Netzfrequenz vom Sollwert von 50 Hz. Die Änderung der Leistung ist der Änderung der Netzfrequenz proportional allerdings mit umgekehrten Vorzeichen.[43] Charakterisiert wird dieses Verhalten für jeweils ein Teilnetz i anhand der aggregierten Lastkennzahlen $K_{L,i}$ sowie den Maschinenkennzahlen $K_{M,i}$ bzw. als dessen Reziprokwert Generator-Statik oder Generator-droop.

$$K_{M,i} = \sum_j \Delta P_{Generator,j} / (f_{ist} - f_{soll}) \quad K_{L,i} = \sum_j \Delta P_{Last,j} / (f_{ist} - f_{soll}) \quad (1)$$

$$f_{ist} = f_{soll} - \frac{\Delta P_{Last,Gen}}{K_L - K_M} \quad (2)$$

Die Proportionalität wird allerdings durch einen Totbandbereich von ± 20 mHz um den Sollwert von 50,0 Hz und den Maximalwert der stationären Frequenzabweichung $\pm 0,2$ Hz begrenzt. Bei einer Frequenzabweichung $|\Delta f|$ von 0,2 Hz und mehr wird das Primärregelungsvolumen von ± 62 MW zur Gänze abgerufen. Die Hälfte der Primärregelung muss nach höchstens 15 Sekunden geliefert werden, die Zeit bis zur vollständigen

¹Alternativ auch Frequency Containment Reserve (FCR), Frequency Restoration Reserve (FRR) und manual Frequency Restoration Reserve (mFRR)

Erbringung der Primärregelleistung darf höchstens 30 Sekunden betragen. Stationär bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Last, Erzeugung und Primärregelleistung. Dabei verbleibt allerdings eine bleibende Regelabweichung von der Soll-Netzfrequenz, siehe Gleichung 2. Die Rückführung obliegt der Sekundärregelung. Die Primärregelung im Netzgebiet der APG wird mittlerweile in einem regelzonenübergreifenden, gemeinsamen Markt ausgeschrieben. Die physikalische Erbringung des Primärregelleistungsanteils der APG erfolgt deshalb nicht zwangsweise innerhalb des Netzgebietes der APG.

Sekundärregelung Im Verbundbetrieb mehrerer Netze stehen, im Fall einer Frequenzabweichung, regulären Leistungsaustauschflüssen über Kuppelleitungen Leistungsflüssen aus dem Primärregelverfahren gegenüber. Für die Sekundärregelung ist die Identifizierung der für die Frequenzabweichung verantwortliche Regelzone entscheidend. Dazu führt jeder Regelzonenführer das Frequenzkennlinienverfahren durch, um festzustellen, ob der ursächliche Leistungsfehlbetrag innerhalb seiner Regelzone auftritt. (Gleichung 3). Das betroffene Netz i erhält als Ergebnis für das Netzkennlinienverfahren $G_i \neq 0$.

$$G_i = \Delta P_i + K_{R,i} \cdot \Delta f = \sum (P_{Kuppel,ist} - P_{Kuppel,soll}) + K_{R,i} \cdot (f_{ist} - f_{soll}) \quad (3)$$

$$K_{R,i} = K_{M,i} + K_{L,i} \quad (4)$$

Um die Frequenz vollständig auf die Sollfrequenz von 50,0 Hz zurückzuführen, wird ein PI-Regler eingesetzt. Die jeweilige Stellgröße wird durch die an der Sekundärregelung beteiligten Erzeugungs- oder Verbrauchseinheiten realisiert. Die Teilnehmer am Sekundärregelmarkt beteiligen sich an Ausschreibungen, die nach positiver und negativer Regelleistung getrennt durchgeführt werden. In der Regelzone APG für Österreich waren 2017 jeweils 200 MW positiver und negativer Regelleistung ausgeschrieben. Der Regelzonenführer APG geht eine Kooperation mit anderen Regelzonen ein, um gegenläufige Regelleistungsabrufe zu verhindern. Durch dieses vorgeschaltete Imbalance Netting werden die Leistungsüberschüsse einer Regelzone zur Deckung des Leistungsdefizits einer anderen Regelzone verwendet und umgekehrt. Dadurch wird ein jeweils isoliertes Ausregeln der einzelnen Regelzonen verhindert, wenn es in Summe nicht notwendig ist.

Das Anforderungsprofil der Sekundärregelung sieht ein Erreichen des angebotenen maximalen Leistungswertes innerhalb von 5 Minuten vor. Die Rückführung auf den regulären Arbeitspunkt, der keine Regelleistung liefert, muss ebenfalls nach 5 Minuten abgeschlossen sein.

Tertiärregelung Um die Sekundärregelung von einer voraussichtlich länger andauernden Ungleichgewicht im Erzeugung und Lastfahrplan zu befreien, um für mögliche Folgeabrufe wieder zur Verfügung zu stehen, wird manuell die Tertiärregelung aktiviert. Das für 2017 ausgeschriebene Volumen betrug insgesamt 280 MW an positiver und 180 MW an negativer Regelleistung. Im Vergleich zur Sekundärregelung stellt die Tertiärregelung geringere

Anforderungen bezüglich der maximalen Zeitdauer vom Zeitpunkt der Anforderung bis zur vollständigen Erbringung, sie liegt bei 10 Minuten.

Der jeweilige Markt der verschiedenen Regelleistungsarten unterscheidet sich in den dazu definierten Produkten. Der Bereich der Tertiärregelleistung ist in kleineren Einheiten aufgelöst und erlaubt dadurch ein größeres Maß an Flexibilität. Diese Unterschiede werden in Kapitel 5 deutlich.

2.2. Spannungshaltung und Blindleistungsbereitstellung

Die Technisch Organisatorischen Regeln B [13] verpflichten die Netzbetreiber zur Spannungshaltung. Das bedeutet, dass die Netzbetreiber dafür verantwortlich sind, die Spannung für alle am Netzbetrieb Beteiligten in genormten oder vereinbarten Grenzen zu halten. Gleichzeitig ist der Netzbetreiber auch verpflichtet, den in seinem Netz durch Leitungen und Transformatoren entstehenden Blindleistungsbedarf zu decken. Dafür stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Erzeugungsanlagen, die auf Hoch- und Höchstspannungsniveau in Netze einspeisen werden, verpflichtet neben Wirk- auch Blindleistung geregelt einzuspeisen. Eine Variante davon sind rotierende Phasenschieber, also Generatoren, die auf eine Wirkleistungseinspeisung verzichten und nur Blindleistung liefern oder beziehen. Weiters treffen Netzbetreiber Vereinbarungen zur Lieferung von Blindleistung. Kompensationsanlagen wie schalt- oder regelbare Drosseln und Kondensatoren sowie Flexible AC Transmission Systeme (FACTS) ergänzen das zur Verfügung stehende Repertoire an Möglichkeiten.

Elemente zur direkten Spannungsregelung sind vorrangig unter Last schaltbare Transformatoren und Längsregler.[43]

Die Spannungshaltung lässt sich – wie schon die Frequenzhaltung – in eine Hierarchie von Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung einteilen.[43] Die Primärregelung agiert dabei dezentral und verändert dabei die Schaltstellungen der unter Last schaltbaren Transformatoren durch einen lokalen Spannungsregler. Der zentrale Sekundärregler gibt die Spannungs-Sollwerte für die Primärregler vor oder verändert die Blindleistungsflüsse durch den Einsatz der Kompensations oder FACTS-Elemente. Den Abschluss bildet eine Tertiärregelung, die anhand wirtschaftlicher Gesichtspunkte den Einsatz der Blindleistungsflüsse optimiert.

2.3. Betriebsführung und Engpassmanagement

Unter Engpassmanagement wird üblicherweise die Reduktion der Erzeugung an einem Punkt im Netzgebiet verstanden, um gleichzeitig die Erzeugung an einem anderen Ort in gleichem Ausmaß zu erhöhen, damit ein überlastetes Netzelement – wie z.B eine Leitung – in einen regulären Betriebszustand überführt wird. Eine Leistungsreduktion mittels Erhö-

hung des Verbrauchs durch Elektrolyseursysteme zu erreichen, ist grundsätzlich denkbar aber nicht Teil dieser Arbeit.

2.4. Weitere Systemdienstleistungen

Die Systemdienstleistung Versorgungswiederaufnahme würde einen unabhängigen Energiespeicher voraussetzen. Ein reines Elektrolyseursystem ist deshalb für diese Aufgabe ungeeignet. Diese und die weiteren nicht näher betrachteten Dienstleistungen sind nicht Teil dieser Arbeit.

3. Die Elektrolyse von Wasser



Die Gleichung 5 stellt die chemische Gesamtreaktion der Spaltung von Wasser in die chemischen Elemente Wasserstoff und Sauerstoff dar. Soll dabei auf direktem Weg elektrische Energie eingesetzt werden, kommen hierfür drei Verfahren in Frage.

- Alkalische Elektrolyse
- Polymer Elektrolyt Membran Elektrolyse
- Hochtemperatur Elektrolyse

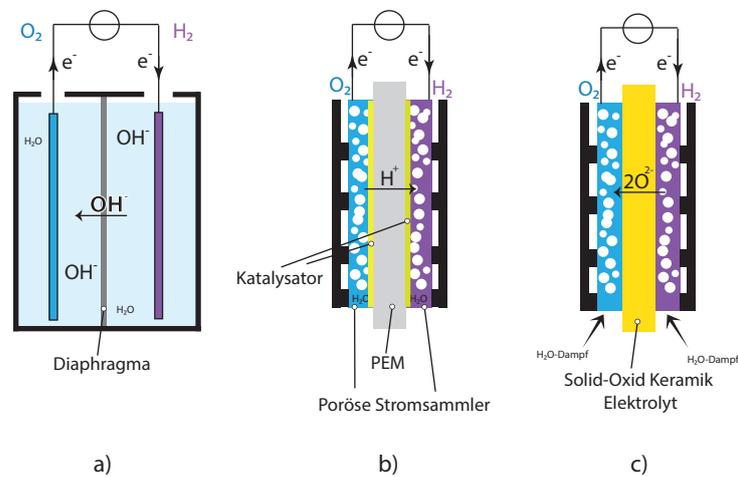
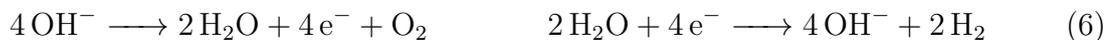


Abbildung 3: Grundprinzip Elektrolyseurzelltypen: a) Alkali b) PEM-EL c) Hochtemperatur. Quelle: Eigene Darstellung nach [19] und [11]

Alkalische Elektrolyse



Die alkalische Elektrolyse nach Gleichung 6 stellt die älteste Form der Herstellung von Wasserstoff mittels elektrischer Energie dar. Um das dafür notwendige alkalische Milieu als Elektrolyt zu schaffen, wird KOH oder NaOH in wässriger Lösung verwendet. Zur Trennung des entstehenden Wasserstoffes und Sauerstoffes wird im Bereich zwischen der Anode und der Kathode ein semipermeables Diaphragma platziert. Als Elektrodenmaterial werden Eisen, Nickel oder Nickel-Sulfat verwendet. Die Reinheit der Produktgase Wasserstoff und Sauerstoff erreicht dabei Größenordnungen von jeweils 99,8-99,9% sowie 99,3-99,8% bei Betrieb mit Nennleistung. Allerdings sind die verwendeten Diaphragmen für Wasserstoff und Sauerstoff nicht vollständig undurchlässig. Dadurch tritt eine Verunreinigung mit dem jeweils anderen Produktgas in beiden Zellenhälften auf. Die Permeabilitätsrate

ist dabei unabhängig von der Produktionsrate der Produktgase. Bei geringen Teillasten entstehen dadurch unzulässige Konzentrationen der jeweiligen Fremdgase. Die Explosionsgrenzen für Wasserstoff in Sauerstoff beträgt 3,9 mol% und 95,8 mol% für Sauerstoff in Wasserstoff.[19] Die übliche untere Betriebsschwelle der Alkali-Elektrolyseure beträgt 20% [32]. Die dadurch entstehenden Betriebseinschränkungen für den Einsatz in elektrischen Energiesystemen wurden in [17] ausführlich dargestellt. Beim Vergleich der technischen Daten der Elektrolyseursysteme in Tabelle 1 fällt die geringere Stromdichte auf. Um gleiche Nennleistungen zu erzielen, sind daher deutlich größere Alkali-Elektrolyseure nötig. Mit der größeren Gerätemasse geht ein deutlich trägeres thermisches Verhalten einher. Die notwendige Aufheizzeit schränkt den dynamischen Betrieb grundsätzlich ein. Sobald das Gerät allerdings eine Betriebstemperatur erreicht hat, sind dynamische Betriebsweisen möglich. Die dabei mögliche Flexibilität bei Nennleistung reicht, um fluktuierenden erneuerbaren Energien zu folgen [32] aber auch um Regelleistung zu erbringen wie z.B ein Projekt in Ontario, Canada zeigte [46] [23]

Polymer Elektrolyt Membran Elektrolyse (PEM-EL)



Gleichung 7 beschreibt den chemischen Ablauf bei der PEM-Elektrolyse. Als Elektrolyt fungiert dabei die namensgebende Polymer-Membran, die die Protonen der Wasserstoff-Kerne von der Anode zur Kathode leitet. Gleichzeitig stellt sie eine Barriere für den produzierten Wasserstoff und Sauerstoff dar. Siehe Abbildung 3. Auf der Kathodenseite findet sich direkt im Anschluss an die Polymer-Membran die dünne, poröse Platin-Katalysator Struktur. In diesem Bereich findet die Reduktion der H^+ Ladungen zu H_2 Elementen statt. Darauf folgt eine poröse, elektrisch leitfähige Stromsammlerstruktur, die den Strom zur Phasengrenze an der Katalysatorschicht leitet und gleichzeitig einen Wasser-Zufluss und Gasabtransport zulässt. Auf der Anodenseite wiederholt sich der Aufbau allerdings mit einem geeigneten Katalysator wie Iridium oder Ruthenium-Oxid. Ähnlich dem Diaphragma bei der Alkali-Elektrolyse ist auch die Polymermembran nicht völlig undurchlässig für Sauerstoff und Wasserstoff. Bei tiefen Teillastbereichen besteht wieder das Problem eines bis zur Explosionsgrenze anwachsenden Wasserstoff/Sauerstoffgemisches. Auf Kathodenseite sorgt der Platin-Katalysator für eine kontrollierte Reaktion des Sauerstoffes im Wasserstoff zu Wasser. Auf Anodenseite dagegen ist der Katalysator weniger effektiv, sodass eine höhere Restmenge an Wasserstoff verbleiben könnte.[32] Davon ist der Teillastbereich 0 bis zu 10% betroffen. Die Hersteller gehen dabei unterschiedlich mit diesem tiefen Teillastbereich um. ProtonOnSite lässt diesen Betriebsbereich nicht zu, wenn die Führungsgröße für den Betrieb die elektrische Leistung ist. Wird der Betrieb anhand des verbrauchten Gasstromes geregelt dagegen schon.² Eine andere Lösungsstrategie besteht in einer Beimengung von geringen Mengen Platin auf der Anodenseite der Elektrolysezelle. Jüngere Geräte senken die Toleranzgrenze auf 5%.[44] Ein Vorteil des PEM-Elektrolyseures ist der Betrieb mit hohen Gasdrücken. Der Energieaufwand zum Druckaufbau wird aus der Elektrolysereaktion gedeckt und stammt direkt aus der elektrischen Energieversorgung der Zelle. Sind die dabei erreichbaren Drücke für die Anwendung ausreichend, kann ein

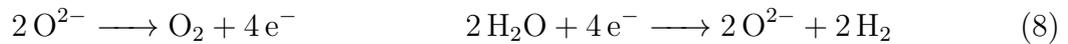
²Laut Auskunft eines Mitarbeiters von ProtonOnsite

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Elektrolyseursysteme nach [32]

Technologie	Ladungsträger	Elektrolyt	Druck in bar	Stromdichte in $\frac{mA}{cm^2}$	Temperatur in °C
Alkali	OH^-	KOH od. NaOH	1-4	200-450	50-80
PEM-EL	H^+	Polymer	1-40	100-3000	20-100
SO-EL	O^{2+}	Keramik	bis 5	bis 1400	700-1000

zusätzlicher, nachfolgender Verdichter entfallen oder die erste Verdichterstufe eingespart werden.

Hochtemperatur Elektrolyse oder auch Solid-Oxid Elektrolyse (SO-EL)



Ein keramischer Fest-Oxid wie Yttrium dotiertes Zirkonium Dioxid bildet den sauerstoffionenleitenden Elektrolyt der Hochtemperatur Elektrolysezelle. Das bei der Reaktion umgesetzte Wasser ist im Gegensatz zu den beiden anderen Elektrolyseformen dampfförmig. Ein Vorzug des Hochtemperatur-Elektrolyseur ist die Möglichkeit, dem Elektrolyseur externe Prozessabwärme zuführen zu können und dadurch den energetischen Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen. Diese Technologie stellt die jüngste Form der Elektrolyse dar und befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Eignung der Elektrolyseure für dynamische Betriebsweise Die SO-EL stellt die am wenigsten flexible Form der Elektrolyse dar. Die Alkali-Elektrolyse wurde historisch zur industriellen Erzeugung von Wasserstoff eingesetzt, wobei ein in der Regel konstanter Produktionsstrom eine konstante elektrische Leistungsaufnahme zur Folge hatte. Daraus lässt sich aber kein Mangel an möglicher Betriebsdynamik ableiten, sofern das Gerät möglichst homogen durchgewärmt auf Betriebstemperatur ist. Bezüglich des möglichen Dynamikbereiches findet sich in [45] ein Wert von 2 Sekunden für die dynamische Antwortzeit eines Alkali-Elektrolyseurs als Reaktion auf einen Sprung, allerdings ohne nähere Angaben über die Konfiguration des Sprunges. Für einen PEM-Elektrolyseur dagegen wird in [45] bzw. [30] ein Wert von 0,2 Sekunden bei einem Sprung von 10% der Stackspannung und damit über die nichtlineare Polarisationskurve einen Sprung von ungefähr 10% des Stackstromes angegeben. Die Hersteller Siemens und ProtonOnSite geben für ihre Geräte Silyzer 200 bzw 300 und M-Serie in der 1 MW Klasse eine Reaktionszeit von unter 10 Sekunden für die Variation der aufgenommenen elektrischen Leistung von 0-100% an. [37] [44] Durch paralleles Erweitern von Stacks und Leistungselektronik lässt sich die Nennleistung dieser Systeme beliebig skalieren, wobei die Steigung des erreichbaren Leistungsgradienten jeweils 10%/s nicht unterschreitet. Die Anfahrzeit aus dem ausgeschalteten Zustand wird mit unter fünf bzw. unter einer Minute angegeben. Offen bleibt zu diesem Zeitpunkt die Frage der Degeneration von Elektrolyseursystemen unter langfristigen dynamischen Betriebsbedingungen im produktiven Einsatz.

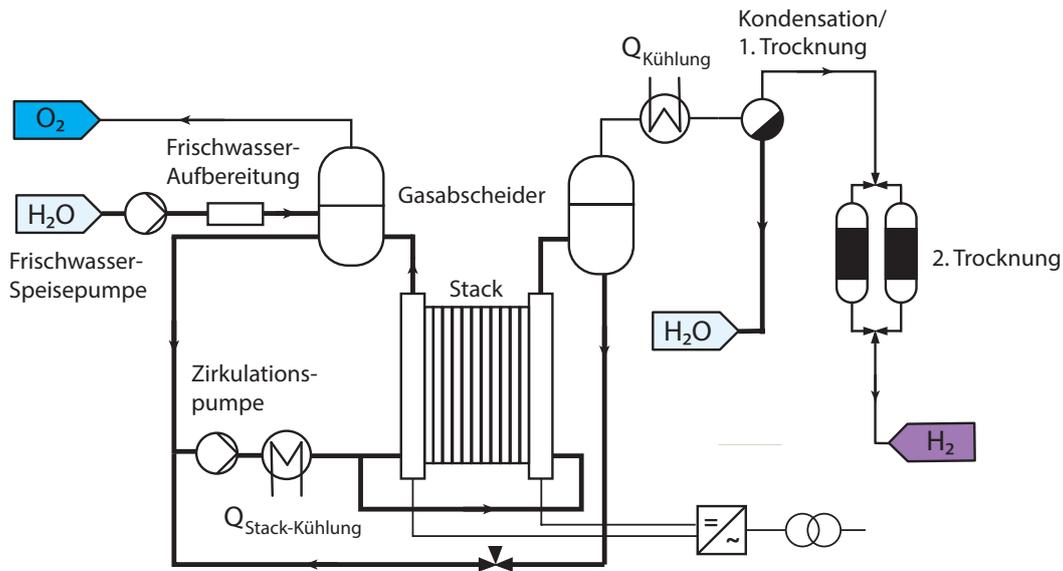


Abbildung 4: Vereinfachtes Schema eines PEM-Elektrolyseur Systems. Quelle: Eigene Darstellung nach [32] und [48]

Aufbau eines Elektrolyseursystems Abbildung 4 zeigt das Verfahrensschema eines im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten PEM-Elektrolysesystems. Darin ist ein Stack zu sehen, der mehrere PEM Elektrolysezellen in einer Serienschaltung verbindet. Die Anzahl der in Serie geschalteten Zellen und parallel geschalteten Stacks ermöglichen eine Skalierung der Leistung des Systems. Dabei lassen sich modular aufgebaute Systeme realisieren, die sich in diskreten Einheiten der Stackennennleistung unterscheiden. Die Stackennennleistung wird neben der Anzahl der in Serie geschalteten Zellen durch die Zellfläche festgelegt. Die dargestellte Trocknung besteht aus zwei Stufen. In der ersten Stufe wird der Gasstrom gekühlt und der dabei enthaltene Wasserdampfanteil kondensiert. Die zweite Stufe enthält eine zweifach ausgeführte Adsorptions-Trockenstrecke. Dabei ist jeweils nur eine aktiv, während das Adsorbtionsmaterial in der zweiten Trockenstrecke regeneriert wird. Siehe dazu [48] Eine vergleichbare Verfahrens-Struktur findet sich auch in einer Alkali-Elektrolyse-Anlage, allerdings müsste diese noch um eine Versorgungseinheit mit der notwendigen KOH-Lauge ergänzt werden.

3.1. Elektrochemische Grundlagen

Die Grundlage der Elektrolyse von Wasser bildet die chemische Reaktion nach Gleichung 5, die im Rahmen einer technischen Realisierung als elektrochemische Zellreaktion ausgeführt wird.

Den Anschlüssen einer solchen Zelle wird über die Änderung der molaren freie Enthalpie ΔG eine Klemmenspannung U_{kl} zugeordnet, die, über die Faraday-konstante F und der Anzahl bei der Reaktion ausgetauschten Ladungsträger $n_{\text{Ladungsträger}}$, den beim Ab-

lauf der Reaktion maximal umsetzbaren Wert an elektrischer Energie im stromlosen Fall ausdrückt. (Gleichung 9)

$$\Delta G + n_{\text{Ladungsträger}} F U_{kl} = 0 \quad (9)$$

Die Freie Enthalpie bzw. ihre Änderung steht im Rahmen der Thermodynamik mit den Größen Entropie S , Standard-Bildungsenthalpie H , Temperatur T über Gleichung 10 in Zusammenhang. Für konstante Drücke und Temperaturen wird die Beziehung als Gibbs-Helmholtz Gleichung 11 formuliert.[34]

$$G = H - TS \quad (10)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0 \quad (11)$$

Bei konstanten Normalbedingungen $p^0 = 1,01325 \text{ bar}$ $T^0 = 298,15 \text{ K}$ und mit Literaturangaben der thermodynamischen Werte für Wasser, Wasserstoff und Sauerstoff folgt mit den Gleichungen 9 und 11 die Standardzell- bzw. Zersetzungsspannung im stromlosen Zustand.

$$U_{kl}(\Delta H^0, \Delta S^0) = U_{0,rev} = 1,229 \text{ V} \quad (12)$$

Die in Gleichung 12 verwendete reversible Spannung bei Standardbedingungen $U_{0,rev}$ kann nach [29] temperaturabhängig formuliert werden.

$$U_{T,rev} = 1.5184 - 1.5421 \cdot 10^{-3} \cdot T + 9,523 \cdot 10^{-5} \cdot T \ln(T) + 9,84 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (13)$$

Die thermo-neutrale Spannung $U_{0,th}$ wird in Gleichung 14 definiert und gibt den Zellspannungswert an, bei dem kein zusätzlicher Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Betreibt man die Elektrolyse auf diesem Spannungsniveau, decken die Jouleverluste in der Zelle mit der zugeführten elektrischen Energie den Anteil des Energiebedarfs zur Zersetzung des Wassers, der sich in der Entropieänderung δS ausdrückt. Liegt die Spannung darunter, muss Wärme zugeführt werden. Liegt sie darüber, muss Wärme, die durch die Stromleitung durch die Zelle entsteht, abgeführt werden.

$$U_{0,th} = \frac{\Delta H^0}{2 F} = 1,478 \text{ V} \quad (14)$$

Die Einführung chemischer bzw. elektrochemischer Potentiale und die Aufspaltung der elektrochemischen Gesamtzelle in ein System von Elektroden und Elektrolyt führt auf die Nernst-Gleichung. (Gleichung 15 [20])

$$U_{nernst} = U_{T,rev} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{a_{\text{H}_2} \sqrt{a_{\text{O}_2}}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (15)$$

Die Nernst-Gleichung gibt die Zellenspannung U_{cell} für den Gleichgewichtszustand der elektrochemischen Potentiale im stromlosen Zustand an. Neben der Temperatur T beeinflussen die Aktivitäten a_{H_2} , a_{O_2} und damit im Speziellen die Stoffkonzentration bzw. die Partialdrücke der Stoffe die Nernstspannung.

Ein Fluss elektrischer Ladungsträger hat durch verschieden Ursachen eine Abweichung der Klemmenspannung der elektrischen Zelle von der Nernstspannung zur Folge. Diese Abweichungen finden, als vom Strom abhängige Überspannungen $\eta(i)$, je nach verursachenden Effekt Berücksichtigung.

$$U_{cell} = U_{Nernst} + \eta_{Ohm}(i) + \eta_{Aktivierung}(i) + \eta_{Konzentration}(i) \quad (16)$$

Während die ohmsche Überspannung den Energiebedarf elektrischer Leitung in der Zelle beschreibt, gibt die Aktivierungsüberspannung den Energiebedarf beim Übergang der Elektronen von den Elektroden in den Elektrolyt und auch umgekehrt an. Diese Übergänge finden fortwährend in beide Richtungen statt, wobei sich zu jedem Betriebspunkt ein dynamisches Gleichgewicht einstellt. Soll ein Netto-Stromfluss durch die Zelle stattfinden ($i \neq 0$), muss sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellen, bei dem eine der beiden Richtungen überwiegt. Dieser, vom Stromfluss abhängige dynamische Gleichgewichtszustand, wird in der Butler-Volmer Gleichung formuliert. (Gleichung 17, siehe [20]) Durch den Ladungstransferkoeffizient α wird eine Unsymmetrie im Zusammenhang zwischen $\eta_{Aktivierung}(i)$ und der Nettostromrichtung dargestellt.

$$i = i_D^+ + i_D^- = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha \cdot 2F}{RT} \eta_{Aktivierung}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha)2F}{RT} \eta_{Aktivierung}\right) \right] \quad (17)$$

Die Ursache für die Konzentrations- oder auch Diffusionsüberspannung findet sich in Transporthemmnissen der Produkte und Edukte zu und von den Elektroden.

4. Das Modell des Elektrolyseursystems

Das zur Untersuchung in der Softwareumgebung MATLAB/Simulink erstellte Modell eines Elektrolyseursystems verwendet im Kern ein einfaches Modell eines Proton Exchange Membrane Elektrolyseurs. Dabei kommt in weiten Teilen das erstellte Modell aus [48] zur Anwendung, da es das Betriebsverhalten von PEM-Elektrolyseuren mit für Power to Gas geeigneten Leistungsklassen vereinfacht beschreibt. Das Modell des Elektrolyseurs wird auf die aktive Zellfläche einer Elektrolysezelle bezogen. Dies erlaubt eine einfache Skalierung des Zellenstroms über die Variation der Zellfläche. Damit geht auch eine proportionale Anpassung des Massestroms an Produktgasen und Kühlmittelbedarf einher. Die einzelnen Zellen sind in Serienschaltungen zu Stacks zusammengesgeschlossen. Darüber hinaus wurde ein Modell einer Leistungselektronik erstellt, um das dynamische Verhalten abbilden zu können. Für Betrachtungen in Zeiträumen, für die die Dynamik der Leistungselektronik vernachlässigt werden kann, wird eine aus dem Leistungselektronik-Modell abgeleitete Wirkungsgradfunktion f_{AFE}^* verwendet.

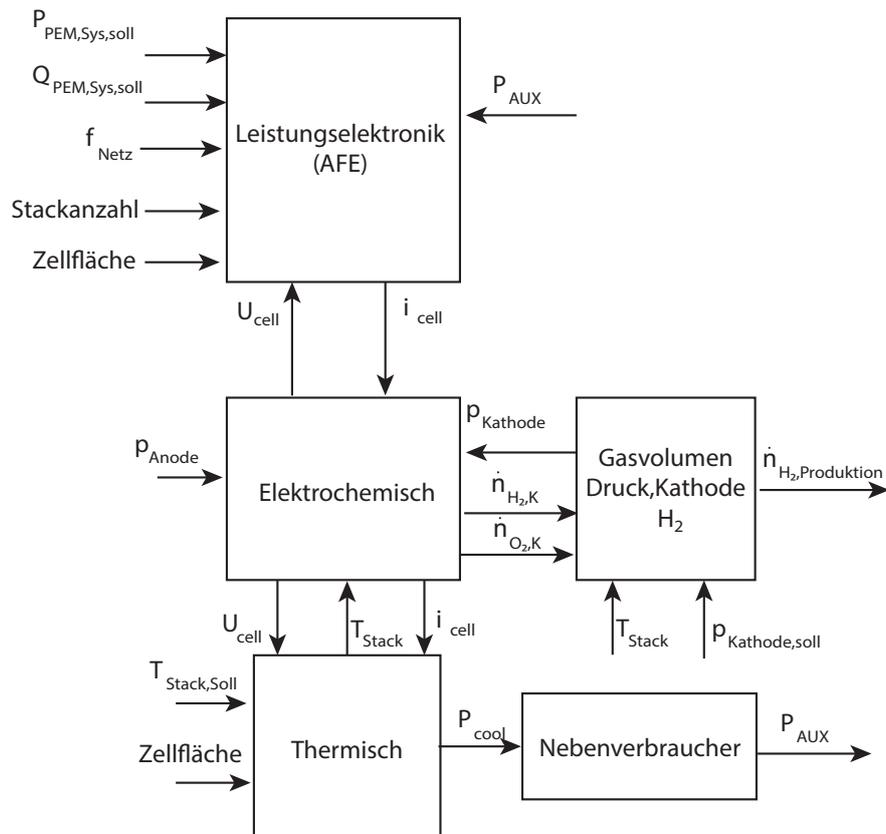


Abbildung 5: Vereinfachte Blockdarstellung des Elektrolyseurmodelles. Quelle: Eigene Darstellung

$$[i_{cell}] = f_{AFE} \left(\begin{array}{c} P_{PEM, Sys, Soll} \\ Q_{PEM, Sys, Soll} \\ f_{Netz} \\ U_{cell} \\ P_{AUX} \\ Stackanzahl \\ Zellfläche \end{array} \right) \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} U_{cell} \\ \dot{n}_{H_2, K} \\ \dot{n}_{O_2, A} \\ \dot{n}_{H_2, A} \\ \dot{n}_{O_2, K} \end{bmatrix} = f_{Elektrochemisch} \left(\begin{array}{c} i_{cell} \\ p_{Kathode} \\ p_{Anode} \\ T_{Stack} \end{array} \right) \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} P_{cool-stack, ele} \\ T_{Stack} \end{bmatrix} = f_{Thermisch} \left(\begin{array}{c} U_{cell} \\ i_{cell} \\ T_{Stack, soll} \end{array} \right) \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} p_{Kathode} \\ \dot{n}_{H_2, Produktion} \end{bmatrix} = f_{Druck, Kathode} \left(\begin{array}{c} \dot{n}_{H_2, K} \\ \dot{n}_{O_2, K} \\ p_{Kathode, soll} \\ T_{Stack} \end{array} \right) \quad (21)$$

Für die tatsächliche Verwendung des Modelles wird jeweils eine statische Konfiguration vorgenommen, bei der die Anzahl der Stacks, die Zellfläche, die Solldrücke, die Sollstacktemperatur und die Umgebungstemperatur als Modellparameter festgelegt werden. Die Schnittstelle zum Einsatz des Elektrolyseurmodelles als Netzdienstleister kann als Funktion in Gleichung 22 dargestellt werden.

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_{H_2, Produktion} \\ p_{Kathode} \\ T_{Stack} \end{bmatrix} = f_{El, Extern} (P_{PEM, Sys, Soll}, Q_{PEM, Sys, Soll}, f_{Netz}, p_{Kathode, soll}, T_{Stack, soll}) \quad (22)$$

4.1. Das Elektrochemische Modell

4.1.1. Die Zellspannung

Die Nernstgleichung für den PEM-Elektrolyseur Für die Parameter der Nernstgleichung sind die Aktivitäten der Produkte und Edukte an den Elektroden neben der Temperatur der maßgebliche Faktor. Bei der PEM-Elektrolyse kann für die Aktivität als Ausdruck für die Konzentration für Wasser in flüssiger Form $a_{H_2O} = 1$ angenommen werden. Die Aktivitäten des Wasserstoffes a_{H_2} und Sauerstoffes a_{O_2} sind proportional zu

ihrer Konzentrationen c_{H_2} und c_{O_2} im Lösungsmittel Wasser. Diese Proportionalität kann über eine Referenzkonzentration ausgedrückt werden. Die Konzentrationen sind wiederum über die jeweilige Löslichkeitskonstante des für ideale Lösungen gültigen Henry-Gesetzes proportional mit dem Partialdruck verknüpft. (Gleichung 23 siehe [34])

$$a_{\text{H}_2} = \frac{c_{\text{H}_2}}{c_{0\text{H}_2}} \quad a_{\text{O}_2} = \frac{c_{\text{O}_2}}{c_{0\text{O}_2}} \quad (23)$$

Werden für die Referenzkonzentrationen $c_{0\text{H}_2}$ $c_{0\text{O}_2}$ jene Konzentrationen verwendet die sich bei Normalbedingungen einstellen lässt sich die Nernstgleichung in Gleichung (24) über die Partialdrücke und den Normaldruck p^0 als Referenzdruck formulieren.

$$U_{\text{nernst}} = U_{T,\text{rev}} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{\text{H}_2,\text{part},K} \sqrt{p_{\text{O}_2,\text{part},A}}}{p^0} \quad (24)$$

Die Gasphasen der Produktgase werden als vollständig mit Wasserdampf gesättigt betrachtet.[39] Der dabei jeweils herrschende Wasserdampf-Partialdruck auf Anoden- und Kathodenseite wird nach den in [21] und [22] ermittelten Werten als temperaturabhängiger Parameter eingeführt. Ist die Elektrolysezelle in Betrieb müssen die entstehenden Produktgase aus dem Reaktionsbereich der Elektroden fortlaufend abgeführt werden. Dies ist allerdings mit einem gewissen Widerstand verbunden der den Stofftransport ermöglichenden Diffusions- und Konvektionsströmen Grenzen setzt. Dieser Widerstand macht sich als Druckerhöhung im Bereich der Elektroden und stoffführenden Kanalstruktur auf Anoden und Kathodenseite bemerkbar, der auch in der Druckabhängigkeit der Nernstspannung Berücksichtigung finden muss. Die in die Beschreibung einfließenden Faktoren wie Diffusionskoeffizient, hydraulische Leitfähigkeit und Schichtdicke folgen aus der tatsächlichen Realisierung der Elektrolysezelle. Im Rahmen dieser Arbeit wird die in [48] Beschreibung und die darin verwendeten Parameter in die Gleichungen (25) übernommen.

$$\Delta p_{\text{H}_2} = \dot{n}_{\text{H}_2,KS} \frac{\delta_{KS}}{\epsilon_{\text{diff}}^{KS} + k_f^{KS}} \quad \Delta p_{\text{O}_2} = \dot{n}_{\text{O}_2,AS} \frac{\delta_{AS}}{\epsilon_{\text{diff}}^{AS} + k_f^{AS}} \quad (25)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2,KS} = \frac{i_{\text{cell}}}{2F} \quad \dot{n}_{\text{O}_2,AS} = \frac{i_{\text{cell}}}{4F} \quad (26)$$

$$\Delta p_{\text{H}_2} = i_{\text{cell}} A_K \quad \Delta p_{\text{O}_2} = i_{\text{cell}} A_A \quad (27)$$

Die Druckerhöhung in den Kanälen der Kathoden und Anodenseite durch die Abtransporthemmung der Produkte lässt sich demnach kompakt als proportional zur Stromflussdichte i_{cell} beschreiben.

Insgesamt folgt damit für die Partialdrücke des Sauerstoffes und des Wasserstoffes die Ausdrücke in Gleichung 28.

$$p_{\text{H}_2,\text{part},K} = p_{\text{Kathode}} - p_{\text{H}_2\text{O},\text{H}_2}(T) - i_{\text{cell}} A_K \quad p_{\text{O}_2,\text{part},A} = p_{\text{Anode}} - p_{\text{H}_2\text{O},\text{O}_2}(T) - i_{\text{cell}} A_A \quad (28)$$

Aktivierungsüberspannung Zur Bestimmung der Butler-Volmer Gleichung werden die Parameter aus dem Datenfitting zu einem PEM-Elektrolyseur in [48] verwendet. Dabei vereinfacht sich die Gleichung 17 zur Gleichung 29

$$\eta_{Aktivierung}(i_{cell}) = \alpha \log \frac{i_{cell}}{i_0} \quad (29)$$

Überspannung durch elektrische Leitung Ohmsche Widerstände in der Elektrolysezelle entstehen einerseits durch den Spannungsfall bei der Ionenleitung in der Polymermembran und andererseits durch die mit resistiven Widerständen behafteten elektrischen Leiter wie Stromsammler und Elektroden. Für die Leitfähigkeit der Membran werden die Angaben aus [24] für Nafion verwendet. Der Wert für den Feuchtegrad λ wird mit 25 angenommen.

$$\eta_{Ohm}(i_{cell}) = i_{cell}(R_{mem} + R_{ele}) \quad R_{mem} = \frac{\delta_{membran}}{\sigma_{membran}} \quad (30a)$$

$$\sigma_{membran} = (0,005139\lambda + 0,00326) \exp\left(1268 - \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (30b)$$

$$\lambda = 25 \quad \delta_{membran} = 200 \mu m \quad (30c)$$

R_{ele} wird aus [48] übernommen. Der Wert basiert auf gemessenen Betriebsdaten eines kommerziellen Elektrolyseurs. Die Dicke der Membran wurde ebenfalls aus jenem Modell übernommen.

Konzentrationsüberspannung Eine Konzentrations- oder auch Diffusionsüberspannung liegt in einer Beschränkung in der Zu- oder Abfuhr der Produkte und Edukte zu und von den Elektroden begründet. Im Fall der Elektrolyse in einer PEM-Zelle werden solche Limitierungen erst bei sehr hohen Stromdichten erreicht, wobei mit steigender Stromdichte das Aufkommen von Sauerstoffblasen an der Anode den ersten auftretenden limitierenden Faktor darstellt. Dieser Bereich liegt jenseits üblicher Arbeitsbereiche, weshalb Konzentrationsüberspannungen vernachlässigt werden.[18]

$$U_{cell} = U_{Nernst} + \eta_{Ohm}(i_{cell}) + \eta_{Aktivierung}(i_{cell}) \quad (31)$$

4.1.2. Stoffbilanz und Faraday-Wirkungsgrad

Die bei der Elektrolyse entstehende Menge an Wasserstoff und Sauerstoff an Kathode und Anode steht über das Faraday Gesetz mit dem die Zelle durchfließenden elektrischen Strom in Verbindung. (Gleichung 32)

$$\dot{n}_{H_2,K,EL} = \frac{i_{cell}}{2F} \quad \dot{n}_{O_2,A,EL} = \frac{i_{cell}}{4F} \quad (32)$$

Tabelle 2: Parameter der PEM-Zellspannung nach[48]

Zelltemperatur in °C	A_K in $\frac{\text{bar cm}^2}{\text{A}}$	A_A in $\frac{\text{bar cm}^2}{\text{A}}$	α 1	i_0 in $10^{-8} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	R_{ele} in $\Omega \text{ cm}^2$	R_{mem} in $\Omega \text{ cm}^2$
30	2,4	2,8	0,02803	21,8	0,096	0,159
40	2,4	2,8	0,02483	5,71	0,096	0,140
50	2,4	2,8	0,02344	4,15	0,096	0,123
60	2,4	2,8	0,02232	3,36	0,096	0,109
70	2,4	2,8	0,02141	2,95	0,096	0,098
80	2,4	2,8	0,02038	1,97	0,096	0,088

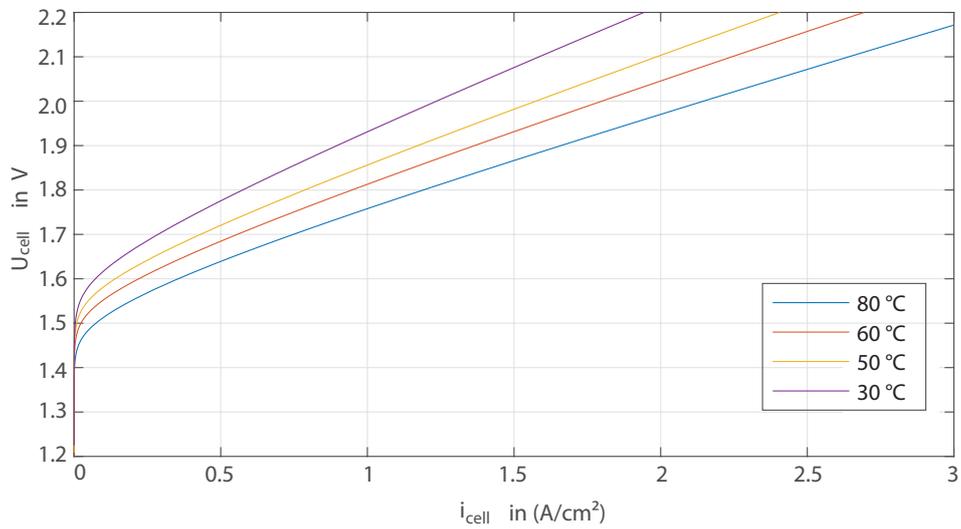


Abbildung 6: Die für dieses Modell resultierende Zell-Polarisationskurve. Quelle: Eigene Darstellung

Diffusionsvorgänge von Wasserstoff und Sauerstoff durch die Polymermembran mindern den Partialdruck der Produktgase und stellen einen Verlust an produzierten Stoff dar. Der Verlust wird mittels der Parameter Diffusionskoeffizient, Membrandicke und Gasdruck nach dem Model in [40] beschrieben.

$$\dot{n}_{\text{H}_2,diff} = \frac{\varepsilon_{\text{H}_2}(T)}{\delta_{membran}} p_{part,H_2,K} \quad \dot{n}_{\text{O}_2,diff} = \frac{\varepsilon_{\text{O}_2}(T)}{\delta_{membran}} p_{part,O_2,A} \quad (33)$$

Auf der Kathodenseite geht Wasserstoff sowohl durch Diffusion auf die Anodenseite, als auch durch die Reaktion von Wasserstoff mit der doppelten Molmenge an Sauerstoff zu Wasser verloren. Auf der Anodenseite geht Sauerstoff durch die Diffusion zur Kathodenseite verloren.

$$\dot{n}_{\text{H}_2,K} = \dot{n}_{\text{H}_2,K,EL} - \dot{n}_{\text{H}_2,diff} - 2\dot{n}_{\text{O}_2,diff} \quad \dot{n}_{\text{O}_2,A} = \dot{n}_{\text{O}_2,A,EL} - \dot{n}_{\text{O}_2,diff} \quad (34)$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2,A} = \dot{n}_{\text{H}_2,diff} \quad (35)$$

Der Wasserhaushalt für die Elektrolysereaktion besteht einerseits aus dem für die Reaktion notwendigen Edukt-Zustrom an der Anodenseite abzüglich eines durch Diffusion auf die Kathodenseite übertretenden Wasserflusses. Auf der Kathodenseite wird der diffundierte Wasserstrom um den durch die Reaktion aus Wasserstoff und Sauerstoff entstandenen zusätzlichen Wasseranteil erhöht.

Der Faraday-Wirkungsgrad wird damit zu

$$w_{Faraday} = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2,K} + \dot{n}_{\text{O}_2,A}}{\dot{n}_{\text{H}_2,K,EL} + \dot{n}_{\text{O}_2,A,EL}} \quad (36)$$

4.2. Das thermische Modell

Die Differenz der Zellspannung zur thermoneutralen Spannung dient als Maß für den notwendigen Wärme- bzw. Entropiestroms in oder aus der Elektrolysezelle, der notwendig ist, um bei einer stationären Temperatur die notwendige Wärmebilanz der chemischen Reaktion der Wasserspaltung zu decken. Liegt die Zellspannung unterhalb der thermoneutralen Spannung, ist ein Wärmestrom in die Zelle notwendig, um die Lücke zwischen Gibb-scher Energie und Standardbildungsenthalpie zu schließen. Ist die Zellspannung gleich der thermoneutralen Spannung, wird der Wärmebedarf bereits durch die Überspannungen vollständig gedeckt. Überschreitet die Zellspannung die thermoneutrale Spannung, wird durch die Joule-Verluste der Überspannungen mehr Wärmeenergie in der Zelle frei, als für die Reaktion erforderlich ist. Deshalb muss je nach Betriebszustand die Zelle geheizt oder gekühlt werden. Im vorliegenden Modell fällt ein auf die Zellfläche bezogener Wärmestrom \dot{q}_{cell} an. (Gleichung 37)

$$\dot{q}_{cell} = (U_{cell} - U_{th.normal}) \cdot i_{cell} \quad (37)$$

Zur Beschreibung des thermischen Zustandes eines Zellflächenelementes wird eine Wärmebilanz aufgestellt. Neben \dot{q}_{cell} tragen dabei noch die Wärmeströme der Verdampfungswärme \dot{q}_{vap} , ein Wärmestrom \dot{q}_{diss} und $\dot{q}_{\text{H}_2\text{O},edukt}$ zur Gesamtbilanz bei.

$$\dot{q}_{cell} + \dot{q}_{vap} + \dot{q}_{diss} + \dot{q}_{\text{H}_2\text{O},edukt} + q_{cool/heat} = \dot{q}_{stack} \quad (38)$$

$\dot{q}_{H_2O,edukt}$ beschreibt die notwendige Wärme, um das Wasser, das der Reaktion als Edukt zugeführt wird, von der Umgebungstemperatur auf die Zelltemperatur anzuheben. Die Verdampfungswärme deckt jenen Energiebedarf, der notwendig ist, um flüssiges Wasser in der Elektrolysezelle zu verdampfen und um die Produktgase gemäß Modellannahme in Kapitel 4.1.1 vollständig mit Wasserdampf zu sättigen. Der Wärmestrom \dot{q}_{diss} stellt jene Wärmemenge dar, die der Elektrolyseurstack an die Umgebung abgibt. Dieser Wärmeübergang wird vereinfacht mittels eines Wärmeübergangskoeffizienten $R_{therm-stack}$ modelliert. In [16] wird ein Wert von 0,0668 W/K für einen 46 kW PEM-Elektrolyseur als Ergebnis eines Modellierungsverfahrens zu einem kommerziell verfügbaren Produkt angegeben. Jener Elektrolyseur besteht aus 60 Zellen mit einer aktive Zellfläche von 290 cm²

$$\dot{q}_{diss} = R_{therm,spec}(T_{Umgebung} - T_{Stack}) \quad R_{therm,spec} = \frac{R_{therm-stack}}{A_{cell,stack}} \quad (39a)$$

$$A_{cell,stack} = 60 \cdot 290 \text{ cm}^2 \quad R_{therm,spec} = 3,84 \cdot 10^{-6} \frac{W}{K\text{cm}^2} \quad (39b)$$

$$\dot{q}_{H_2O,edukt} = \dot{n}_{H_2O,edukt} \cdot \frac{1}{c_{p,Wasser}}(T_{Umgebung} - T_{Stack}) \quad \dot{n}_{H_2O,edukt} = \frac{i_{cell}}{2F} \quad (40)$$

$q_{cool/heat}$ stellt die Stellgröße eines Kühl- oder gegebenenfalls Heizsystems dar, um den Elektrolyseur pro Flächenelement auf eine bestimmte Solltemperatur zu regeln. Wie in [48] ersichtlich, ist das Ausmaß an Verdampfungswärme bereits bei einem Druck von 3 bar verhältnismäßig klein. Da der Druckbereich im Betrieb auf Kathodenseite deutlich höher ist und der resultierende Fehler in einer Erhöhung des notwendigen Kühlmittelstromes mündet, der, wie sich zeigen wird, relativ geringe Auswirkungen auf das elektrische Gesamtsystem hat, wird die Verdampfungswärme vernachlässigt.

Im Rahmen einer vereinfachten Beschreibung des thermisch-dynamischen Verhaltens wird die Änderung der Stack-Temperatur über eine konstante Wärmekapazität mit der Änderung der inneren Energie durch den Zu- und Abfluss von Wärme verknüpft. Für die Größe $c_{p,Stack}$ findet sich wiederum in [16] ein Wert von 162,116 kJ/K als Modellergebnis für einen 46 kW Elektrolyseur.

$$\frac{dT_{Stack}}{dt} = A_{cell,stack} \cdot \dot{q}_{stack} \quad (41)$$

$$c_{p,stack,spec} = \frac{c_{p,stack}}{A_{cell,stack}} \quad c_{p,stack,spec} = 14,48 \frac{14,48 \text{ J}}{14,48 \text{ Kcm}^2} \quad (42)$$

Die Gleichung (41) führt mit den Gleichungen 38, 39a und 40 auf eine Übertragungsfunktion mit PT1-Verhalten, der Störgröße i_{cell} und einem als konstant angenommenen Parameter $T_{Umgebung}$.

Die PT1 Strecke wird durch das Produkt $R_{therm,spec} c_{p,stack,spec} = \tau_{stack,spec} = 3,08 \text{ h}$ im Sinne einer Zeitkonstanten dynamisch charakterisiert. Der Wert der Zeitkonstanten aus dem Modellergebnis fällt deutlich höher aus als das Messergebnis zur Bestimmung der

Zeitkonstanten des realen Elektrolyseurs. (2,12 h) Da sich die in [16] gezeigte Aufheizphase allerdings mit der Simulation deckt und sich nur die Simulation der Abkühlung stark unterscheidet, wird der konservativere Wert in dieser Arbeit beibehalten. Der notwendige Kühl- oder Heizstrom pro Zellflächenelement wird als Stellgröße eines PI-Regler im Modell implementiert, wobei der PI-Regler nach dem Frequenzkennlinienverfahren parametrisiert wurde.

Kühlsystem Der aus dem Elektrolyseur-Stack abzuführende Wärmestrom wird auf den den Stack durchfließenden Wasserkreislauf übertragen, der auch der Frischwasserzufuhr für die chemische Reaktion dient. Der notwendige Massenstrom pro Zellflächenelement an Kühlwasser ergibt sich nach Gleichung 43 aus der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und der zulässigen Temperaturspreizung zwischen zufließendem und abfließendem Kühlwasser. $\Delta T_{stack-cool}$ stellt dabei einen konstruktiven Freiheitsgrad dar und wird mit 5 K auf etwa 10% der Nennbetriebstemperatur gesetzt.[48] Der Kühlwasserstrom wird noch um den Anteil des Edukt-Frischwassers ergänzt, der bei der Elektrolyse umgesetzt wird.

$$\dot{m}_{cool-stack} = \frac{\dot{q}_{cool}}{c_{p,H_2O} \cdot \Delta T_{stack-cool}} + M_{H_2O} \cdot \dot{n}_{H_2O,edukt} \quad (43)$$

$$\dot{q}_{cool} = \begin{cases} \dot{q}_{cool/heat} & \dot{q}_{cool/heat} \geq 0 \\ 0 & \dot{q}_{cool/heat} < 0 \end{cases} \quad (44)$$

Der energetische Aufwand, der notwendig ist, um das Kühlwasser durch den Elektrolyseur-stack zu transportieren, äußert sich als Druckverlust im geschlossenen Kühlmittelkreislauf. Der Druckverlust steht im Zusammenhang mit der technischen Ausführung der wasserführenden Kanalstrukturen im Stack und kann über den Querschnitt der Kanäle beeinflusst werden. In [48] wird ein Druckverlust $\Delta p_{cool-stack}$ als konstruktive Vorgabe in Höhe von 2 bar gesetzt. Das Kühlsystem in [16] weist ebenfalls einen maximalen Druckverlust von 2 bar auf. Für die Wirkungsgrade wird der ungünstigste Wert aus [48] für die Kreiselpumpe in Höhe von $\eta_{pumpe} = 0,5$ übernommen. Für den Wirkungsgrad des elektrischen Motors wird ein niedriger Wert in der Höhe von $\eta_{cool-motor} = 0,75$ angenommen, der grob dem Teillastbereich von Motoren der Energieeffizienzklassen IE3 entspricht.[10]

$$P_{cool-stack,pump} = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \cdot \dot{m}_{cool-stack} \cdot \Delta p_{cool-stack} \quad (45)$$

$$P_{cool-stack,ele} = P_{cool-stack,pump} \cdot \eta_{pumpe} \cdot \eta_{cool-motor} \quad (46)$$

Neben der elektrischen Pumpkühlleistung fällt noch ein Leistungsbedarf an, um das Frischwasser auf die gegebenenfalls erhöhten Druckverhältnisse im Stack zu heben. Zwar ist der dabei notwendige Pumpendruck bei beispielsweise 35 bar Betriebsdruck im Elektrolyseur deutlich größer als der erzeugte Druck der Kühlwasserpumpe; der Volumenstrom des Frischwassers dagegen ist um Größenordnungen kleiner als jener der von der Kühlwas-

serpumpe umgesetzt wird.³ Die Leistungsaufnahme der Frischwasserpumpe wird deshalb vernachlässigt.

Gastrocknung Die Gastrocknung erfolgt je nach Anforderungen in mehreren Stufen. Die erste Stufe senkt die Temperatur des produzierten Wasserstoffes von der Betriebstemperatur des Elektrolyseur-Stacks auf Umgebungstemperatur. Dabei fällt der Wasserdampf als Kondensat aus und wird im Gasabscheider dem Kühlmittelkreislauf zugeführt. Die dafür notwendige Kühlleistung ist für den im Vergleich zum Kühlmittelkreismassenstrom viel geringeren Massenstrom des zu kühlenden Produktgases vernachlässigbar.⁴ Eine darauf folgende Adsorptions-Trockenstrecke für geringere Rest-Feuchtwerte wird nicht berücksichtigt. Sie hat auch keinen Einfluss auf den möglichen dynamischen Betriebsbereich des Elektrolyseurs.⁵

Druckaufbau im Elektrolyseur Um den dynamischen Druckaufbau des Gasgemisches im Bereich der Kathode und im Wasserstoffgasabscheider zu beschreiben, wird das Gasgemenge als Summe von Wasserstoff, Sauerstoff und Wasserdampf betrachtet. In der Druckaufbauphase wird an der Kathode Wasserstoff produziert, der sich mit dem von der Anodenseite diffundierten Sauerstoff, solange keine Entnahme erfolgt, im Gasabscheider fortlaufend sammelt. Das bedeutet, dass sich die Gasdichte im konstanten Volumen auch fortlaufend erhöht bzw. das auf die Stoffmenge bezogene Volumen (v_{mol,H_2} , v_{mol,O_2}) verringert. Mit den Van-der-Waals Gasgleichungen in (49) ergibt sich demnach die Beschreibung des Drucks als Funktion des Gasmengeninhaltes im Elektrolyseurgasvolumen. Die Gasmenge ergibt sich aus der Differenz von Zufluss und Abfluss der Gasmoleküle im Volumen der Kathodenseite zuzüglich des Partialdruckes $p_{part,H_2O,K}$ des Wasserdampfes in der Gasatmosphäre des Elektrolyseurs. Für den Wasserdampfpartialdruck wurden wieder die Werte aus [21] verwendet. Die Einhaltung eines Soll-drucks wird über einen Regelkreis modelliert. Der nach dem Frequenzkennlinienverfahren ausgelegte PI-Regler wirkt auf das Abflussventil und regelt das Druckniveau auf einen konstanten Wert $p_{Kathode} = 20$ bar. Der Wert $V_{spec,K}$ gibt das Verhältnis des verfügbaren Gasvolumens im System pro Zellfläche wieder. Der Betriebsdruck von 20 bar wird unterhalb des maximalen Betriebsdruckes des kommerziellen Gerätes aus [28] übernommen um eine Bandbreite von ± 15 bar bei druckdynamischem Betrieb zur Verfügung zu haben. $V_{spec,K}$ wird im Rahmen dieses Modelles, sofern nicht explizit erwähnt, im Verhältnis 1/306250 festgelegt und nimmt ein Verhältnis von $3,27 \text{ cm}^3$ Gasvolumen pro cm^2 Zellfläche des Systems aus [28] und [48] an.

³Bei einem 1 MW Elektrolyseur im Verhältnis von 12,4 kg/s zu 0,04 kg/s

⁴Bei einem 1 MW Elektrolyseur im Verhältnis von 12,4 kg/s zu 0,004 kg/s

⁵laut Auskunft eines Verantwortlichen des Herstellers protonOnSite

Die Van-der-Waals Koeffizienten in den Gleichungen (49) stammen aus [34].

$$p_{Kathode} = p_{part,H_2,K} + p_{part,O_2,K} + p_{part,H_2O,K} \quad (47)$$

$$p_{part,H_2,K} = \frac{n_{H_2,K}RT}{V_{spec,K} - n_{H_2,K}b_{H_2}} - \frac{n_{H_2,K}^2 a_{H_2}}{V_{spec,K}^2} \quad (48)$$

$$p_{part,O_2,K} = \frac{n_{O_2,K}RT}{V_{spec,K} - n_{O_2,K}b_{O_2}} - \frac{n_{O_2,K}^2 a_{O_2}}{V_{spec,K}^2} \quad (49)$$

$$n_{H_2,K}(t) = \int_{t_0}^t \dot{n}_{H_2,K}(\tau) d\tau \quad (50)$$

$$n_{O_2,K}(t) = \int_{t_0}^t \dot{n}_{O_2,K}(\tau) d\tau \quad (51)$$

$$a_{H_2} = 0,2420 \cdot 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{m}^6/\text{mol}^2 \quad a_{O_2} = 1,364 \cdot 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{m}^6/\text{mol}^2 \quad (52)$$

$$b_{H_2} = 2,65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol} \quad b_{O_2} = 13,19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol} \quad (53)$$

Anodenseitig wird im Rahmen dieser Arbeit von atmosphärischen Druckbedingungen ausgegangen. Der produzierte Sauerstoff wird einfach abgeführt.

4.3. Leistungselektronik

Für den Betrieb eines Elektrolyseurs mit Energie aus dem öffentlich Verbundnetz ist eine Wandlung von Wechsel in Gleichstrom notwendig. Hierfür wird ein vektor-geregeltes selbstgeführtes System (In der englischsprachigen Literatur Active Frontend, AFE) verwendet. Das Argument, das für den zusätzlichen Aufwand und für die damit verbundenen Mehrkosten zu thyristor-basierten Systemen spricht, findet sich in der Möglichkeit, Wirk- und Blindleistung frei vorgeben zu können. Traditionell wird damit der Anforderung der Netzbetreiber nachgekommen, Leistungsfaktoren möglichst gleich eins zu erreichen. Als aktiver Netzdienstleister kann ein solches System allerdings nach Anforderung beliebig Blindleistung einspeisen oder entnehmen. Im Kern besteht das hier aufgebaute System aus in einer B6 Konfiguration angeordneter Schalter, die auch stromführend beliebig abschaltbar sind. Neben Leistungs-MOSFETs werden *Insulated-Gate Bipolar Transistors IGBT* für leistungselektronische Schaltungen dieser Art verwendet. Im Anwendungsfall als Gleichrichter für Elektrolyseure in der Leistungsklasse mehrerer Megawatt mit Strömen in der Größenordnung von 2-3 kA und Stack-Spannungen im einstelligen kV-Bereich sind allerdings nur IGBTs geeignet. Im Modell wird die Anbindung an ein 20kV Mittelspannungsnetz über einen 20kV/400V 50Hz Dyn5 Transformator realisiert. Auf den ersten folgt ein weiterer Transformator, der die Spannung nochmals im Verhältnis 200V/400V verringert. Dieser dient der Spannungsanpassung auf ein für den Elektrolyseurstack geeignetes Spannungsniveau. Zwischen den IGBTs und dem Transformator T2 wirkt noch eine gesonderte Drossel, deren Induktivität dem gesteuerten Stromaufbau durch das AFE dient. Ein Kondensator auf der Gleichstromseite bildet das spannungsstabilisierende Element. Die AUX-Verbraucher in Abbildung 7 summieren mit Ausnahme des Stacks alle

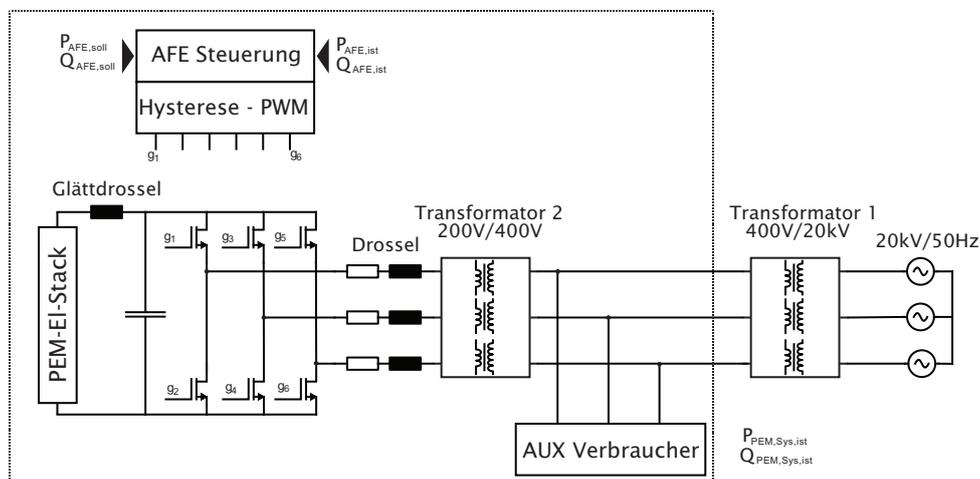


Abbildung 7: Grundlegender Aufbau der Leistungselektronik und Netzanbindung. Quelle: Eigene Darstellung

für den Betrieb notwendigen Verbraucher. Dies ist quantitativ vorrangig die Kühlwasserpumpe, aber auch noch die Verbraucher kleinerer Ordnung, die allerdings im Modell nicht berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass $P_{PEM,Sys,ist}$ und $Q_{PEM,Sys,ist}$ vollständig die übergebenen Leistungswerte an das Netz darstellen. Die nachfolgend präsentierte Regelung berücksichtigt dadurch auch dynamische Verbrauchsänderungen, die an den

AUX-Verbrauchern entstehen und reduziert dabei gegebenenfalls die Leistungsaufnahme des Elektrolyseurstacks oder passt die Blindleistung an den Blindleistungsbedarf der AUX-Verbraucher an.

4.3.1. Funktionsweise der Leistungselektronik

Ausgangspunkt der Regelung der Wirk- und Blindleistungsflüsse ist die Überführung des Dreiphasensystems in ein, aus für die jeweilige elektrische Größe, orthogonales aus zwei Komponenten bestehendes System.⁶ Dies ermöglicht eine einfache Beschreibung der Phasenlage der elektrischen Ströme zu den Spannungen und damit auch der Leistungsgrößen eines Mehrphasensystems. Eine Abbildung des Dreiphasensystems in ein Ersatzsystem ist die Clark-Transformation in ein ständerfestes Koordinatensystem (α, β) . Die Leistungsgrößen P und Q wären dabei allerdings auch im stationären Fall zeitabhängig. Geht man vom System (α, β) allerdings mit Hilfe der Park-Transformation auf ein mit der Netzfrequenz rotierendes Koordinatensystem (d, q) über, erhält man im stationären Fall konstante Werte für die Leistungen. Die leistungsinvariante Park'sche Transformation für die Ströme und Spannungen eines Dreiphasensystems ist definiert als Gleichung 54 und 55.

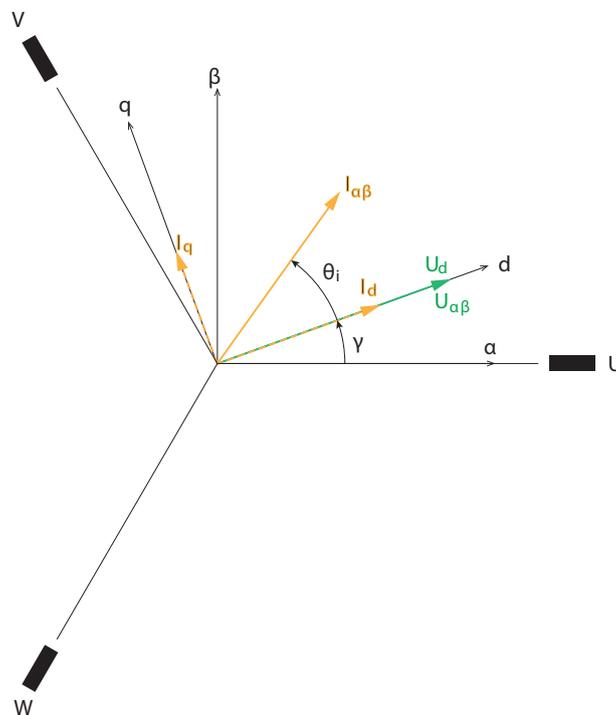


Abbildung 8: Digramm zur d,q Transformation. Quelle: Eigene Darstellung

⁶Ein 0-Anteil im d,q,0-System wird in der Regelung nicht berücksichtigt

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma + \theta_i) & \cos\left(\gamma + \theta_i - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\gamma + \theta_i - \frac{4}{3}\pi\right) \\ -\sin(\gamma + \theta_i) & -\sin\left(\gamma + \theta_i - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma + \theta_i - \frac{4}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) \\ -\sin(\gamma) & -\sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_U \\ U_V \\ U_W \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$\begin{bmatrix} I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma + \theta_i) & \sin(\gamma + \theta_i) & 1 \\ \cos\left(\gamma + \theta_i - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma + \theta_i - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\gamma + \theta_i - \frac{4}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma + \theta_i - \frac{4}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$\begin{bmatrix} U_U \\ U_V \\ U_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) & 1 \\ \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & -\sin\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_o \end{bmatrix} \quad (57)$$

Der Phasenwinkel γ , der in einer elektrischen Maschine die Lage des Rotors repräsentiert, muss jederzeit bekannt sein und wird durch eine Messung mit einer *Phase Locked Loop* (*PLL*) bestimmt. Die Phasenlage der Spannung dient als Bezugssystem für den Phasenwinkel des Stromes im Ersatzsystem. Mit der Wahl des Ursprungs des Koordinatensystems in der Achse zu U_U wird $U_q = 0$. Im Fall des symmetrischen Betriebszustandes des Dreiphasensystems entfällt auch das Nullsystem und U_o wird wie auch I_o gleich 0. Mit den Rücktransformationen Gleichung 56, 57 und den Gleichungen 58, folgen die Wirkleistung P und die Blindleistung Q als eine Funktion von lediglich I_d beziehungsweise I_q und U_d .

$$P = \Re(\underline{U}_U \underline{I}_U^* + \underline{U}_V \underline{I}_V^* + \underline{U}_W \underline{I}_W^*) \quad Q = \Im(\underline{U}_U \underline{I}_U^* + \underline{U}_V \underline{I}_V^* + \underline{U}_W \underline{I}_W^*) \quad (58)$$

$$P = \frac{2}{3} U_d I_d \quad Q = \frac{2}{3} U_d I_q \quad (59)$$

Wenn U_d aus einem gegebenen System U_U, U_V, U_W folgt, lässt sich jeweils über die Steuerung der Ströme I_d und I_q Wirk- und Blindleistung getrennt regeln. Über die inverse Parktransformation (56) entsteht ein zu U_U, U_V, U_W passendes Dreiphasensystem I_U, I_V, I_W , das die gewünschten Leistungen $P_{Elektrolyseur}, Q_{Elektrolyseur}$ liefert. Zur Erzeugung der gewünschten Ströme muss die Brückenschaltung B6 über die Eingänge g_1 bis g_6 entsprechend angesteuert werden.

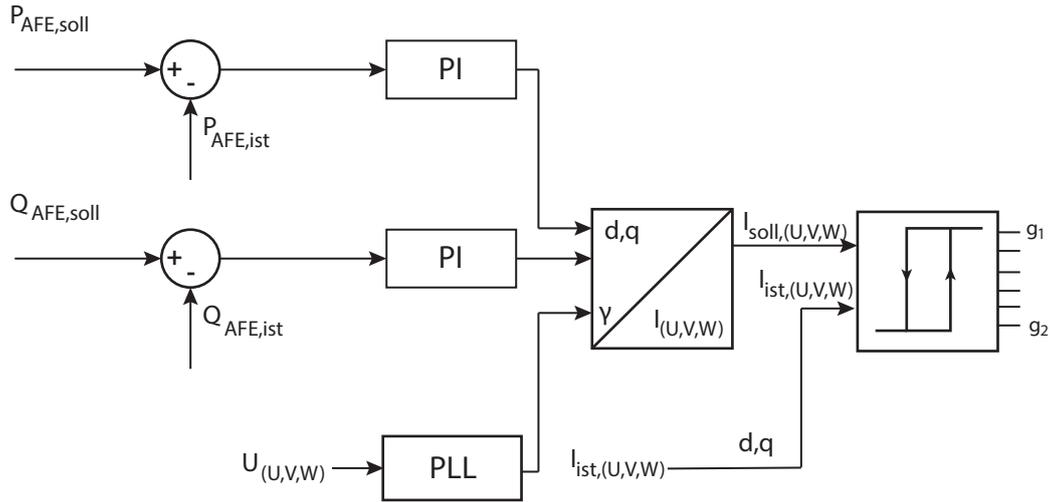


Abbildung 9: Struktur der P,Q Regelung des AFE (Äußerer Regelkreis). Quelle: Eigene Darstellung

Innerer Stromregelkreis Das notwendige Pulsweitenmodulationsmuster lässt sich auf verschiedene Arten erzeugen. Für diese Arbeit wird ein einfaches Verfahren mittels Hystereseansteuerung gewählt, da sich das Modell einfach implementieren lässt und gleichzeitig ein hohes Maß an Dynamik bei der Erzeugung der Ströme bietet und damit auf Leistungsänderungen schnell reagieren kann. Nach Gleichung 60 wird über die Schalterstellung $S(g_i, g_{i+1})$ eines Schalterpaares der Strom einer Phase aus $I_{U,V,W}$ auf- oder abgebaut. Für die Signale der Schalterpaare gilt jeweils ein komplementärer binärer Wert $g_i = \overline{g_{i+1}}$.

$$R \cdot I_{U,V,W}(t) + L \frac{dI_{U,V,W}(t)}{dt} = U_{U,V,W} - U_{B6,(U,V,W)} \quad (60)$$

$$U_{B6,(U,V,W)} = S(g_i, g_{i+1}) U_{DC,Stack} \quad i \in \{1, 3, 5\} \quad (61)$$

Die Spannung U_{DC} wird nicht wie in anderen AFE-Schaltungen ([33]) geregelt, sie stellt sich indirekt über die Stack-Spannung ein. Die Stackspannung, die über die Serienschaltung der Zellspannungen (Gleichung 16) gebildet wird, ist eine Funktion des Stack-Stroms $I_{DC,Stack}$.

$$P_{Stack} = U_{DC,Stack} I_{DC,Stack} \quad P_{AFE}(I_d) \cdot \eta_{AFE} = P_{Stack} \cdot n_{Stacks \text{ pro AFE}} \quad (62)$$

$$P_{AFE,soll} = P_{PEM, Sys, soll} - P_{AUX} \quad (63)$$

Soll der Elektrolyseur Wirkleistung aufnehmen, muss Strom in den Elektrolyseur fließen. Es müssen also Wasserstoff und Sauerstoff produziert werden. Wird beispielsweise P_{AFE} von 0 ausgehend erhöht, fließt gemäß der Gleichungen 62 und 59 ein Gleichstrom aus

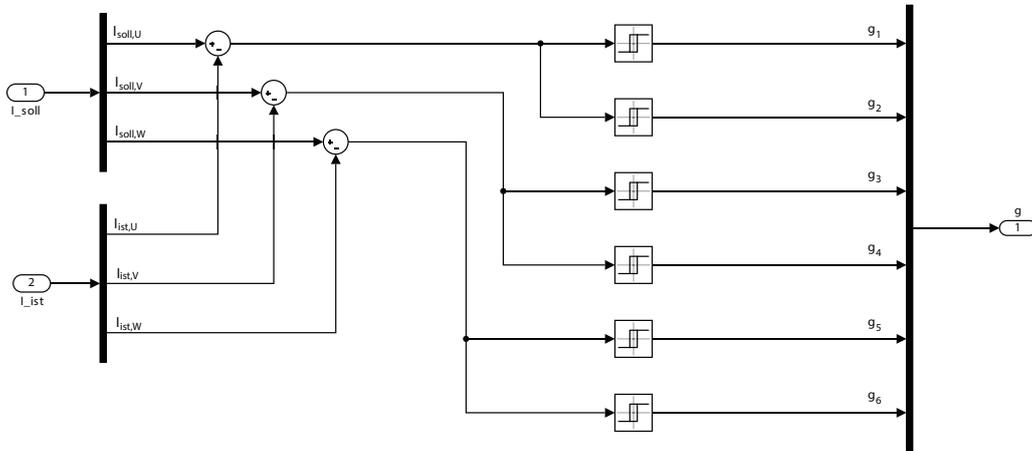


Abbildung 10: Hysterese-Zweipunktregelung für die Ströme $I_{U,V,W}$. Quelle: Eigene Darstellung

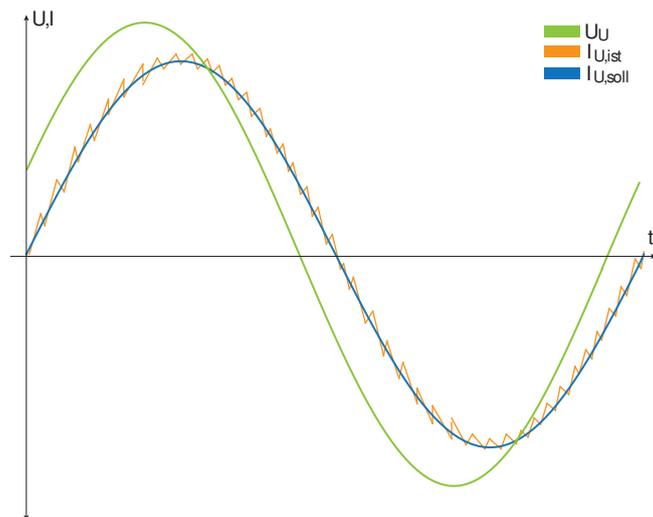


Abbildung 11: Prinzipdarstellung des resultierenden Stromes $I_{U,ist}$ mit Hysteresesteuerung. Quelle: Eigene Darstellung

der B6 Schaltung in den Gleichstromkreis. Für den Kondensator gilt Gleichung 64. Die Ausgangsspannung des Kondensators muss $\leq U_{stack}(i = 0)$ sein, darf also maximal für n_{cell} in Serie geschalteten Zellen $n_{cell} \cdot U_{nernst}$ betragen, da sonst Strom in den Elektrolyseur fließen würde, wir aber vom Betriebszustand P_{AFE} gleich 0 ausgegangen sind.

$$U_{DC} = U_{Kondensator} = C_{AFE} Q_{AFE} \quad (64)$$

$$= C_{AFE} \int I_{Kondensator} dt = C_{AFE} \int I_{DC,Stack} + I_{AFE} dt \quad (65)$$

Der Strom in den Kondensator lässt die Spannung am Kondensator und damit auch jene am Elektrolyseur-Stack steigen. Überschreitet diese Spannung die Spannung $n_{cell} \cdot U_{nernst}$, beginnt Strom in den Elektrolyseur zu fließen. Sobald der Strom in den Elektrolyseur jenem Strom entspricht, der im AFE eingestellt wurde, wird $I_{Kondensator} = 0$ und die Spannung $U_{Kondensator}$ steigt nicht weiter. Die Wirkleistungen P_{Stack} und P_{AFE} befinden sich somit im Gleichgewicht. Im Fall $P_{Stack} = 0$ ist der Stromfluss in den Elektrolyseur gleich null und AFE nicht angesteuert. Über die Freilaufdioden der IGBT-Brückenschaltung stellt sich im nicht angesteuerten Fall eine Mindestspannung ein, die sich aus der Gleichspannung einer ungesteuerten B6-Schaltung ergibt, die an ein dreiphasiges Spannungssystem mit Nennspannung U_N angeschlossen sind. (Gleichung 66, vgl. [33])

$$U_{DC,min} = 2 \cdot \frac{3}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot \sqrt{2}U_N \quad (66)$$

Gleichzeitig muss die Gleichspannung $U_{DC,min}$ kleiner als die Stackspannung im stromlosen Zustand sein. Daraus folgt die Notwendigkeit des Transformators 2 in Abbildung 7.

$$U_{DC,min} < U_{stack}(i_{cell} = 0) = n_{cell} \cdot U_{nernst} \quad (67)$$

Für die Funktion des AFE ist eine Gleichspannung im Gleichstromkreis notwendig. Ohne Spannungsquelle im Gleichstromkreis wird der Kondensator beim Einschalten aus dem Wechselstromnetz geladen.

4.3.2. Charakterisierung der Leistungselektronik

Für die Bewertung des Gesamtsystems Elektrolyseur ist der Wirkungsgrad der Leistungselektronik ein relevanter Faktor, der hier gemäß Gleichung 68 definiert wird.

$$\eta_{AFE} = \frac{U_{DC} \cdot I_{DC,Stack}}{P_{AFE}} \cdot n_{Stacks \text{ pro AFE}} \quad (68)$$

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades wird in der Simulink-Simulation ein rampenförmiger Anstieg der Leistungswerte über zehn Sekunden bis zur Nennscheinleistung vorgegeben. Der Wert von $\cos(\varphi)$ wird für jeden Durchlauf, ausgehend von $\cos(\varphi) = 1$, in

Schritten von 0,1 reduziert. Die Kurve des Wirkungsgrades wird für positive und negative Blindleistung getrennt bestimmt. Die Abbildung 12 zeigt dabei für $\cos(\varphi) = 1$ ein Maximum von 96,99% bei 19,55% der Nennscheinleistung, um in weiterer Folge gleichmäßig zurückzugehen. Bei Nennscheinleistung und $\cos(\varphi) = 1$ beträgt der Wirkungsgrad 93,64%. Ein geringerer Leistungsfaktor lässt auch den Wirkungsgrad sinken. Bei $\cos(\varphi) = 0,7$ ist der Wirkungsgrad mit maximal 95,99% nur geringfügig schlechter als bei reinem Wirkleistungsbezug. Ab $\cos(\varphi) = 0,3$ geht der Wirkungsgrad deutlicher zurück. Da die

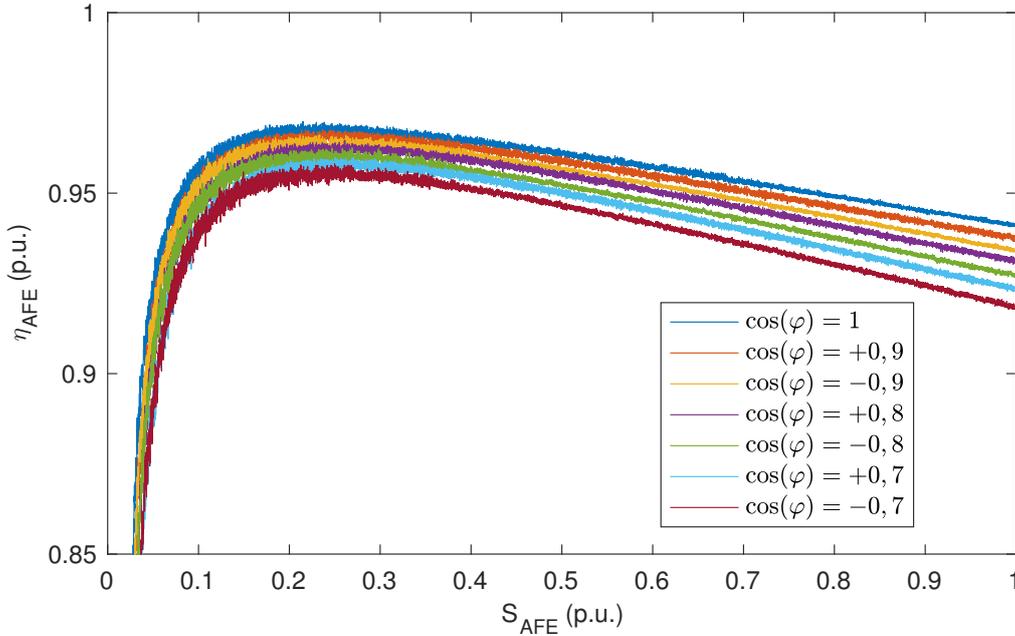


Abbildung 12: Simulationsergebnisse Wirkungsgrad AFE für verschiedene Werte $\cos(\varphi)$ bei steigender Scheinleistung. Quelle: Eigene Darstellung

Simulation der Leistungselektronik in der Simulink-Umgebung eine hohe Abtastrate erfordert, dauert die Ausführung einer Simulation im Sekundenbereich verhältnismäßig lange. Um eine Simulation im Zeitmaßstab eines Jahres zu ermöglichen, werden die ermittelten Wirkungsgrade in einer sogenannten „2D-Lookup table“ hinterlegt, um als linear interpolierte Funktion $f_\eta(P_{AFE}, Q_{AFE})$ zur Verfügung zu stehen. Für langfristige Simulationen wird das Leistungselektronikmodul im Simulink-Modell des Elektrolyseurs durch den Wert $f_\eta(P_{AFE}, Q_{AFE})$ ersetzt. Die interpolierte Wirkungsgradfunktion für auf die jeweilige Nennleistung der Leistungselektronik bezogene Werte von P und Q zeigt die Abbildung 13.

$$i_{cell} = \frac{I_{DC,Stack}}{A_{cell}} = \frac{f_\eta(P_{AFE,soll}, Q_{AFE,soll})}{U_{DC}} \frac{1}{n_{Stacks \text{ pro AFE}}} \quad (69)$$

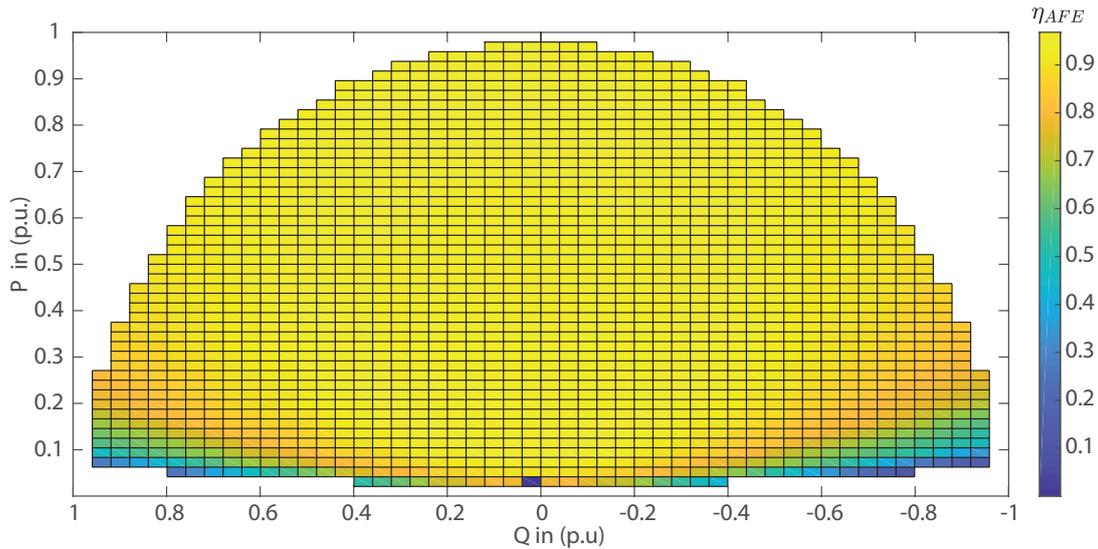


Abbildung 13: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Wirk- und Blindleistung. Quelle: Eigene Darstellung

4.4. Systemwirkungsgrad

Für die Bestimmung des System-Wirkungsgrades wurde der Stack in 250 Zellen mit insgesamt $250\,000\text{ cm}^2$ Zellfläche in einem einzigen Stack aufgeteilt. Das soll einer Nennleistung von 1 MW entsprechen. In der Simulation wurde bei $\cos(\varphi) = 1$ die Leistung rampenförmig von auf 0% 100% der Nennleistung erhöht. Der jeweilige Wasserstoffstrom wurde mit dem Faktor des Heizwertes von Wasserstoff H_{u,H_2} ($33,33\text{ kWh/kg}$) auf die elektrische Eingangsleistung des Systems bezogen. Der dabei ermittelte Wirkungsgrad ist in Abbildung 14 abgebildet. Die dabei ermittelten Werte sind vor allem für den Bereich $P_{PEM,sys}/P_{PEM,sys,nenn} = 100\%$ vergleichsweise gering. Kommerzielle Systeme erreichen dabei Werte im Bereich von 68% und mehr.[45] [32] [28] Die Ursache hierfür liegt vorrangig in einer im Modell verwendeten Stromdichte von $2,1\text{ A/cm}^2$ bei Nennleistung und damit einer relativ kleinen Membranfläche der Geräte. Der Hauptkostenfaktor der PEM-Elektrolyseure ist die Polymer-Membran im Stack der 40-50% der Kosten verursacht.[32] Der Wirkungsgrad im Sinne einer Ausbeute von Wasserstoff ist damit eine Folge von Überlegungen wirtschaftlicher Natur. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Tendenz zu möglichst günstigen Geräten unterstellt und damit geringeren Wirkungsgraden. Außerdem liegt, wie sich zeigen wird, der Nennbetrieb bei Einsatz zur Erbringung von Regelleistung selten vor, somit ist der Teillastwirkungsgrad der relevantere Faktor. Der Betriebsdruck ist ein weiterer Faktor. Die Energie zur Erhöhung des Wasserstoffdruckes stammt direkt aus der elektrischen Energie, die in den Elektrolyseurstack fließt.

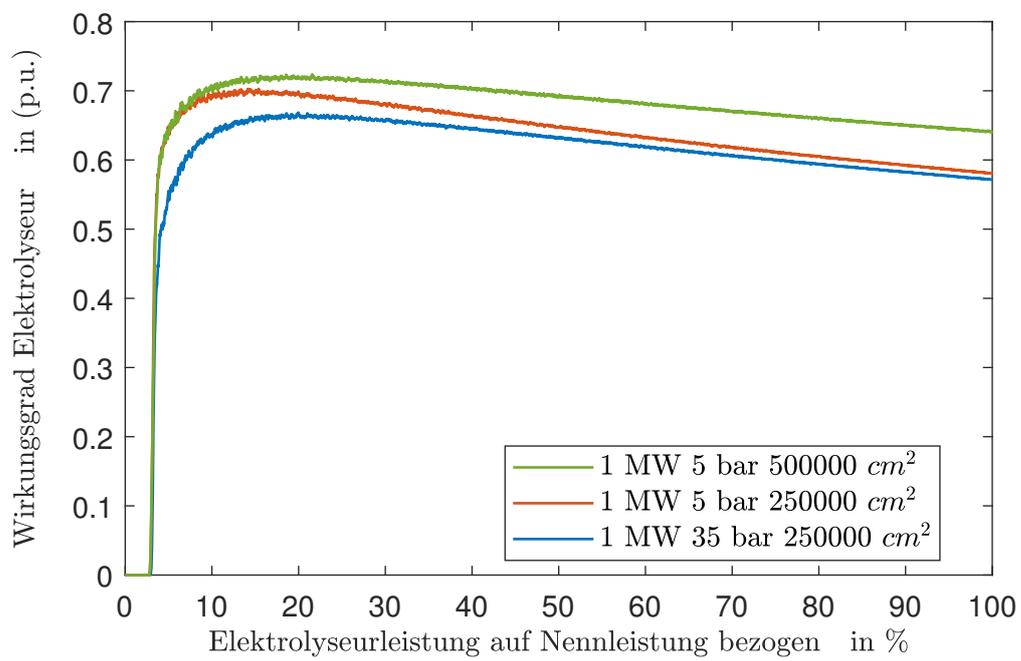


Abbildung 14: Der Gesamtsystemwirkungsgrad von 1 MW Elektrolyseursystemen mit unterschiedlichem Druck und Membranflächen. Quelle: Eigene Darstellung

5. Regelleistung mit Elektrolyseuren

Regelleistungsprodukte werden anhand ihrer frequenzanhebenden oder -senkenden Wirkung jeweils als positive oder negative Regelleistung bezeichnet. Aus der Perspektive der Erzeuger wird positive Regelleistung eingespeist, wenn die Einspeisung durch die elektrischen Generatoren im Rahmen der Frequenzregelung erhöht wird. Bei negativer Regelleistung verringern an der Regelung beteiligte Generatoren die Einspeisung. Aus der Sicht der Verbraucher muss für negative Regelleistung der Bezug der Leistung erhöht werden. Um als Verbraucher positive Regelleistung zu liefern, muss der Verbrauch gesenkt werden. Positive Regelleistung, die durch Verbraucher realisiert wird, setzt einen zugesicherten Verbrauch voraus, der im Fall des Regelleistungsabrufes gesenkt werden kann. Damit ist die jeweilige Verbrauchscharakteristik entscheidend für den möglichen Einsatzbereich.

Als mögliche Verbraucher von Wasserstoff werden der Bereich der Wärmebereitstellung, der Mobilitätsbereich und industrielle Anwender genannt. Im Bereich der Wärmebereitstellung kann über die vorhandene Erdgasinfrastruktur ein Teil des Gasbedarfs direkt durch eine Beimengung von Wasserstoff gedeckt werden, größere Mengen setzen eine Methanisierung des produzierten Wasserstoffes voraus um den in Methan umgewandelten Wasserstoff in das Erdgassystem einzuleiten. Siehe dazu [36].

Als industrieller Rohstoff wird Wasserstoff in großen Mengen z.B bei der Erzeugung von Ammoniak im Haber-Bosch Verfahren verwendet, um (unter anderem) zu Kunstdünger weiterverarbeitet zu werden.[35] Weitere industrielle Verbraucher sind die chemische Industrie zur Erzeugung von Polymeren oder auch die Halbleiter- und Elektronikindustrie.[36]

Der fossil gespeiste Mobilitätssektor mit seinem hohen Anteil an CO_2 Emissionen ist einer der Schlüsselsektoren der Dekarbonisierungsstrategien. Aktuell sind sowohl Erdgas als auch – in geringerem Maße – Wasserstoff als Energieträger in Personen- und Lastkraftwagen erprobt. Im Szenario einer zukünftigen Dekarbonisierung des Mobilitätssektors wird aber auch das batteriegespeiste Elektrofahrzeug für eine weite Palette an Nutzungsarten in Frage kommen.

5.1. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur Primärregelleistung

Um mittels Elektrolyseuren Primärregelleistung aufbringen zu können, muss der Anbieter seine Wirkleistungseinspeisung in das Netz sowohl erhöhen als auch senken können. Die geforderte Mindestleistung für einen Anbieter beträgt ± 1 MW. Für einen Verbraucher, der Primärregelleistung anbietet, bedeutet dies, dass er über die Vertragslaufzeit verbindlich gemäß Fahrplan mindestens 1 MW verbrauchen muss. Ist der Elektrolyseur Teil eines Regelleistungspools, kann die Leistung auch geringer ausfallen. Er muss aber in der Lage sein, die mögliche Leistungssenkung, die als positive Regelleistung wirkt, symmetrisch als eine Erhöhung des Leistungsbezugs anzubieten, die als negative Regelleistung wirkt. Das erstellte Simulink-Modell wird als ein 2,2 MW Elektrolyseur konfiguriert, der im regulären Fahrplanbetrieb 1,2 MW Leistung aufnimmt und bei einem Abruf der maximalen positiven Primärregelleistung den Leistungsbezug auf 0,2 MW absenkt. Der maximale positive Abruf erfolgt automatisch durch eine Netzfrequenz von 49,8 Hz oder tiefer. Bei einer Frequenz von 50,2 Hz oder mehr wird der Elektrolyseur mit einer Wirkleistungsaufnahme von 2,2 MW betrieben. Der Grund das untere Leistungsniveau auf 0,2 MW zu setzen, liegt in der Beschränkung der Mindestleistungsaufnahme der PEM-Elektrolyseure. Einige Hersteller erlauben aus Sicherheitsgründen keinen Betrieb im Bereich von 0-5% der Nennleistung; bei anderen Modellen liegt der Bereich bei 0-10%. Derartig tiefe Lastpunkte werden deshalb ausgeschlossen. Netzfrequenzen zwischen dem Totband und 50,2 Hz bzw. 49,8 Hz führen zu einer der Frequenzabweichung proportionalen Erhöhung oder Senkung der Elektrolyseurleistung.

5.1.1. Inbetriebnahme des Elektrolyseurs

Im folgenden wird das Hochfahren des 2,2 MW Elektrolyseurs aus dem ausgeschalteten Zustand mit dem für die Primärregelleistung vorgesehene Leistung im Arbeitspunkt bei 1,2 MW dargestellt. Dabei fehlen allerdings Phasen, die für das Durchlaufen von Sicherheitschecks notwendig sind. Beispielsweise wird eine Leckageprüfung vorgenommen, die allerdings eine Variation bzw. Verringerung der Leistung notwendig macht und das Hochfahren aus dem Standby vom Cold-Start unterscheidet. (Wobei im Standby das System bereits auf erhöhtem Druckniveau sein kann. siehe dazu auch [19].) Die Startbedingungen sind eine Stacktemperatur, die der Umgebungstemperatur von 20 °C entspricht und ein Ausgangsdruck in Höhe des atmosphärischen Luftdruckes. In den Abbildungen 16 und 17 wird dabei der Einfluss der steigenden Temperatur auf Stackspannung und -ströme deutlich, die im Kontrast zur auf den Sollwert 1,2 MW geregelten Anschlussleistung abfallen bzw. ansteigen. (Abbildung 15) Die Blindleistung wird konstant $Q=0$ geregelt.

Charakteristisch für die PEM-Elektrolyseursysteme sind deren hohe dynamischen Eigenschaften. Durch die hohen Stromdichten werden kleine Flächen und Bauvolumen möglich. Das System verhält sich thermisch agiler als Alkali-Elektrolyseure. Gleichzeitig bedeuten die kleineren Abmessungen eine Verringerung der mechanischen Spannungen durch Temperaturgradienten. Daraus resultieren eine schnelle elektrische Verfügbarkeit, die bereits vorliegt, obwohl das System noch nicht die Betriebstemperatur erreicht hat. Begrenzend

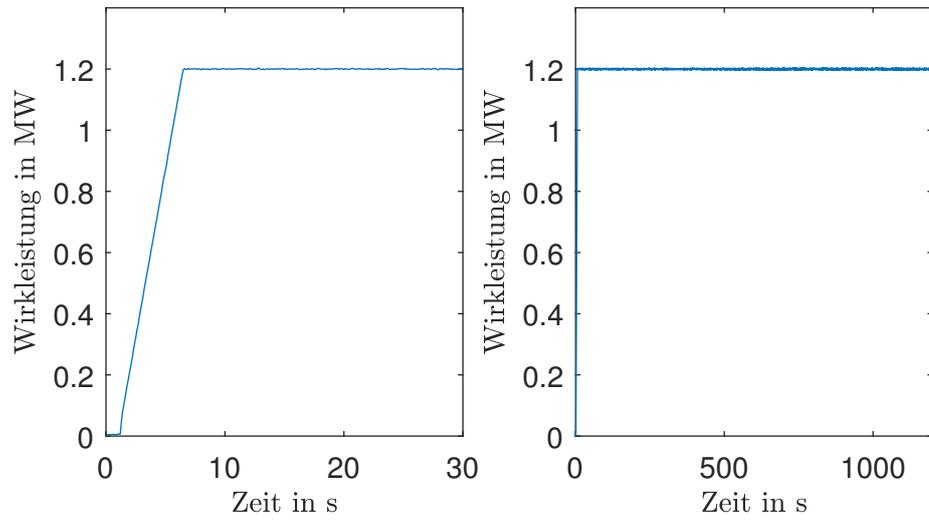


Abbildung 15: Verlauf der Elektrolyseursanschlussleistung beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung

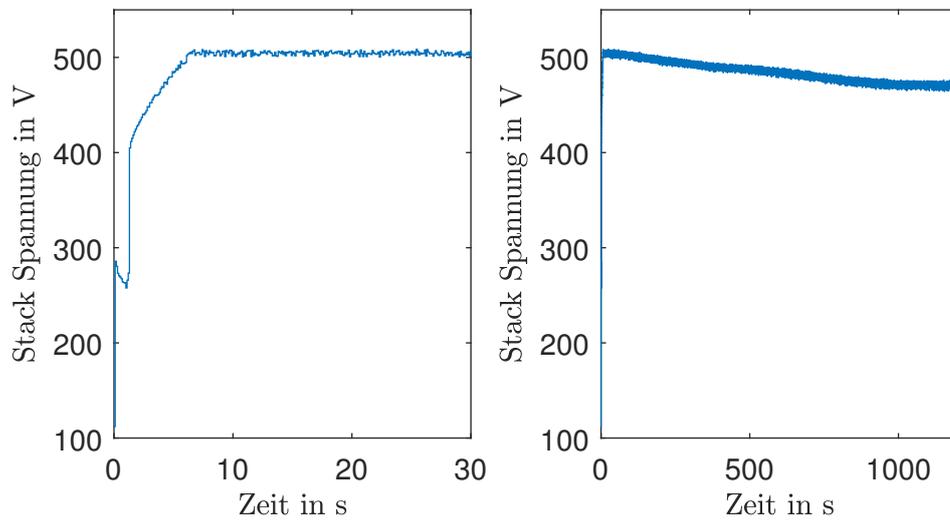


Abbildung 16: Verlauf der Stackspannung beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung

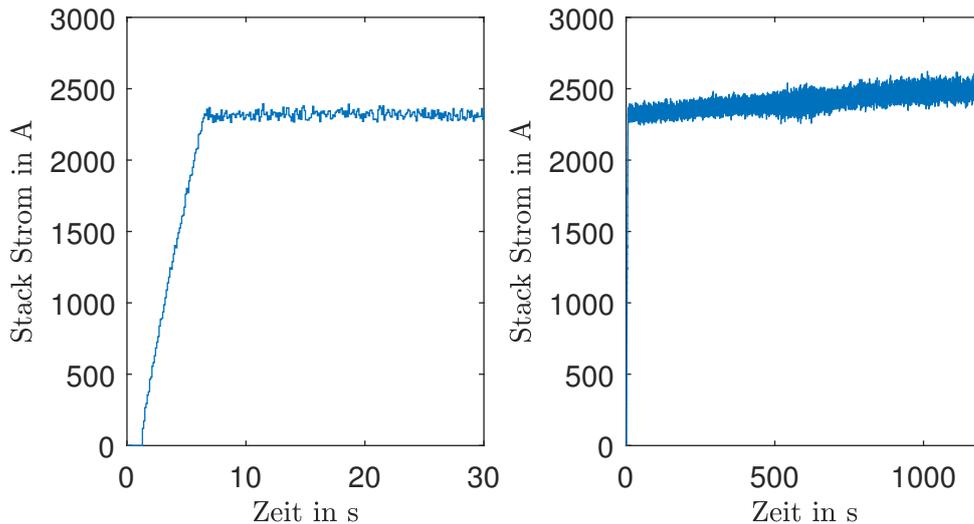


Abbildung 17: Verlauf der Summe der beiden Stackströme beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung

wirkt in dieser Hinsicht die auf den Elektrolyseur folgende Verarbeitungskette, wie z.B Kompressoren oder Anlagen zur Methanisierung, sowie die Anforderungen bezüglich der Gasqualität.

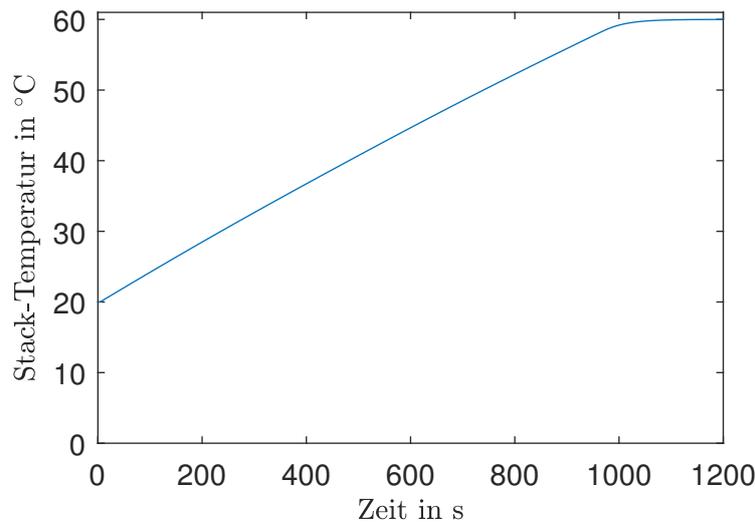


Abbildung 18: Verlauf der Temperatur im Elektrolyseursystem beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 20 wird dabei auch der Einfluss der steigenden Temperatur auf die Verringerung der Überspannung durch eine höhere Kinetik der Ladungsträger im Elektrolyten der Membran des PEM-Systems deutlich. Sobald das Soll-Druckniveau von 20 bar erreicht wird und der Regler das entsprechende Ventil öffnet, strömt die produzierte Menge an Wasserstoff aus dem System; ungefähr $3,2 \text{ mol s}^{-1}$ ab 500 Sekunden in der Simulationszeit. Die Menge nimmt dabei stetig zu, obwohl die aufgenommene Leistung konstant bleibt, der Umwandlungswirkungsgrad steigt. Sobald sich das System seiner Solltemperatur von 60°C nähert, steigt der Energiebedarf für die Kühlung. Ab etwa Sekunde 900

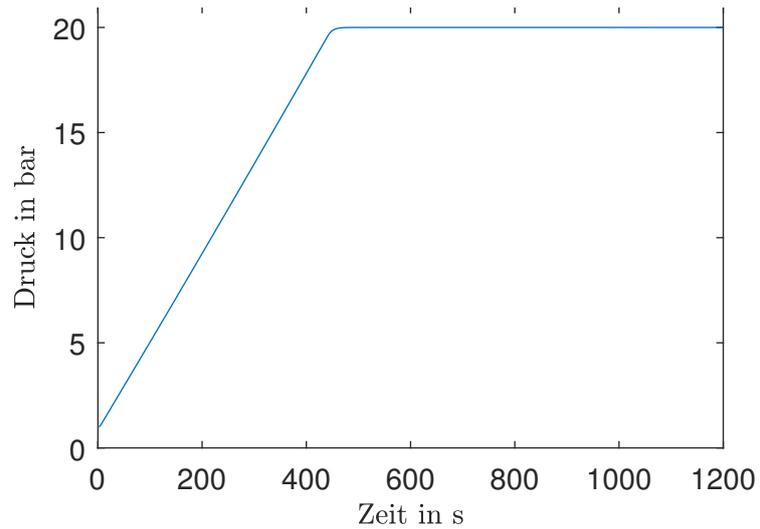


Abbildung 19: Verlauf des Druckes Kathodenseitig beim Hochfahren zum FCR-Betrieb.
Quelle: Eigene Darstellung

wird ein Teil der aufgenommenen 1,2 MW Anschlussleistung für das Kühlsystem benötigt. Dadurch nimmt die produzierte Menge Wasserstoff wieder ab.

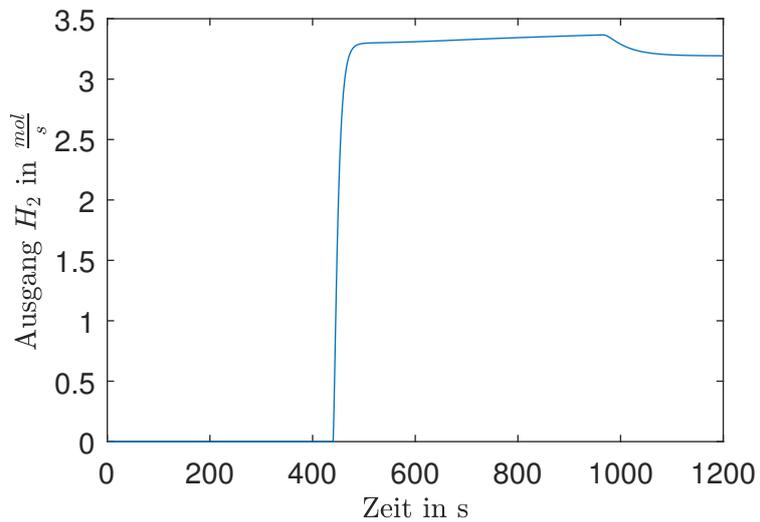


Abbildung 20: Verlauf des Wasserstoffausstosses nach der kathodenseitigen Druckregelung. Quelle: Eigene Darstellung

5.1.2. Einsatz des Elektrolyseurs zur Primärregelleistung für Daten des Jahres 2017

In Abbildung 21 ist der Verlauf der Primärregelleistung in der Regelzone APG für das Jahr 2017 dargestellt. Da der Regelleistung die Aufgabe der Stabilisierung der Netzfrequenz um den Wert von 50 Hz zukommt, ist dabei über einen längeren Zeitraum ein Mittelwert von ungefähr Null zu erwarten. Für das Jahr 2017 betrug der Mittelwert der saldier-ten Primärregelleistung $-0,4035$ MW. Dies bedeutet, dass der realisierte Leistungsbezug als Mittelwert um den gesetzten Arbeitspunkt zu liegen kommt. Für den Elektrolyseur entspricht dies auch dem Nennausstoß an Wasserstoff der im Mittel erzeugt und danach verbraucht, gespeichert oder abtransportiert werden muss. Die Variation der Leistung hat eine Veränderung des Gasausstosses auf der Kathodenseite zur Folge. Stellt die Weiterver-arbeitung eine ideale Senke dar, also Geräte die der Variabilität des Gasausstosses folgen können, kann eine einfache Druckregelung auf der Kathodenseite vorgesehen werden, die den Gasdruck über Erhöhung und Senkung des Gasstromes konstant hält.

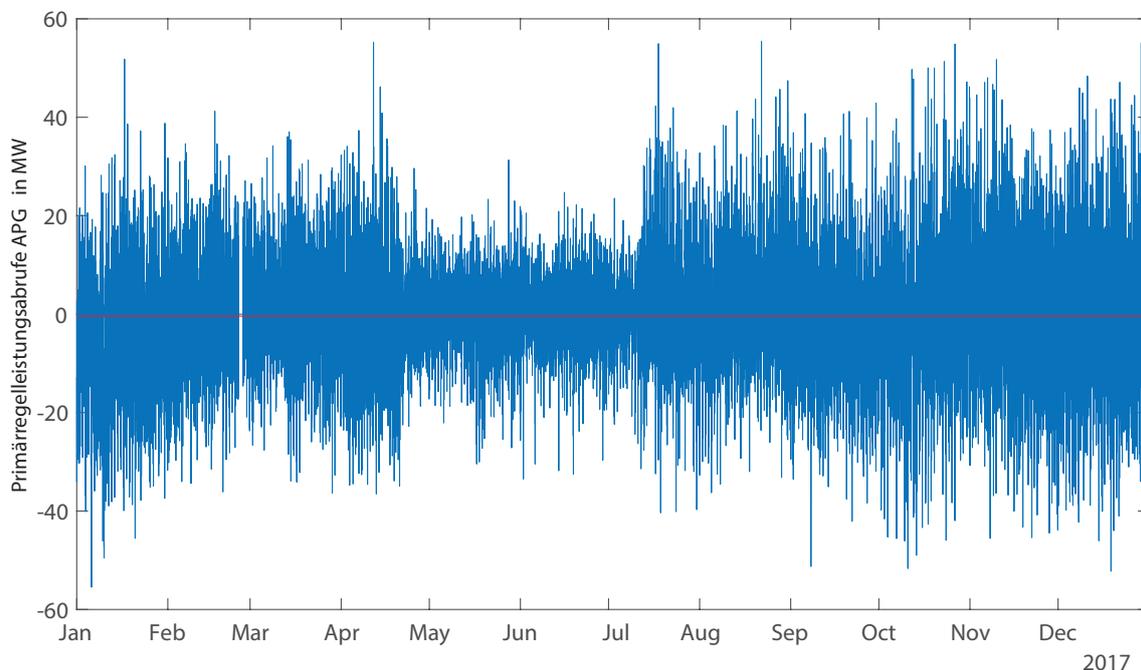


Abbildung 21: Abrufe der Primärregelleistung in Österreich bzw. der Regelzone APG 2017. Quelle: Eigene Darstellung nach Daten der APG

Alternativ muss, um einen möglichst stationären Betrieb der auf die Elektrolyse folgenden Prozesse zu ermöglichen, ein Pufferspeichervolumen für den Wasserstoff vorgesehen werden. Dabei wird der Abfluss des Gases konstant auf das Niveau der Erzeugung bei 1,2 MW geregelt. Liegt die Momentanleistung des Elektrolyseurs bedingt durch Primärregelleistungsabrufe darüber steigt der Druck, unterhalb sinkt der Wasserstoffdruck. Der Minimaldruck sollte den Mindestanforderungen der nachfolgenden Verarbeitungskette entsprechen, z.B. der Ansaugdruck der ersten Stufe eines nachfolgenden Gasverdichters.

In Abbildung 22 ist das Ergebnis der Wasserstoffproduktion über das Jahr 2017 dargestellt. Dabei wurden im Simulink-Modell nur die interpolierten Wirkungsgrade der AFE-

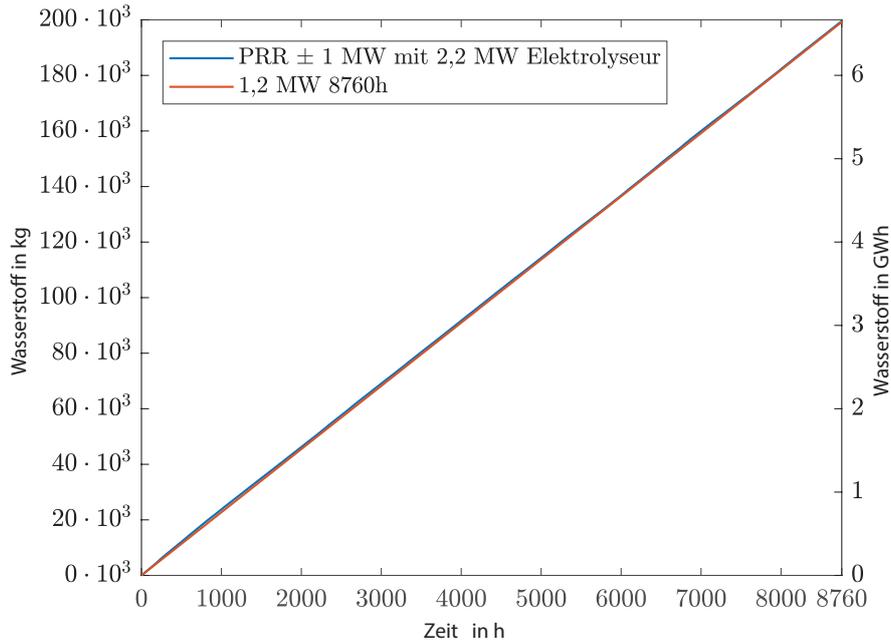


Abbildung 22: Wasserstoffherzeugung mit Primärregelbeteiligung ± 1 MW 2,2 MW PEM-Elektrolyseur. Quelle: Eigene Darstellung

Leistungselektronik verwendet, die Leistungselektronik wurde bei diesem Zeitmaßstab nicht simuliert. Das Endergebnis mit $200 \cdot 10^3$ kg und die Linearität stimmen mit dem zum Vergleich dargestellten Verlauf für über das Jahr konstant bezogene 1,2 MW stark überein. Die Produktion verläuft über den Gesamtzeitraum gesehen sehr gleichmäßig. Auffallend ist die im Vergleich zu in Abbildung 44 höhere relative Ausbeute an Wasserstoff pro eingesetzter elektrischer Energieeinheit. Der Gesamtwirkungsgrad stieg dabei von 0,58 auf 0,64. Der Grund dafür ist der bessere Teillastwirkungsgrad der Leistungselektronik und vor allem des Elektrolyseurs. Vergleiche dazu auch [48].

Das Modell des Elektrolyseurs besteht aus 2 Stacks zu je 1,1 MW in 250 Zellen und 500 V Nenn-Stackspannung und der Fläche einer Zelle von 1100 cm^2 . Versorgt wird jeder Stack von einem AFE mit dem 1,5-fachen der Stackleistung als Nennleistung der Leistungselektronik, um sowohl Wirk- als auch Blindleistung in Höhe der Stack-Nennleistung gleichzeitig erbringen zu können.

Die Regelung der Wirkleistung erfolgt wie unter 4.3 beschrieben über einen PI-Regler, der die gemessene Leistung des Gesamtsystems $P_{PEM, Sys, ist}$ auf den der Netzfrequenz proportionalen Sollwert ausregelt.

Für den Gasdruck wird eine Regelung auf einen konstanten Druck von 20 bar eingesetzt. D.h der Ausstoß des Gases erfolgt in eine ideale Senke.

5.2. Primärregelung mit PEM-Elektrolyseuren nach den Regeln für speicherbegrenzte Systeme

Die Produkte zur Primärregelung, die von den Regelzonenführern ausgeschrieben werden, sehen grundsätzlich eine Lieferung der Primärregelung für die Dauer des Bestehens der die Leistungsanforderung verursachenden Frequenzabweichung vor. Dies kann im Extremfall eine Leistungsanforderung der angebotenen Regelleistung über die gesamte Vertragslaufzeit des Regelleistungsproduktes bedeuten. Für die traditionellen Anbieter von Regelleistung stellt dies keine tatsächliche Einschränkung dar. Alternative Technologien wie z.B Batteriespeichersysteme, Schwungräder oder auch diverse Verbrauchsanlagen stoßen dabei allerdings schnell an Grenzen in ihrer Speicherkapazität.

Die PEM Elektrolyse ist grundsätzlich in ihrem Betrieb nicht in ihrem Arbeitsvermögen eingeschränkt, solange die Produkte, also vorrangig der Wasserstoff, in vollem Umfang weiterverarbeitet oder abtransportiert werden können. Die Eigenschaft, einen PEM Elektrolyseur kurzfristig über der jeweiligen Nennleistung zu betreiben und diesen Überlastbetrieb als Regelleistung anzubieten, stellt allerdings eine Einschränkung dar, wie sie auch bei den erwähnten alternativen neuen Anbietern anzutreffen ist.

Um den Einsatz dieser Technologien zu ermöglichen, wurden in der jüngeren Vergangenheit Regelungen getroffen, die eine Mindestspeicherkapazität für solche Systeme implizieren. In den letzten Jahren wurde der dafür maßgebliche „Network Code on Load-Frequency Control and Reserve“ auf europäischer Ebene ausgearbeitet. Die über mehrere Jahre in der europäischen Kommission verfasste Regelung fand im Bereich der speicherbegrenzten Primärregelungssysteme bereits in der Entwurfsphase in den Präqualifikationsbedingungen der Übertragungsnetzbetreiber ihre Berücksichtigung. Zentral ist dabei die Unterscheidung zwischen „normal state“ „alert state“ und „emergency state“ im Betrieb des europäischen Verbundnetzes. Für die Kenngröße der Netzfrequenz gilt dabei:

- normal state:
 - Wenn sich die Netzfrequenz im Bereich 49,95 bis 50,05 Hz bewegt
- alert state:
 - Wenn sich die Netzfrequenz über 15 Minuten fortwährend im Bereich $50,05 \text{ Hz} \leq f_{\text{Netz}} \leq 50,1 \text{ Hz}$ bzw. $49,9 \text{ Hz} \leq f_{\text{Netz}} \leq 49,95 \text{ Hz}$ oder
 - wenn sich die Netzfrequenz über 5 Minuten fortwährend im Bereich $50,1 \text{ Hz} < f_{\text{Netz}} \leq 50,2 \text{ Hz}$ bzw. $49,8 \text{ Hz} \leq f_{\text{Netz}} < 49,9 \text{ Hz}$ bewegt

Im normal state muss die Regelleistung fortwährend erbracht werden können. Erreicht die Netzfrequenz den alert state, muss sichergestellt sein, dass die Regelleistung weiterhin für mindestens 30 Minuten die Regelleistung zu einer Netzfrequenzabweichung von 200 mHz liefern kann; bei einer geringeren Abweichung von weniger als 200 mHz entsprechend

länger.

Mit 02.08.2017 trat die Verordnung 2017/1485 „zur Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb“ der Kommission der europäischen Union in Kraft.[27] Diese übernimmt unter anderem im Artikel 156 die in der Entwurfsphase getroffenen Regeln betreffend der speicherbegrenzten Primärregelungsanbieter; allerdings mit einer Abweichung: Die Festlegung auf 30 Minuten an Mindestlieferzeit im alert state wurde für den Fall, dass der jeweils zuständige Übertragungsnetzbetreiber keine entsprechende Mindestanforderung festgelegt hat, auf einen Zeitbereich von mindestens 15 Minuten herabgesetzt. Gleichzeitig verpflichtet die Verordnung die Übertragungsnetzbetreiber im Artikel 156 Absatz 10 und Absatz 11 6 Monate nach Inkrafttreten der Verordnung jeweils Vorschläge zur Festlegung einer Mindestanforderungszeit zur Erbringung der Primärregelung einzubringen, die nicht kleiner als 15 und nicht größer als 30 Minuten sein darf. Die Verordnung sieht weiters eine Evaluierung der Vorschläge nach definierten Kriterien vor, die nach Abschluss des Bewertungsverfahrens zu einer Mindestzeit im Bereich 15 bis 30 Minuten kommen soll.

Zu diesem Zeitpunkt steht der Ausgang des Verfahrens noch nicht fest, es muss demnach in Zukunft mit Mindestanforderungszeiten von 15 bis 30 Minuten gerechnet werden. Bis zur Festlegung gelten die bislang gültigen Vorgaben. Die Präqualifikationsunterlagen zur Primärregelung der APG in der Version vom 09.10.2015 spezifizieren dabei lediglich für die Batterietechnologie in standalone und pool-betrieb eine Mindestzeit von 30 Minuten. Alternative Technologien werden dabei außen vor gelassen.⁷ Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber unterscheiden bei den Vorgaben zwischen dem Einsatz zur Primärregelung, der ausschließlich mit Batterien erfolgt, und dem Einsatz in einem Pool gemeinsam mit technischen Einheiten, die keinen Einschränkungen bezüglich Arbeitsvermögen unterliegen. Bei einem Einsatz im Pool wird weiters zwischen einer Leistungserhöhung und einer Flexibilitätserhöhung des Pools durch den Einsatz der Batterien unterschieden. Lediglich im letzten Fall, der Flexibilitätserhöhung, gilt die geringere Anforderung von 15 Minuten, sonst gelten jene 30 Minuten. Für die Zeit nach dem Abruf im Fall des alert state fordert Artikel 156 Absatz 13b eine Wiederherstellung des Energiespeichers nach spätestens 2 Stunden, aber grundsätzlich immer so schnell wie möglich.

Überlastbetrieb von PEM-Elektrolyseuren Die für die Elektrolyseure jeweils spezifizierte Nennleistung stellt den vom Hersteller festgelegten Betriebspunkt dar, der prinzipiell ohne Unterbrechung dauerhaft aufrechterhalten werden kann. Dabei ist allerdings auch ein kurzfristiger Betrieb oberhalb dieser Nennleistung möglich. Der Hersteller Siemens gibt beispielsweise für seinen Elektrolyseur der Silyzer 200 Reihe einen 60% Überlastbetrieb über der Nennleistung ohne relevante Alterungserscheinung an.[42] Für das gleiche Gerät wird unter [28] eine Spitzenleistungsfähigkeit von 6 MW bei einer Nennleistung von 4 MW angegeben, die 15 Minuten lang abgerufen werden kann. Das bedeutet, dass der Betriebspunkt auf der Polarisationskennlinie (Abbildung 6) nach rechts oben verlagert wird. Stromdichte und Polarisationsüberspannung steigen. Die erhöhte Zellspannung erhöht die Jouleverluste in der Zelle und senkt dabei den Umwandlungswirkungsgrad in Wasserstoff.

⁷Eine Rückfrage ergab allerdings die Gültigkeit dieser Regeln auch für andere Technologien

Ist das Kühlsystem auf die Wärmeabfuhr im Nennbetrieb beschränkt, erhöht sich die Temperatur im Elektrolyseur. Die Betriebstemperatur für PEM-Elektrolyseure bewegt sich im Bereich von 60 bis 90 °C.[19] Die tatsächliche Nenn-Betriebstemperatur ist das Ergebnis von Optimierungsbemühungen der Hersteller für den jeweiligen Anwendungszweck. Die Nennbetriebstemperatur der für die Energiewirtschaft eingesetzten Geräte der M Serie des Herstellers ProtonOnSite beträgt beispielsweise 58 °C. Die Obergrenze bildet die temperaturabhängige mechanische Stabilität der verwendeten Polymermembran. Das häufig eingesetzte Material Nafion© des Herstellers Dupont dehydriert bei Temperaturen ab 90 °C und verliert dadurch mechanische Stabilität. Im Rahmen des implementierten Modells wurde die Kühlung dahingehend dimensioniert, die entstehende Wärme bei Nennleistung abzuführen. Diese Nennkühlleistung stellt eine Obergrenze von 1,1 W/cm² dar. Die Nennleistung wurde bei einer Zellstromdichte von 2,1 A/cm², einem Kathodendruck von 20 bar und einer Stacktemperatur von 60 °C festgelegt.

Für den Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur Primärregelung bedeutet dies, dass der Bereich der negativen Regelleistung in den Überlastbereich verschoben werden kann. Die positive Regelleistung, im Fall des Elektrolyseurs die Verminderung der elektrischen Leistungsaufnahme, unterliegt dabei keiner zeitlichen Einschränkung solange der jeweilige Sicherheitsbereich an Minimalleistung eingehalten wird und ein Unterschreiten der Zellspannung unter die Thermoneutralspannung keinen Wärmeentzug aus dem Stack verursacht und im ungünstigsten Fall ein Einfrieren der Zelle zur Folge hat.

Die Überlastfähigkeit kann auf zweierlei Arten genutzt werden: Eine Erhöhung des Arbeitspunktes beim Einsatz als Primärregelleistungsanbieter und damit eine Erhöhung der durchschnittlichen Wasserstoffproduktion oder eine Verringerung der notwendigen Geräteleistung und damit an Gerätekapitalkosten bei gleichbleibenden Primärregelleistungsangebot.

Bestimmung eines höheren Arbeitspunktes Ausgehend vom unter Kapitel 5.1 spezifizierten 2,2 MW Elektrolyseurmodell mit einem Regelleistungsband von ± 1 MW um den Arbeitspunkt 1,2 MW, wird nach den Vorgaben der Verordnung 2017/1485 die mögliche Erhöhung des Arbeitspunktes bestimmt. Dabei wird der ungünstigste Vorlauf angenommen, der im normal state an der Grenze zum alert state vorliegen kann, bevor der alert state vorliegt. Der Ausgangspunkt für den Verlauf der Netzfrequenz bildet die langfristige Obergrenze des normal state, 50,05 Hz. Fünfzehn Minuten nach Simulationsbeginn wird die Netzfrequenz für 10 Minuten auf 50,1 Hz erhöht und im Anschluss weiter auf 50,2 Hz erhöht. Mit Ablauf dieser letzten 5 Minuten liegt der alert state vor. Die Netzfrequenz verbleibt auf 50,2 Hz. Der Arbeitspunkt des Elektrolyseurs muss dabei so festgelegt werden, dass mit Ablauf der definierten Mindestanforderungszeit für speicherbegrenzte Anbieter die Stacktemperatur höchstens 90 °C erreicht. Der reguläre Arbeitspunkt des Elektrolyseurmodelles beträgt 60 °C. Da die Mindestanforderungszeit in Zukunft im Bereich von 15 bis 30 Minuten liegen kann, wird der jeweilige maximale Arbeitspunkt für 15, 20, 25 und 30 Minuten bestimmt. Exemplarisch ist der Zeitverlauf für die Forderung nach 15 und nach 30 Minuten an maximaler negativer Primärregelleistung in den Abbildungen 23 und 24 dargestellt.

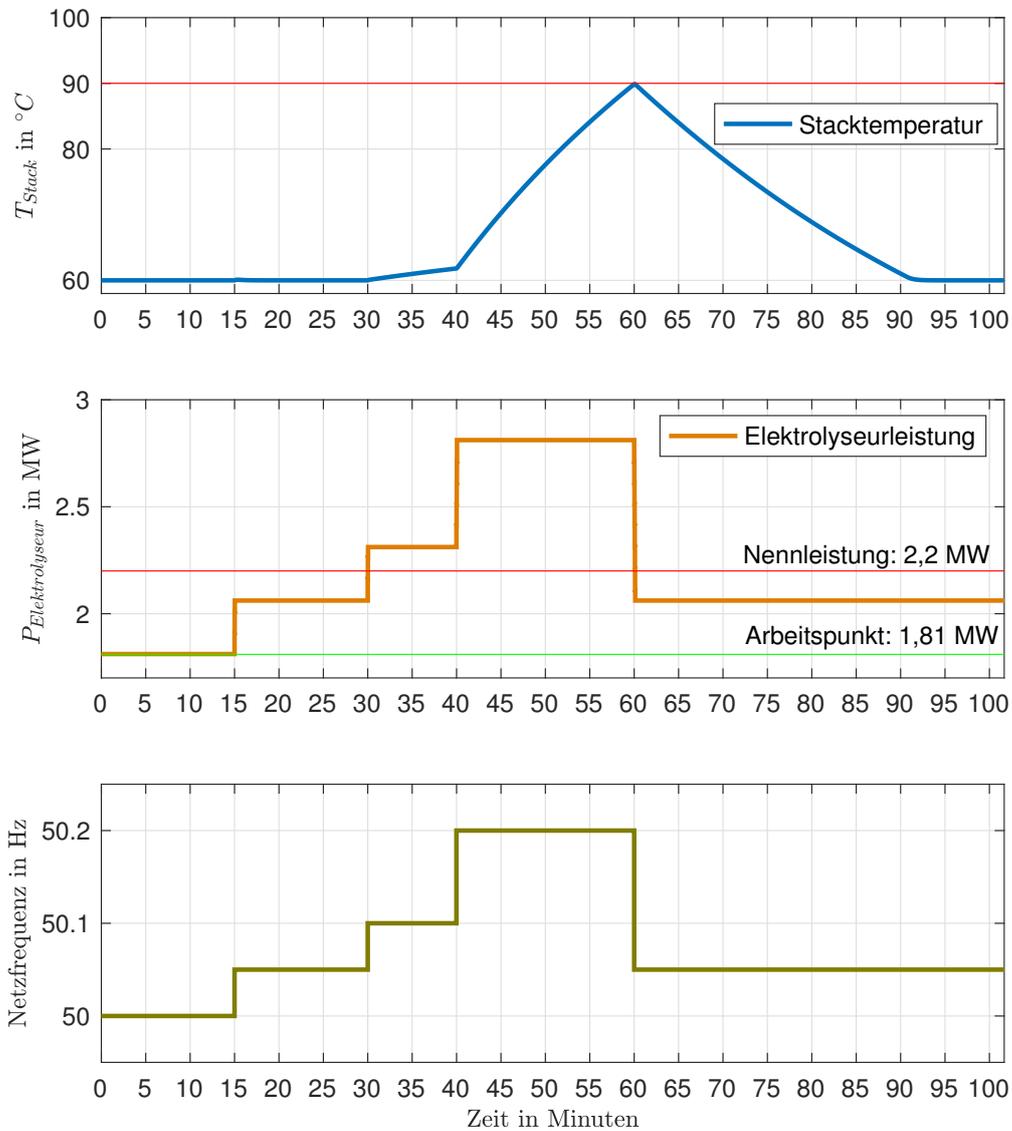


Abbildung 23: Verlauf der Stacktemperatur, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz zur Bestimmung des maximalen 15-Minuten Arbeitspunktmaximums des 2,2 MW Elektrolyseurs Quelle: Eigene Darstellung

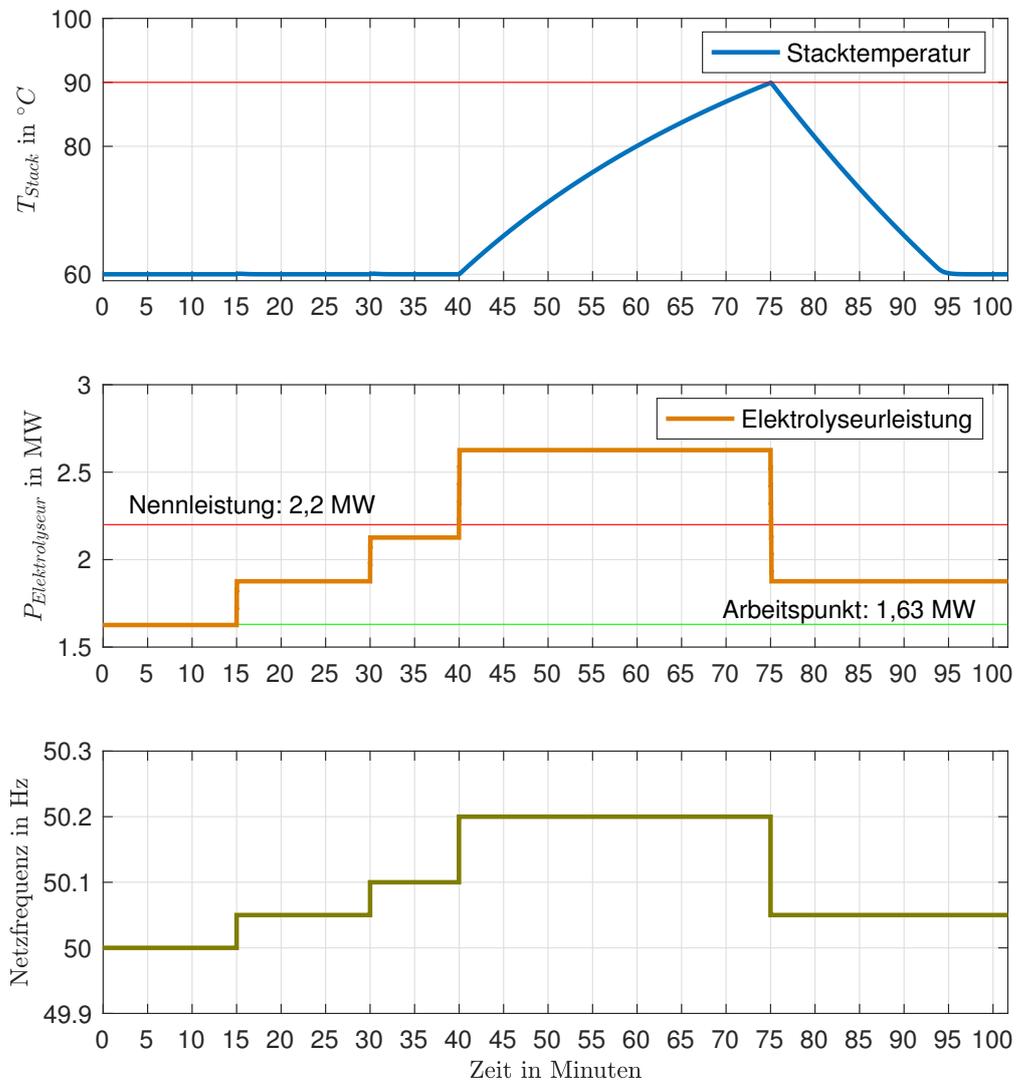


Abbildung 24: Verlauf der Stacktemperatur, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz zur Bestimmung des maximalen 30-Minuten Arbeitspunktmaximums des 2,2 MW Elektrolyseurs Quelle: Eigene Darstellung

Für den Fall mit geringerer Anforderung, der Forderung nach nur 15 Minuten Maximalleistung, kann der Arbeitspunkt von 1,2 MW auf 1,81 MW erhöht werden. Im anspruchsvolleren Fall dagegen nur um 35% auf 1,63 MW. Die möglichen Zwischenwerte sind in der Abbildung 25 ersichtlich. Die Zeit, bis die Stacktemperatur wieder 60 °C erreicht, beträgt 32 Minuten und 40 Sekunden im höchsten bzw. 18 Minuten und 43 Sekunden im niedrigsten Arbeitspunkt. Dabei wurde angenommen, dass im Anschluss der Erfüllung der 15- bzw. 30-minütigen Erbringung der Maximalleistung, die Netzfrequenz gerade noch im Normalbereich $f_{Netz} < 50,05$ Hz verbleibt. Bei einer Netzfrequenz von $f_{Netz} = 50,0$ Hz genügen 18 Minuten und 40 Sekunden bzw. 13 Minuten und 58 Sekunden. Damit wird die Forderung das Arbeitsvermögen, nach spätestens 2 Stunden wieder vollständig herzustellen, deutlich unterschritten.

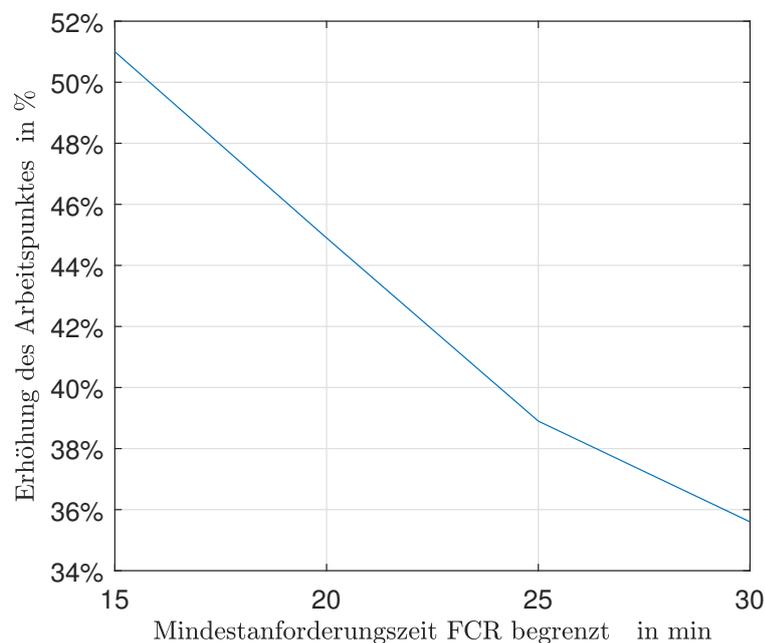


Abbildung 25: Mögliche Erhöhung des Arbeitspunktes in Abhängigkeit der geforderten Mindestzeit speicherbegrenzter Primärregelung Quelle: Eigene Darstellung

In der Abbildung 26 ist der Simulationsverlauf eines Doppelhöckertestes, wie er in den Präqualifikationsverfahren der Übertragungsnetzbetreiber gefordert wird, dargestellt. Darin werden zwei Vollabrufe bei 50,2 Hz über 15 Minuten mit einer 15-minütigen Pause bei 50,0 Hz simuliert. Im Unterschied zum Auslegungsfall im alert state liegt das dabei erreichte Maximum bei 83,15 °C, das auch im Fall des Folgehöckers nicht überschritten wird. Für das Gerät, das nach dem Fall der höheren Anforderung nach 30 Minuten Mindestbringungszeit ausgelegt ist, ergeben sich im Doppelhöckertest, wie zu erwarten war, noch geringere Temperaturen – siehe hierfür die ersten 45 Minuten der Abbildung 28.

Verringerung der notwendigen Nennleistung Wiederholt man das im letzten Punkt durchgeführte Verfahren allerdings mit der Zielsetzung, die notwendigen Nennleistung des Elektrolyseurs ausgehend von 2,2 MW zu reduzieren, dabei aber weiterhin ± 1 MW Pri-

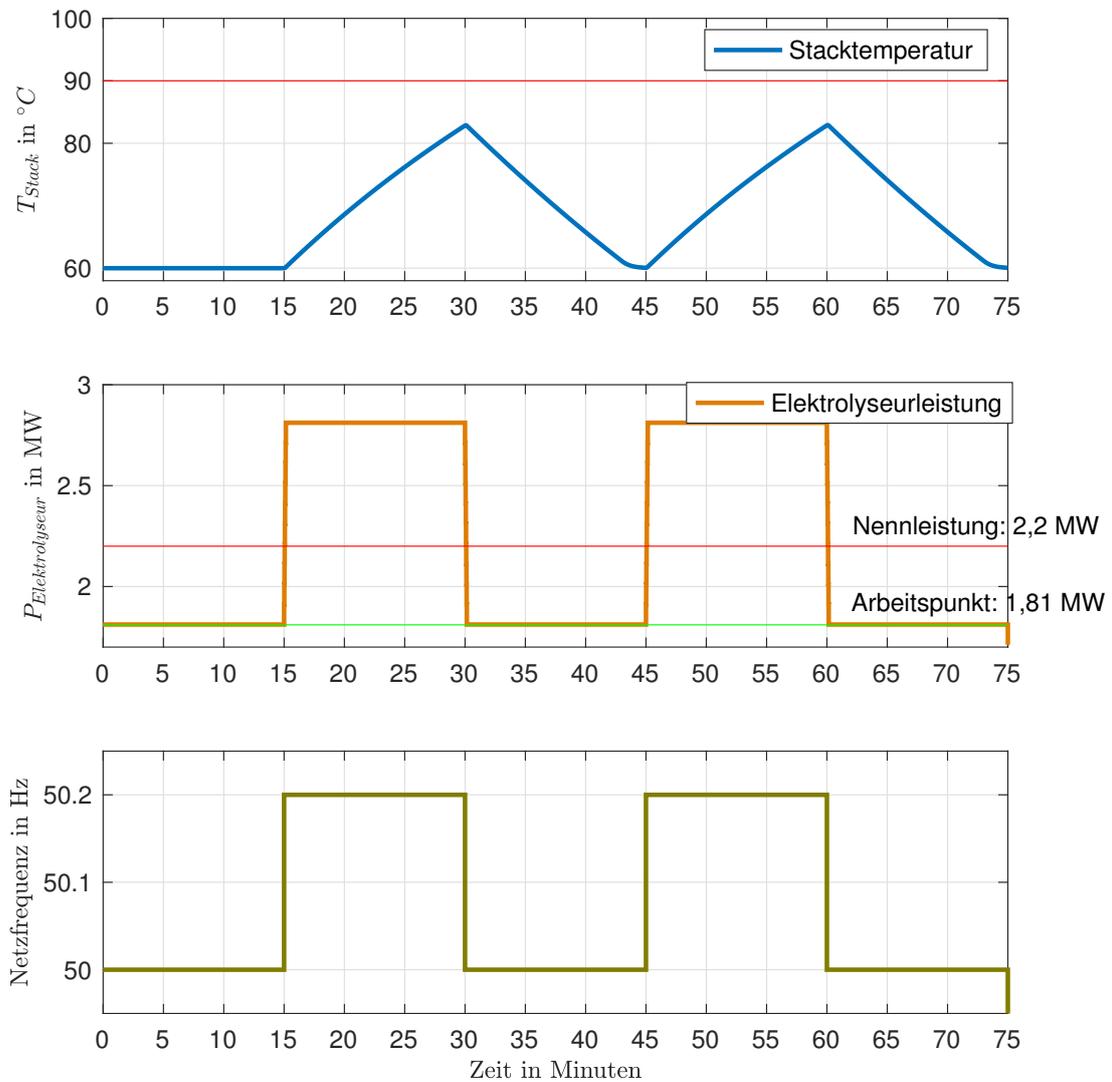


Abbildung 26: Verlauf der Stacktemperatur, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz beim Doppelhöckertest des 2,2 MW Elektrolyseurs (Arbeitspunkt 1,81 MW, 15-Minutenkonfiguration) Quelle: Eigene Darstellung

märregelleistung anzubieten, erhält man im Fall der Forderung einer 15-minütigen Leistungserbringung eine Elektrolyseurmindestgröße von 1,85 MW. Am anderen Ende des Spektrums, bei 30 Minuten Mindestleistungsdauer, sind dagegen 1,95 MW notwendig. Die Abbildung 27 zeigt je nach zukünftiger Regulierung das mögliche Reduktionspotential.

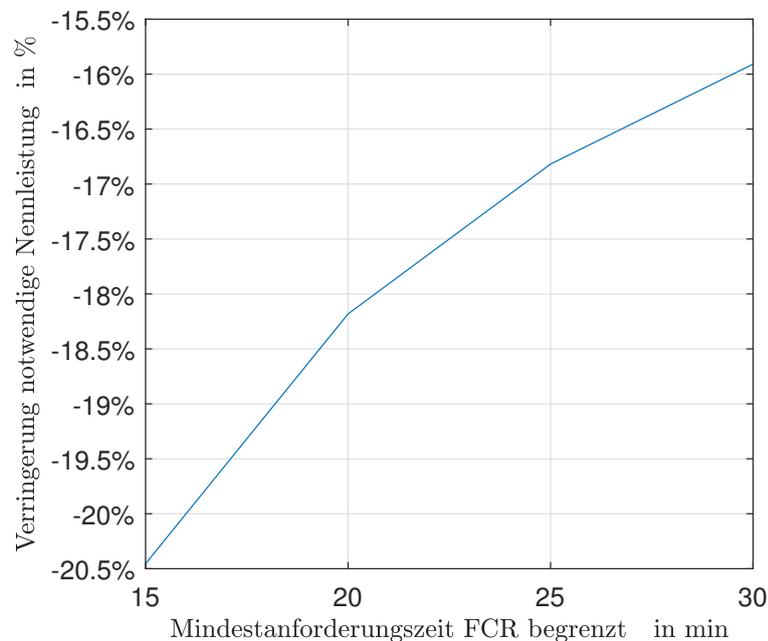


Abbildung 27: Mögliche Verkleinerung der Elektrolyseurnennleistung in Abhängigkeit der geforderten Mindestzeit speicherbegrenzter Primärregelung Quelle: Eigene Darstellung

In der Tabelle 4 sind die Veränderungen in der Jahreswasserstoffproduktion mit den verschiedenen Varianten zur Erbringungen der gleichen Primärregelleistung von ± 1 MW dargestellt. Im Vergleich zur Vergleichsproduktion mit einem 2,2 MW Elektrolyseur lässt der um 20,45% kleinere Elektrolyseur die Jahresproduktion nur um 5,32% geringer ausfallen, der für die 30 Minuten Anforderung dimensionierte 1,85 MW Elektrolyseur nur um 4,49%. Wird dagegen die Jahresproduktion des 2,2 MW Elektrolyseurs durch Überlastbetrieb gesteigert, erhöht sich der Jahresausstoß an Wasserstoff je nach Regulierungsvorgaben um 41,19% bzw. 28,9%.

Tabelle 3: Vergleich der 4 Gerätekonfigurationen zur Erbringung 1 MW FCR 2017 mit Überlastausnutzung

Maximale Peakzeit	Vergleichsbasis	Geräteverkleinerung		Produktionserhöhung	
	∞	15 min	30 min	15 min	30 min
Nennleistung in MW	2,2	1,75	1,85	2,2	2,2
Arbeitspunkt (AP) in MW	1,2	1,175	1,185	1,81	1,63
Peakleistung bei neg. PRL	2,2	2,175	2,185	2,81	2,63
Minimalleistung bei pos. PRL	0,2	0,175	0,185	0,81	0,63

Tabelle 4: Vergleich Jahresproduktion 1 MW FCR 2017 mit Überlastausnutzung

	Basis: 2,2 MW FCR AP 1,2 MW	1,75 MW (15 min)	1,95 MW (30 min)	2,2 MW (15 min)	2,2 MW (30 min)
Jahresproduktion in kg	$201,78 \cdot 10^6$	$191,0 \cdot 10^6$	$192,72 \cdot 10^6$	$284,89 \cdot 10^6$	$259,89 \cdot 10^6$
Veränderung in %	0	-5,32	-4,49	+41,19	+28,90

In [49] werden für den Einsatz von Batteriesystemen zur Primärregelung Mindestanforderungen für die Batteriekapazität definiert, die der Einhaltung des 30 Minuten-Kriteriums entsprechen. Weiters muss das Verhältnis Speicherkapazität zur präqualifizierten Primärregelleistung größer eins sein, $Q_{Batterie}/P_{FCR,PQ} > 1$. Dabei werden auch zwei verschiedene Verfahren vorgeschlagen, um die Speicherkapazität nachzuweisen. Diese lassen sich auch auf Elektrolyseure im Überlastbetrieb übertragen, allerdings besitzt dabei nur eines eine Aussagekraft. Im ersten Verfahren wird eine Serie an 15-minütigen Vollabrufen, die von 15-minütigen Pausen unterbrochen werden, solange fortgesetzt, bis der Speicher vollständig entleert bzw. bei negativen Primärregelleistungsabrufen vollständig gefüllt ist. Die Abrufcharakteristik entspricht also einer Fortsetzung des Doppelhöckertestes aus Abbildung 26. Dabei wird klar, dass dieses Verfahren ein Verhältnis einer unendlichen Speicherkapazität zur präqualifizierten Leistung bedeuten würde und damit keine Aussagekraft besitzt.

Das zweite Verfahren dagegen lässt auf den Doppelhöckertest nach einer 15 minütigen Pause einen Vollabruf ohne zeitliche Begrenzung folgen, der beendet wird, wenn der Speicher erschöpft ist. Die vollständige Summe der abgerufenen Energie dieses Testes entspricht der Speicherkapazität. Für einen Elektrolyseur mit Überlastbetrieb stellt die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Stacktemperatur die Grenze der Energieaufnahmekapazität dar. Das Ergebnis eines solchen Tests für den 2,2 MW Elektrolyseur mit für die 30 Minuten Anforderung erhöhten Arbeitspunkt bei 1,63 MW ist der Verlauf der entsprechenden Testsimulation in Abbildung (28) dargestellt.

Der Stack erreicht 2106 Sekunden nach Beginn des dritten Abrufes die Temperaturgrenze von 90°C. Insgesamt werden dabei 1,084 MWh an elektrischer Energie bei einer Folge von positiven 1 MW Primärleistungsabrufen aufgenommen. Der Fall des negativen Abrufes wird als zeitlich nicht eingeschränkt angenommen, damit stellt die Grenze des positiven Abrufes die Kapazitätsgrenze insgesamt dar. Geräte, die also nach dem 30-min Anforderungsprofil ausgelegt werden, erfüllen also bereits die aktuell gültigen Anforderungen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber in [49].

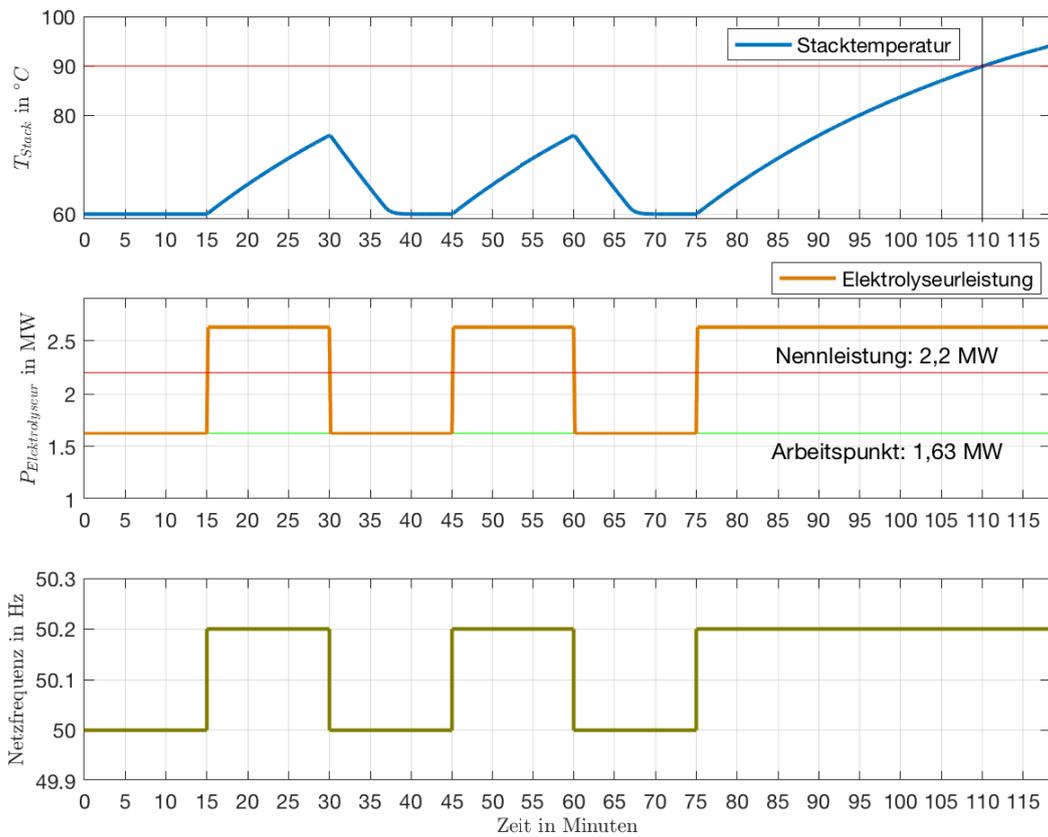


Abbildung 28: Ermittlung der Energieaufnahmekapazität des 2,2 MW Elektrolyseurs mit AP: 1,63 MW. Quelle: Eigene Darstellung

In den Abbildungen 29 und 30 ist jeweils der Verlauf der Temperaturen der Elektrolyseure bei simulierter Erfüllung der Primärregeldienstleistung des Jahres 2017 in der Regelzone APG ersichtlich. Wie zu erwarten war, erreichen die nach dem 15 Minuten Kriterium knapper ausgelegten Systeme höhere Temperaturen. Gleichzeitig stabilisieren sich die Temperaturen nach jedem Abruf wieder, sobald die Netzfrequenz wieder den normal state erreicht hat. Wie in den Abbildungen 23 und 24 ersichtlich ist, hat der Betrieb an der oberen Grenze des Normalbetriebes bei 50,05 Hz keine Erhöhung der Temperatur zur Folge. Es sind allerdings ungünstige Frequenzverläufe denkbar, die häufig die Frequenzgrenze des normal state überschreiten aber immer rechtzeitig vor Vorliegen des alert state kurzzeitig in den normal state zurückfallen. Tritt diese Charakteristik über einen längeren Zeitraum auf, ist mit einer dauerhaften Erhöhung der Temperatur zu rechnen. Vergleichbar wäre dies mit dem langsamen Entladen oder auch Laden einer Batterie. Um dem entgegenzuwirken, sind Vorkehrungen zu treffen die den Nachladestrategien von batteriegestützten Primärregelleistern entsprechen, siehe dazu auch [49]. Dabei können die Freiheitsgrade bei der Erbringung der Primärregelleistung genutzt werden wie sie in [50] dargestellt sind. Diese umfassen:

- Übererfüllung: Im Fall einer zu hohen Temperatur des Elektrolyseurs kann, sobald die Frequenz unter $< 49,99$ Hz fällt, diese positive Regelleistungsanforderung bis zu 20% übererfüllt werden.
- Totbandnutzung: Liegt die Frequenz im Bereich des negativen Teils des Totbandes - also $49,99 < f_{Netz} < 50,0$ - kann die Leistung auf den der Frequenz entsprechenden Wert von 49,99 Hz reduziert werden.
- Fahrplangeschäfte: Dabei werden kurzfristig der Fahrplan geändert und der Arbeitspunkt verringert. Hierfür ist schon bei der Planung zu beachten, dass die Elektrolyseurleistung nicht die untere Sicherheitsschwelle der PEM-Systeme (5%-10%) verletzt, falls eine positive Primärregelleistungsanforderung während des Fahrplangeschäfts vorliegt.
- Übernahme durch andere Einheiten: Dazu würden sich verschiedene elektrische Verbraucher eignen, aber auch z.B ein Batteriespeicher

Einschränkung durch eine begrenzte Wasserstoffsенke Die bisher beschriebenen Konfigurationen setzten jeweils eine ideale Abnahme des produzierten Wasserstoffes bzw. des Gasgemisches im Allgemeinen voraus. Der Gasdruck wurde kathodenseitig auf 20 bar geregelt, der Gasausstoß konnte beliebig variieren. Alternativ dazu wird jetzt der Massenstrom der Gasentnahme aus dem kathodenseitigen Elektrolyseursystem konstant geregelt. Die fortlaufende Entnahme entspricht der Menge des Gasausstoßes im regulären Arbeitspunkt von 1,2 MW des 2,2 MW Elektrolyseurs ohne Überlastbetrieb. Regelleistungsabrufe verursachen dadurch Änderungen des Gasdrucks im als Pufferspeicher verwendeten Gasvolumen.

Die Grenzen der Schwankungsbreite des Gasdrucks wurde mit 35 bar und 5 bar gesetzt.

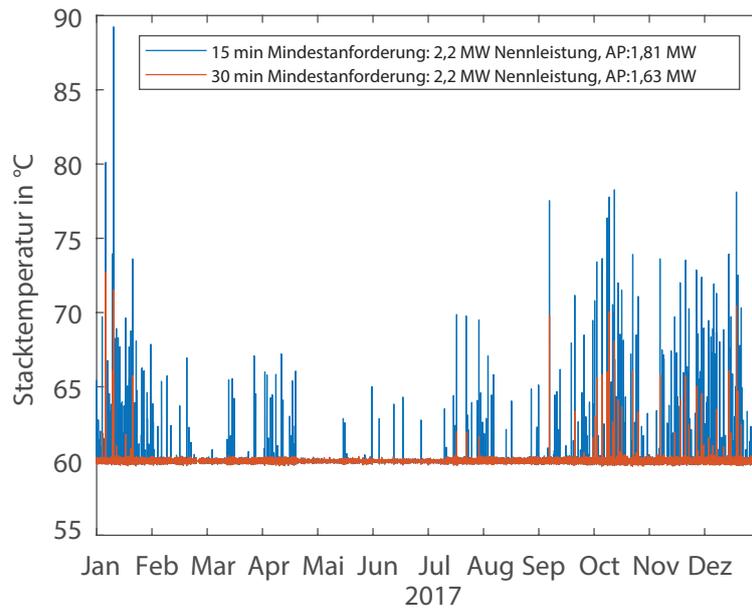


Abbildung 29: Temperaturverlauf bei Erfüllung von ± 1 MW FCR 2017 APG mit erhöhtem Arbeitspunkt Nennleistung für 15 und 30 Minuten Mindestanforderung Quelle: Eigene Darstellung

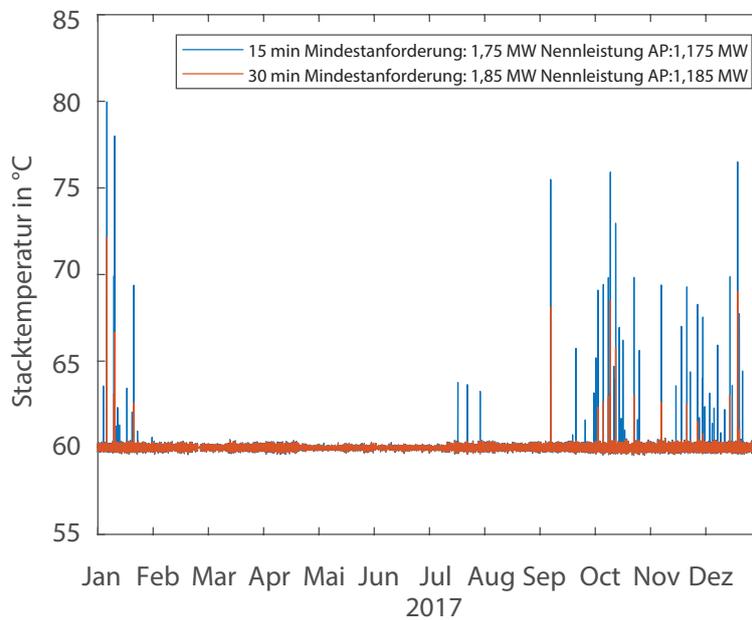


Abbildung 30: Temperaturverlauf bei Erfüllung von ± 1 MW FCR 2017 APG mit minimierter Nennleistung für 15 und 30 Minuten Mindestanforderung Quelle: Eigene Darstellung

Diese können je nach Anforderung auch enger gesetzt werden. Grundsätzlich ist für eine geringere Schwankungsbreite ein größerer Gasspeicher erforderlich.

Ausgehend vom ursprünglichen Verhältnis von verfügbarem Gasvolumen zur Zellenfläche, $3,27 \text{ cm}^3$ Gasvolumen pro cm^2 Zellfläche, wird das Gasvolumen solange erhöht, bis die Grenzen des Gasdruckes nicht verletzt werden. Dabei gilt, die in diesem Abschnitt behandelten Kriterien der speicherbegrenzten Systeme nicht zu verletzen.

Tabelle 5 listet die Resultate auf. Der Volumenbedarf fällt für die untere Druckgrenze größer aus als für die Grenze bei 35 bar. Dies liegt am geringeren Anteil des Wasserdampfpartialdruckes im Verhältnis zum restlichen Druck bei der oberen Druckgrenze. Wird immer ein konstanter Massenstrom entnommen, ist der ausfließende Wasserstoffanteil bei hohen Drücken größer als bei niedrigen.⁸ Die Druckuntergrenze ist somit die relevante Grenze.

Wird das für das 30 Minuten Kriterium bestimmte Gasvolumen dem negativen und positiven Doppelhockertest unterzogen, ergibt sich der Verlauf in den Abbildungen 32 und 33.

Ein markanter Unterschied zum Betrieb des Elektrolyseurs im Überlastbetrieb und idealer Wasserstoffsenske besteht im Verhalten nach der Anforderung des alert state. Selbst bei Rückkehr zum Arbeitspunkt 1,2 MW entspricht der Abfluss dem Zufluss aus der Elektrolyse. Der Druck verändert sich aber nur sehr langsam.⁹ Um die Forderung, 2 Stunden nach einem Abruf im alert state den Zustand des Energiespeichers wieder herzustellen, zu erfüllen, sind Nachladestrategien unbedingt erforderlich. Damit entspricht das Einsatzverhalten eines Gaspufferspeichers in dieser Beziehung dem eines Batteriespeichers.

Tabelle 5: Notwendiges Gasspeichervolumen zur Einhaltung der 15- und 30-Minuten Kriterien und Druckgrenzen des 2,2 MW Elektrolyseurs

	Basiskonfiguration	(30 min) 35 bar	(30 min) 5 bar	(15 min) 35 bar	(15 min) 5 bar
notwendiges Volumen in cm^3/cm^2	3,27	16,48	21,6	10,88	14,24
notwendiges Volumen in m^3	1,76	9,06	11,88	5,98	7,83

⁸Die Modellannahme beruht auf einem Wasserdampfpartialdruck bei gesättigtem Zustand. Eine geringere Sättigung bedeutet einen geringeren Partialdruck und damit einen geringeren Wasserdampfmasseanteil.

⁹Der Grund, dass sich der Druck überhaupt ändert liegt an der veränderten Gaszusammensetzung durch den Wasserdampfanteil. Im vorliegenden Fall betrug die Zeitkonstante 41 Stunden

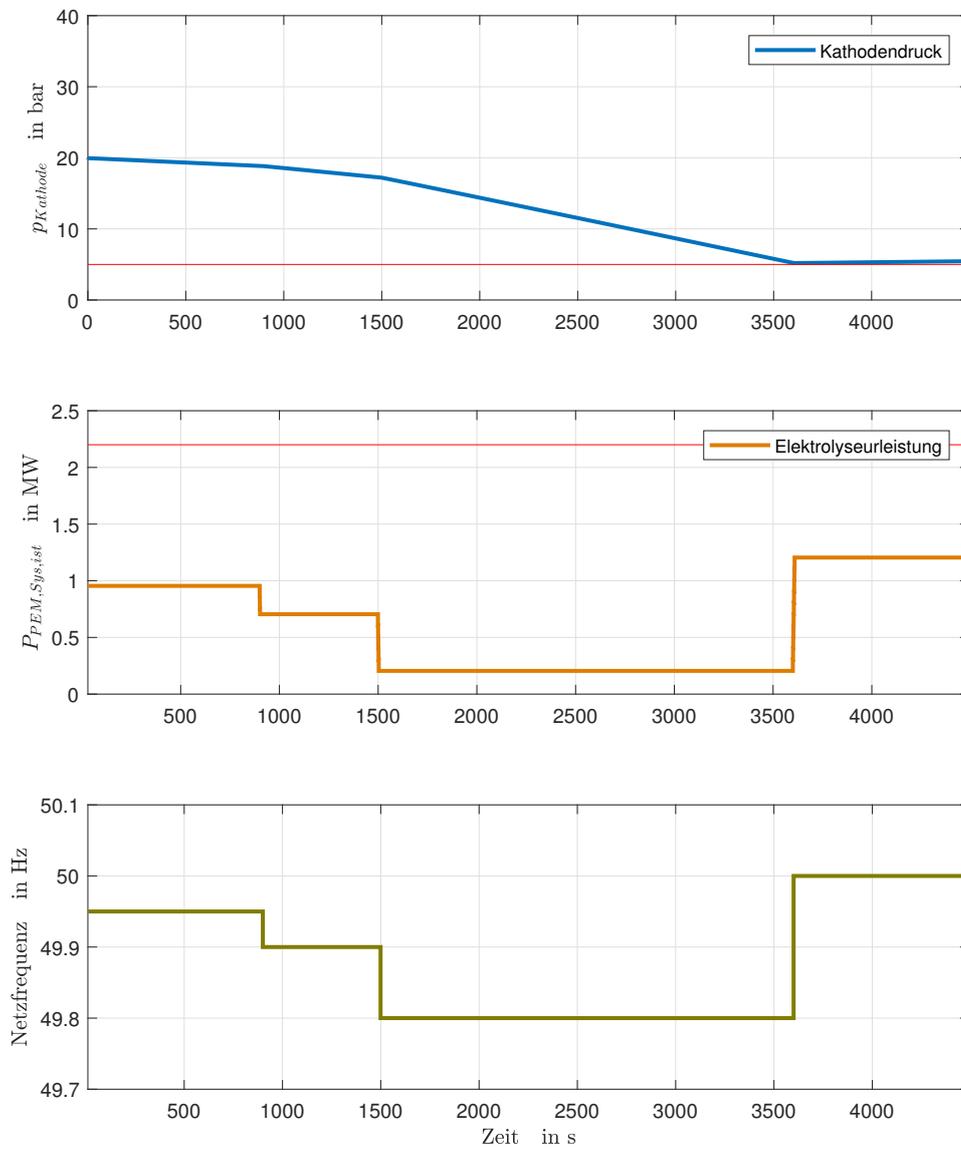


Abbildung 31: Verlauf des Kathodendruckes, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz des negativen 30-Minuten Gasspeichervolumens des 2,2 MW Elektrolyseurs. Quelle: Eigene Darstellung

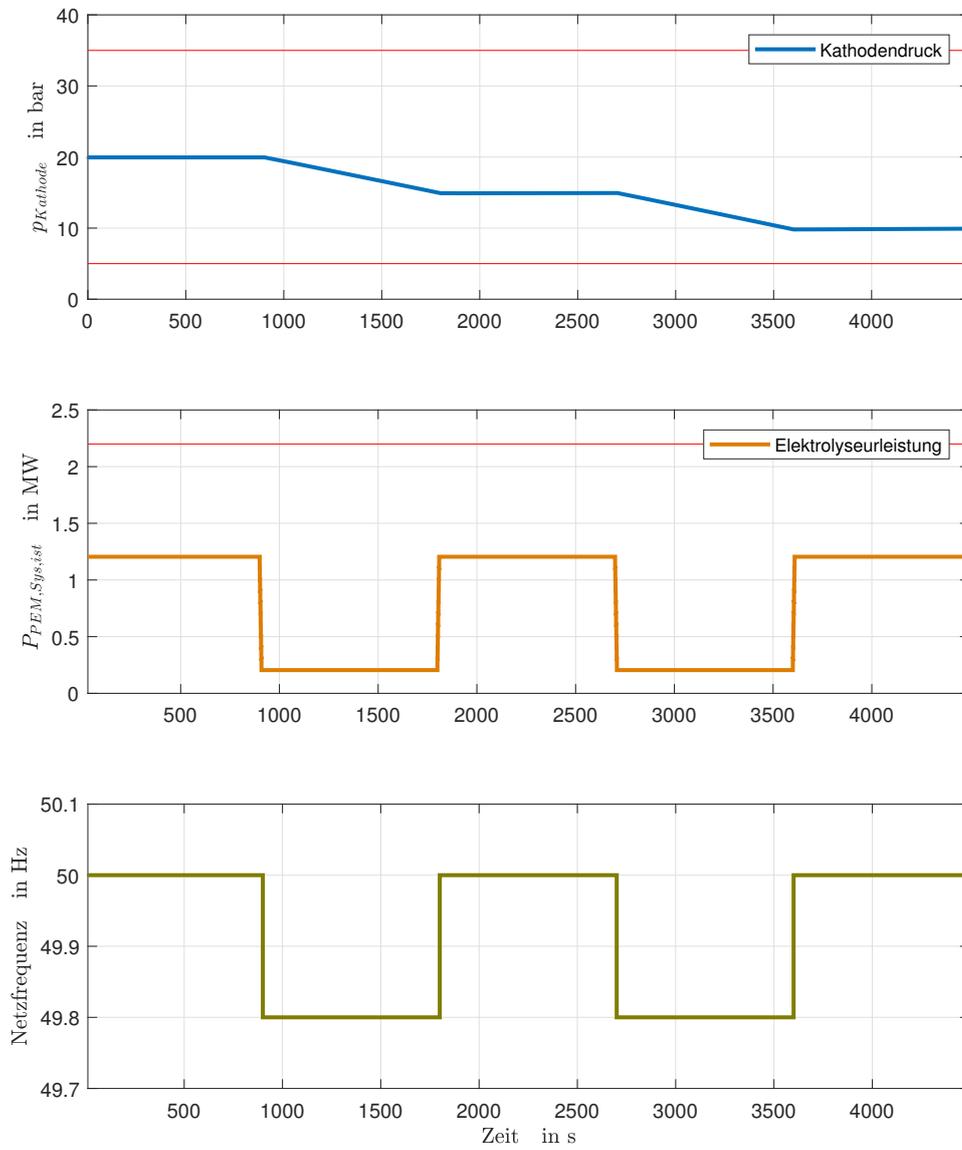


Abbildung 32: Verlauf des Kathodendruckes, der Elektrolyseleistung und der Netzfrequenz beim negativen Doppelhockertest Quelle: Eigene Darstellung

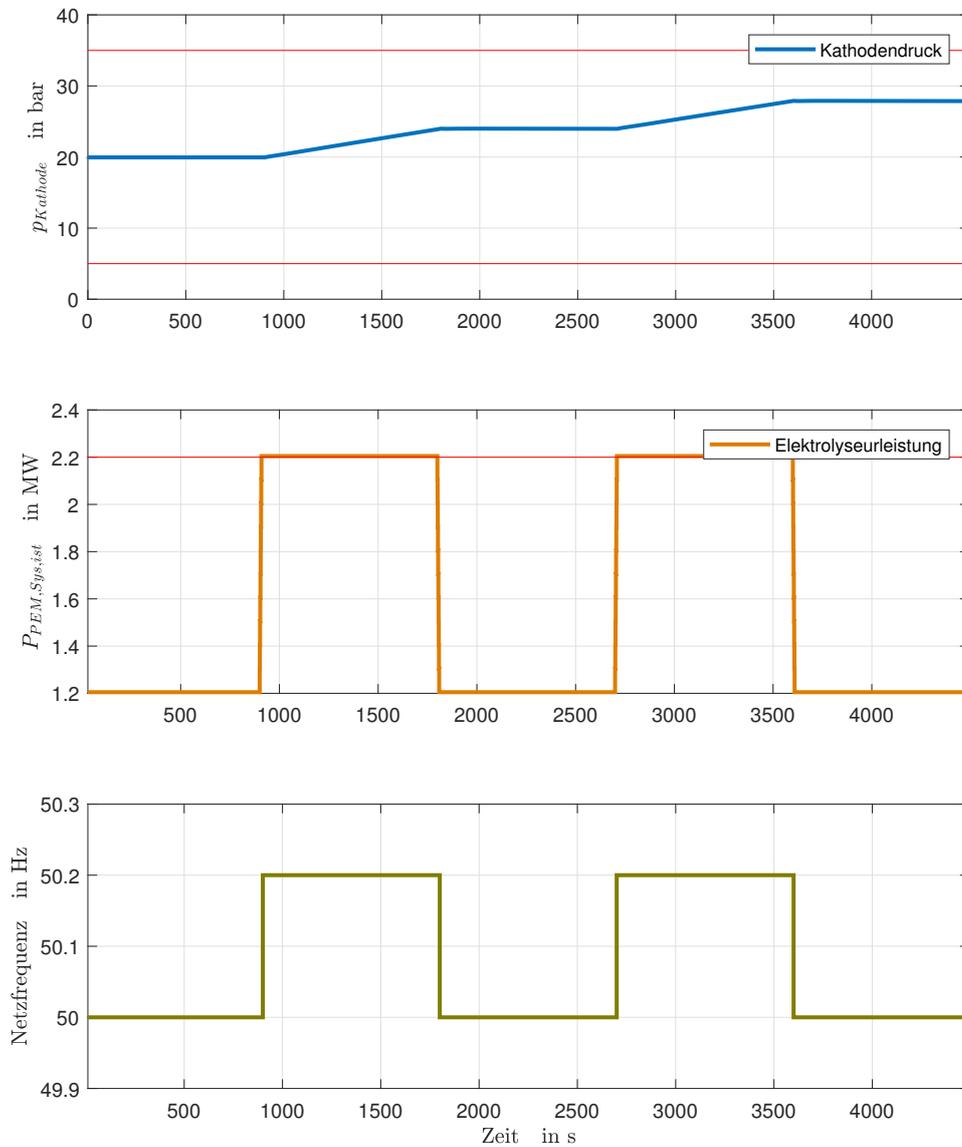


Abbildung 33: Verlauf des Kathodendruckes, der Elektrolyseleistung und der Netzfrequenz beim positiven Doppelhöckertest Quelle: Eigene Darstellung

5.3. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur positiven Sekundärregelung

In der österreichischen Regelzone wurden für das Jahr 2017 regulär 200 MW an positiver Sekundärregelleistung vorgehalten. Die Regelleistung wird von Anbietern erbracht, die Angebote für definierte Regelleistungsprodukte abgeben. Die Produkte der Sekundärregelleistung werden nach „Peak“ und „Off-Peak“ Phasen und täglicher oder einwöchiger Lieferfrist jeweils getrennt ausgeschrieben. Peak-Produkte umfassen dabei die Zeitspannen 08:00-20:00 Uhr an Werktagen (Mo-Fr), die Off-Peak Angebote decken die verbleibende Zeit in der Nacht sowie an Wochenenden und Feiertagen ab. Der Zuschlag für die jeweiligen Angebote der Anbieter erfolgt zunächst nach Höhe des Leistungspreises. Dieses Entgelt vergütet die Vorhaltung der gebotenen positiven Sekundärregelleistung unabhängig von einem tatsächlichen Einsatz. Neben dem Leistungspreis beinhalten die Angebote auch einen Arbeitspreis, der die tatsächlich gelieferte Energiemenge vergütet. Ein niedrigerer Arbeitspreis dient als Zuschlagskriterium bei Angeboten, die sich im Leistungspreis nicht unterscheiden. Der durchschnittliche Leistungspreis für positive Regelleistung in Peak-Phasen betrug 2017 1,74 €/MWh und zu Off-Peak Zeiten 0,93 €/MWh^[4].¹⁰ Die durchschnittlichen Arbeitspreise der tatsächlich abgerufenen Sekundärregelleistung erreichten dagegen 110,78 €/MWh und 107,93 €/MWh. Durch eine Kooperationsvereinbarung des österreichischen Regelzonenführers APG mit den deutschen Regelzonenführern wird ein gemeinsamer Regelleistungsmarkt zur Erbringung der Sekundärregelleistung in beiden Ländern gebildet. Die Angebote der Anbieter aus dem österreichischen Ausschreibungsverfahren werden anhand der gebotenen Arbeitspreise in eine gemeinsame Merit-Order Liste eingegliedert. Bei einer Sekundärregelleistungsanforderung in Deutschland oder Österreich werden die entsprechenden Anbieter nach dem Gesichtspunkt möglichst geringer Kosten aus der Merit-Order Liste ausgewählt. Dabei können Anbieter und Regelleistungsanforderung auch aus dem jeweils anderen Land stammen. In dieser Arbeit werden nur die Abrufe von österreichischen Anbietern von Regelleistung im Jahr 2017 betrachtet, die verursachende Regelzone bleibt dabei außen vor. Der Verlauf der abgerufenen positiven Sekundärregelleistung österreichischer Anbieter im Jahr 2017 ist in Abbildung 34 dargestellt.

Die Mindestgebotsgröße für Sekundärregelleistungsdienstleistungen beträgt 5 MW und kann in 1 MW Schritten erweitert werden. Für den Einsatz von Lasten als positiven Sekundärregelleistungserbringer muss eine geplante elektrische Leistungsaufnahme nach Vorgabe des Sekundärreglers des Regelzonenführer reduziert werden. Für Elektrolyseure bedeutet dies eine Verringerung der Produktion von Wasserstoff im Falle der Lieferung von positiver Sekundärregelleistung. Damit kann einem Sekundärregelleistungsabruf über den Leistungs- und Arbeitspreis ein Preis für die Nicht-Produktion von Wasserstoff zugeordnet werden. Der im 15-Minutenintervall reduzierten elektrischen Energieaufnahme entspricht die im selben Intervall verminderten Masse an produziertem Wasserstoff oder die dazu gleichwertig über den unteren Brennwert zugeordneten Energiemenge an Wasserstoff. Zur Vereinfachung wird die Funktion $f_{El,Extern,SRRpos}(P_i)$ definiert, die die Elek-

¹⁰Die verwendete Einheit €/MWh für den Leistungspreis wird von der APG übernommen. Sie ergibt sich aus den gesamten Leistungskosten für die angebotenen Leistung multipliziert mit der Vertragslaufzeit

trolyseurfunktion $f_{El,Extern}$ aus 22 für die innerhalb der Simulation konstanten Werten der Netzfrequenz, Kathodensolldruck und Stacksolltemperatur repräsentiert.

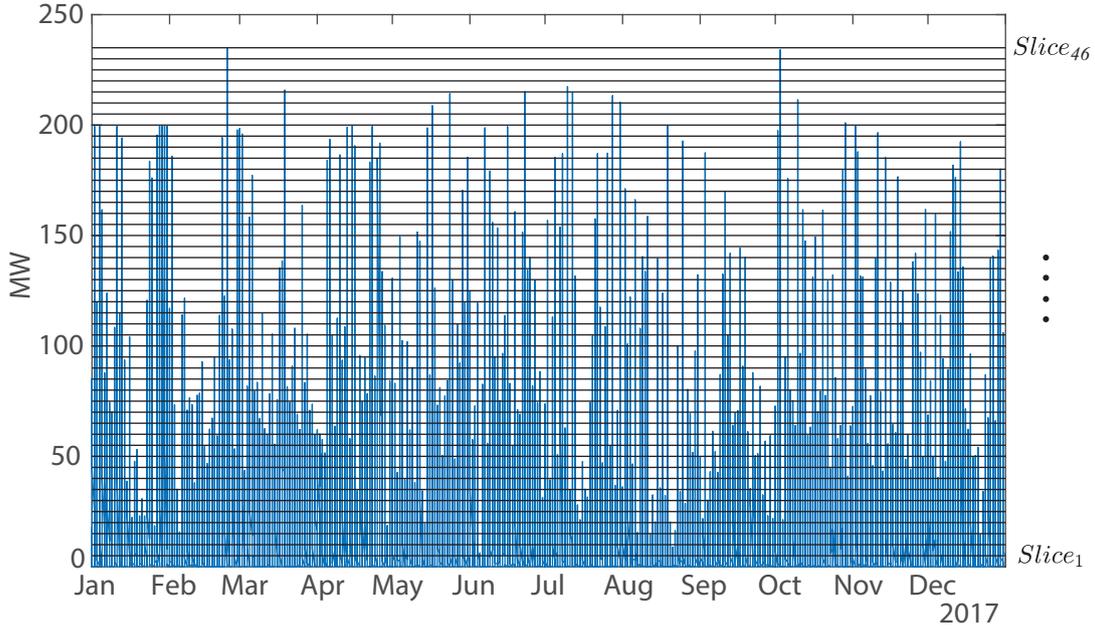


Abbildung 34: In Österreich 2017 abgerufene positive Sekundärregelleistung Quelle: Eigene Darstellung

$$i \in \{1 \dots 8760 \cdot 4\} \quad (70)$$

$$f_{El,Extern,SRR_{pos}}(P_i) = f_{El,Extern}(P_i, 0 \text{ VA}, 50 \text{ Hz}, 20 \text{ bar}, 60^\circ \text{C}) \quad (71)$$

$$m_{H_2,i,nom} = f_{El,Extern,SRR_{pos}}(P_{i,nom}) \quad (72)$$

$$m_{H_2,i,SRR} = f_{El,Extern,SRR_{pos}}(P_{i,nom} - P_{i,SRR_{pos}}) \quad (73)$$

$$\Delta m_{H_2,SRR_{pos},i} = m_{H_2,i,nom} - m_{H_2,SRR_{pos},i} \quad (74)$$

$$\Delta W_{H_2,SRR_{pos},i} = \frac{\Delta m_{H_2,i,SRR_{pos},i}}{H_{H_2,u}} \quad (75)$$

Um die positiven Sekundärregelleistungsabrufe in Österreich anhand des Preis des nicht-produzierten Wasserstoffes bewerten zu können, werden die Abrufe des Jahres 2017 in Streifen zu je 5 MW Breite eingeteilt. Diese „Regelleistungsslices“ bilden anhand der zur jeweiligen Zeitscheibe gültigen Merit-Order Liste eine aufsteigende Ordnung. $Slice_1$ bildet die Klasse der Angebote mit dem jeweils günstigsten Angebot, $Slice_{40}$ jene mit dem höchsten Arbeitspreis für den Bereich der regulär ausgeschriebenen Leistung von 200 MW. Die Slices 41-46 decken den Bereich ab, der im Bedarfsfall zusätzlich vorgehalten wird. In weiterer Folge enden die Betrachtungen in diesem Abschnitt mit dem Ende des regulären Ausschreibungsbereiches. Jeder Slice kann nun dahingehend ausgewertet werden, als ob dessen Leistungsbedarf vollständig und ganzjährig mit der Nicht-Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyseure erbracht wird.

Allerdings wird innerhalb dieser Methodik ein Fehler in Kauf genommen. Die Daten liegen nur in Mittelwerten der 15-Minuten Zeitscheiben vor. Innerhalb des Zeitintervalles kann es zu Änderungen des Sekundärregelsollwertes kommen. (siehe Abbildung 35) Die real anfallende Auslastung mehrerer Einheiten wird durch die Mittelung verschleiert.

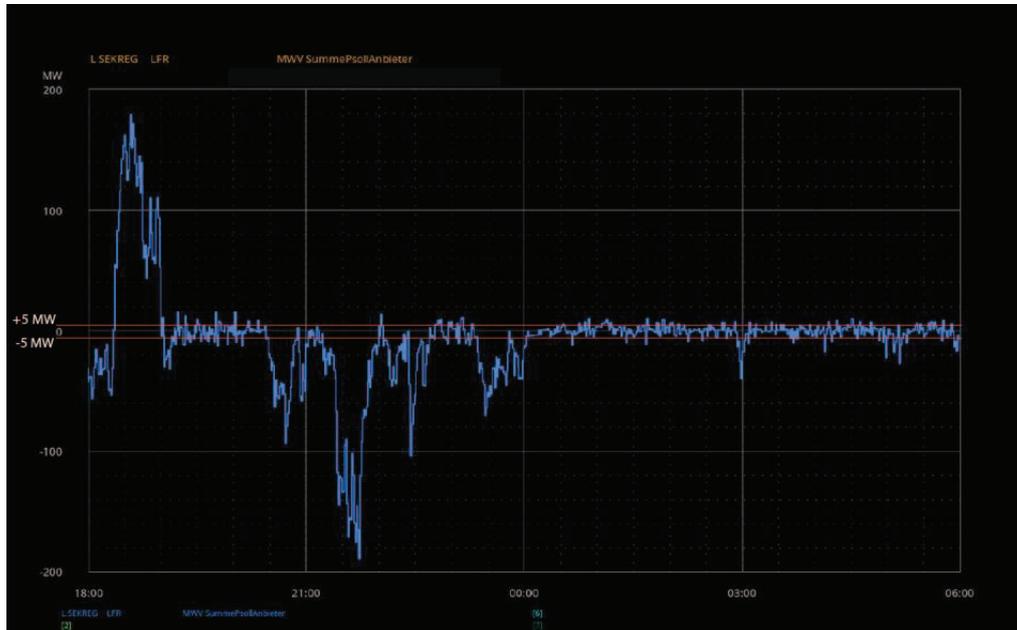


Abbildung 35: Beispiel des SRL-Signals auf Sekundenbasis für Anbieter in Österreich.
Quelle:APG

Die 5 MW breiten Jahresverläufe der Sekundärregelleistungsabrufe werden dem Elektrolyseurmodell dieser Arbeit zugeführt. Dabei wird der Elektrolyseur auf eine Nennleistung mit 5,5 MW konfiguriert. Die nominale Leistungsaufnahme $P_{i,nom}$ beträgt 5,5 MW. Die angebotene, präqualifizierte Leistung ist $P_{Leistung,PQ,SRRpos} = 5 \text{ MW}$. Ein Sekundärregelleistungsabruf im Bereich $0 \leq P_{i,SRR} \leq 5 \text{ MW}$ lässt die Leistung des Elektrolyseurs jeweils proportional reduzieren. Im Falle eines Vollabrufes ($P_{i,SRR} = 5 \text{ MW}$) wird die Elektrolyseurleistung auf minimal 0,5 MW reduziert, um die 10% Sicherheitsgrenze des Betriebsbereiches des Elektrolyseurs nicht zu unterschreiten.

Die den Regelleistungsabrufen zugeordneten Arbeitspreise stammen aus den veröffentlichten Statistiken zu den Regelleistungskostenstatistiken aus [6]. Aus Gründen des Datenschutzes werden allerdings nur mengengewichtete Mittelwerte der Arbeitspreise veröffentlicht. Diese entsprechen den auf die abgerufene Menge der Sekundärregelenergie bezogenen Kosten für den Arbeitsanteil einer 15-minütigen Zeitscheibe, $C_{Arbeit,i}$ in €/MWh. Das bedeutet, dass im Allgemeinen die Preise auf der Merit-Order-Liste vom verwendeten Mittelwert abweichen und diese Abweichung mit steigender abgerufener Leistung zunimmt. Die Mittelwerte geringerer Leistungsabrufe setzen sich aus einer geringeren Zahl von Angeboten zusammen. Die Abweichung fällt bei Abrufen kleinerer Leistung geringer aus, im Extremfall entspricht der Mittelwert des Abrufes eines einzelnen Anbieters dem gebotenen Arbeitspreis. Der jeweilige Leistungspreis $C_{Leistung,i}$ wird aus den Daten der Ausschreibungsplattform der APG entnommen. [3] Der Leistungspreis entsteht aus den auf die jeweilige Laufzeit des Lieferzeitraumes bezogenen Leistungskosten. Dadurch kön-

nen die Arbeits- und die Leistungspreise pro 15-minütiger Zeitscheibe einfach zu einem Gesamtpreis kombiniert werden.

$$C_{H_2,Arbeits,Slice,SRRpos,i} = \frac{C_{Arbeits,SRRpos,i}}{\Delta W_{H_2,Slice,i}} \cdot P_{i,Slice,SRRpos} \cdot \frac{15}{60} \quad (76)$$

$$C_{H_2,total,Slice,SRRpos,i} = C_{H_2,Arbeits,Slice,i} + \frac{C_{Leistung,SRRpos,i}}{\Delta W_{H_2,Slice,i}} \cdot P_{Leistung,PQ,SRRpos} \cdot \frac{15}{60} \quad (77)$$

Wie schon der Vergleich der durchschnittlichen Leistungs- und Arbeitspreise im Jahr 2017 vermuten lässt, ist der Einfluss des Leistungs- auf den Arbeitspreis gering. In Abbildung 39 wird der Einfluss konkret sichtbar gemacht. Wenn es nicht explizit angeführt ist, handelt es sich in weiterer Folge immer um Preise die auf den Arbeitspreis der Sekundärregelleistung aufbauen.

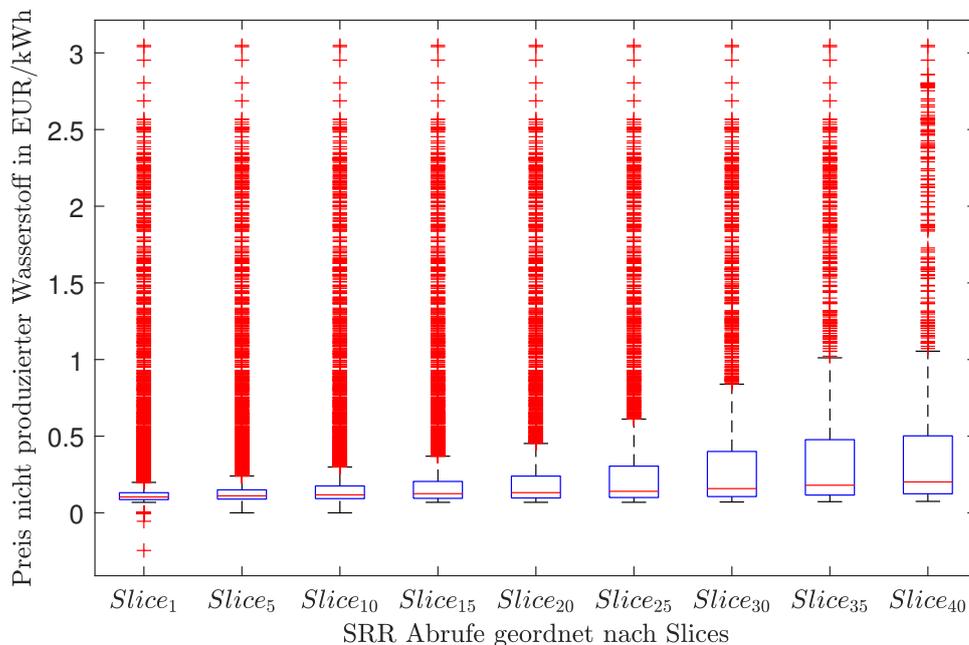


Abbildung 36: Verteilung des Preises des nicht produzierten Wasserstoffes auf den Slice-niveaus 1-40. Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse für den Preis des nicht produzierten Wasserstoffes bei positiven Sekundärregelleistungseinsatz. Die einzelnen Preise streuen dabei allerdings recht weiträumig im Bereich 0 bis 3,2 €/kWh. Im $Slice_1$ treten dabei 2 isolierte Fälle negativer Preise auf. Die Grenzen der 25/75 Quantilen umschließen den Medianwert allerdings in engen Grenzen. Insbesondere der $Slice_1$ umfasst 50% der Preise in einem Bereich von 0,086 €/kWh bis 0,131 €/kWh. Der zugehörige Preismittelwert liegt mit 0,1455 €/kWh dabei allerdings bereits außerhalb der Quartile. Allgemein weitet sich, wie in Abbildung 37 zu sehen ist, der Abstand zwischen Median und Mittelwert mit zunehmender Höhe des Leistungsabrufes aus.

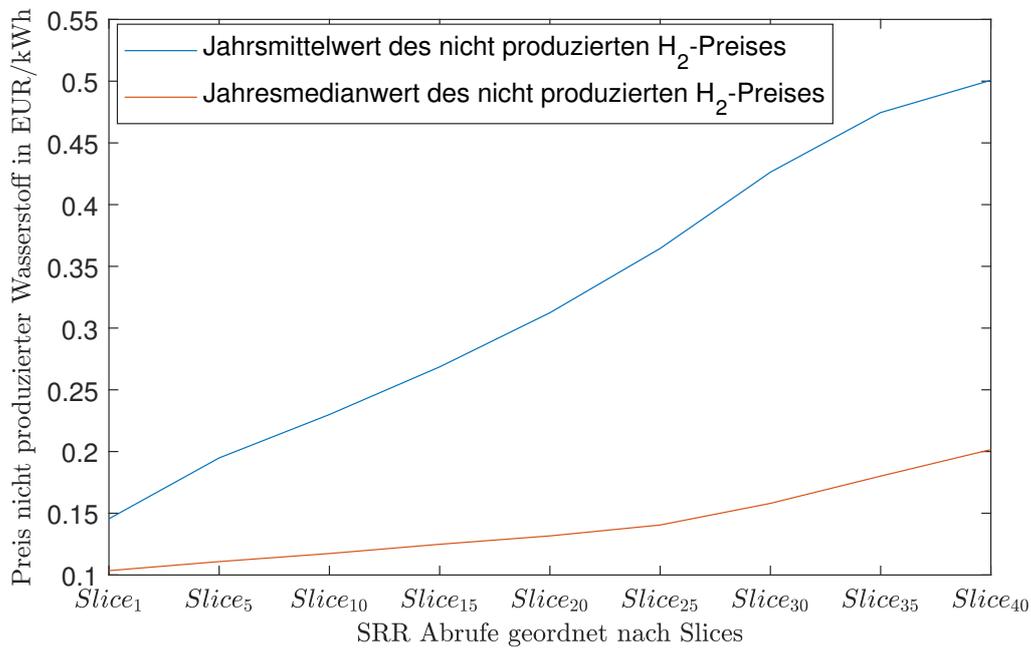


Abbildung 37: Mittelwert- und Medianpreise des nicht produzierten Wasserstoffes in Abhängigkeit des betrachteten Slices. Quelle: Eigene Darstellung

<i>Slice</i>	Preis-Mittelwert in €/kWh	Preis-Medianwert in €/kWh	Produktionsminderung in %
1	0,146	0,104	34,76
5	0,1948	0,111	22,17
10	0,230	0,117	15,71
15	0,269	0,125	11,59
20	0,312	0,132	8,58
25	0,365	0,141	6,37
30	0,426	0,158	4,74
35	0,475	0,180	3,47
40	0,501	0,202	2,39

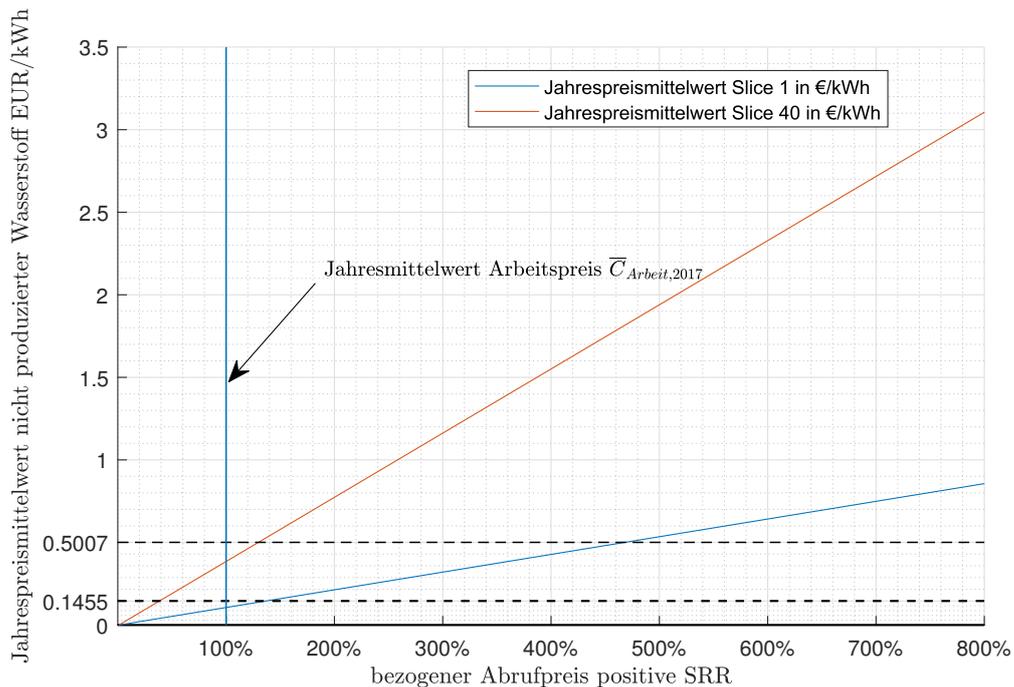
Tabelle 6: Mittelwert- und Medianpreise des nicht produzierten Wasserstoffes bei positiver Sekundärregelleistung

Die Wirkung der Variation des Arbeitspreises der Sekundärregelung auf den Preis des nicht produzierten Wasserstoffes ist in Abbildung 38 dargestellt. Ausgangspunkt ist der eingangs beschriebene jährliche Mittelwert (Gesamtmittelwert der Peak- und OffPeakpreise) für den Arbeitspreis der positiven Sekundärregelung $\bar{C}_{Arbeit,2017}=109,36 \text{ €/MWh}$. Im Fall des $Slice_1$ muss der Arbeitspreis um 37% über den Jahresmittelwert steigen, um den Jahrespreisdurchschnitt für den nicht produzierten Wasserstoff für den $Slice_1$ ($C_{H_2,Arbeit,1} = 0,14551 \text{ €/kWh}$) zu erreichen. Die relative Steigung ist dabei direkt einsproportional. Eine Verdopplung des Arbeitspreises entspricht einer Verdopplung des Preises des nicht-produzierten Wasserstoffes.

$$\tilde{C}_{H_2,Arbeit,Slice,SRR_{pos},i}(p_{varia}) = \frac{P_{i,Slice,SRR_{pos}}}{\Delta W_{H_2,Slice,i}} \cdot \bar{C}_{Arbeit,2017} \cdot (1 + p_{varia}) \cdot \frac{15}{60} \quad (78)$$

$$\bar{C}_{H_2,Arbeit,Slice,SRR_{pos},i}(p_{varia}) = \frac{\sum_i \tilde{C}_{H_2,Arbeit,Slice,i}(p_{varia})}{\sum_i \Delta W_{H_2,Slice,i}} \quad (79)$$

Abbildung 38: Preis des nicht produzierten Wasserstoffes bei Variation des Abrufpreises der Sekundärregelung. Quelle: Eigene Darstellung



Vergleich des Preises der Nicht-Produktion mit Wasserstoff aus fossiler Erzeugung

Um die ermittelten Preise zu bewerten, wird der Produktionspreis für Wasserstoff nach dem Herstellungsverfahren der Dampfreaktion herangezogen. Die Dampfreaktion bietet die geringsten Produktionskosten und stellt das dominante Herstellungsverfahren für Wasserstoff im industriellen Bereich dar. In [1] wird ein Produktionspreis von

0,05 €/kWh als Benchmarkwert herangezogen. Die Untersuchung der IEA zur Wasserstoffherstellung zur Ammoniakproduktion [35] unterstellt einen Preisbereich von 1-3 US\$/kg (0,03-0,09 US\$/kWh) Wasserstoff je nach Erdgaspreinsniveau.¹¹ Das Department of Energy der Vereinigten Staaten gibt einen Preis von 2 US\$/kg an.[38]

Grundannahme dieser Betrachtung ist die Substitution der Fehlmenge an Wasserstoff mit Wasserstoff aus einer anderen Bezugsquelle. Ein Teil des Erlöses aus der Regelleistungsdienstleistung müsste demnach aufgewendet werden, um den fehlenden Wasserstoff zu ersetzen. Wie aus den bereits gezeigten Ergebnissen ersichtlich ist, liegt das durchschnittliche Preisniveau für Wasserstoff selbst im untersten $Slice_1$ deutlich unterhalb der Produktionskosten der Dampfreformation. Um die Preisschwankungen des Regelleistungswasserstoffes im Jahresverlauf zu berücksichtigen, wird nach Gleichung 80 der jeweilige Jahreserlös gebildet. Die Einführung der Variationsvariablen p_{varia} soll die Sensitivität des Jahreserlöses auf eine Veränderung des Wasserstoffpreises aus alternativen Quellen darstellbar machen.

Grafisch wird das Ergebnis in Abbildung 39 ausgedrückt. Der Jahreserlös wird in dieser Darstellung auf den Jahreserlös bei $p_{varia} = 0$ skaliert. Dies entspricht einem Wasserstoffpreis aus der Ersatzquelle von 0,05 €/kWh. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass bei ausschließlicher Betrachtung des Arbeitspreises eine Steigerung des Wasserstoffpreises um 330% von 0,05 €/kWh auf 0,164 €/kWh möglich ist, bis die Erlöse aus der Regelleistungstätigkeit vollständig durch die Kosten für die Wasserstoffsubstitution aufgebraucht werden. Werden noch zusätzlich die Leistungskosten berücksichtigt, tritt dieser Punkt erst bei 344% oder 0,172 €/kWh ein. Gleichzeitig wird im Fall des $Slice_1$ durch die Regelleistungsabrufe um 34,76% weniger Wasserstoff produziert. Der Preis für Wasserstoff aus der Dampfreformation könnte noch um 14% auf 0,0572 €/kWh steigen, die Regelleistungserlöse würden trotzdem reichen um die vollständige Jahreserzeugung an Wasserstoff des 5,5 MW Elektrolyseurs durch den günstigeren Wasserstoff gedanklich zu ersetzen.

$$\text{Erlös}_{Slice,H_2,sub}(p_{varia}) = \sum_i (C_{H_2,Arbeit,Slice,i} - Preis_{H_2,A} \cdot (1 + p_{varia})) \cdot \Delta W_{H_2,i} \quad (80)$$

$$\text{Erlös}_{relativ,Slice,H_2,sub}(p_{varia}) = \frac{\text{Erlös}_{Slice,H_2,sub}(p_{varia})}{\text{Erlös}_{Slice,H_2,sub}(0)} \quad (81)$$

$$(82)$$

$$p_{varia} \in \mathbb{R} \quad Preis_{H_2,A} = 0,05 \text{ €/kWh} \quad Preis_{H_2,B} = 0,03-0,09 \text{ US$/kWh} \quad (83)$$

In Abbildung (40) wird das Ergebnis für den relativen Erlös im Rahmen des $Slice_{40}$ dargestellt. Das höhere Preisniveau der Regelleistungstätigkeit lässt dabei die Erlösgrenze auf 823% für den Arbeitspreis bzw. 828% bei Berücksichtigung des Leistungspreises steigen.

¹¹US Dollar werden anhand der Wechselkursdaten umgerechnet. In dieser Arbeit 1 US\$ \equiv 0,86 €

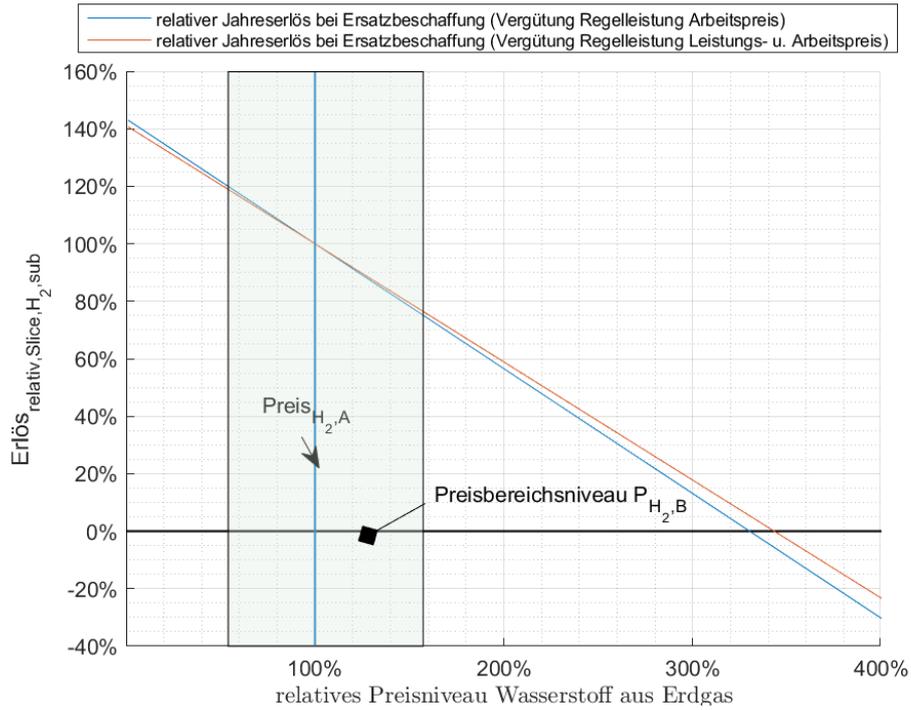


Abbildung 39: Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampfreformation Slice 1. Quelle: Eigene Darstellung

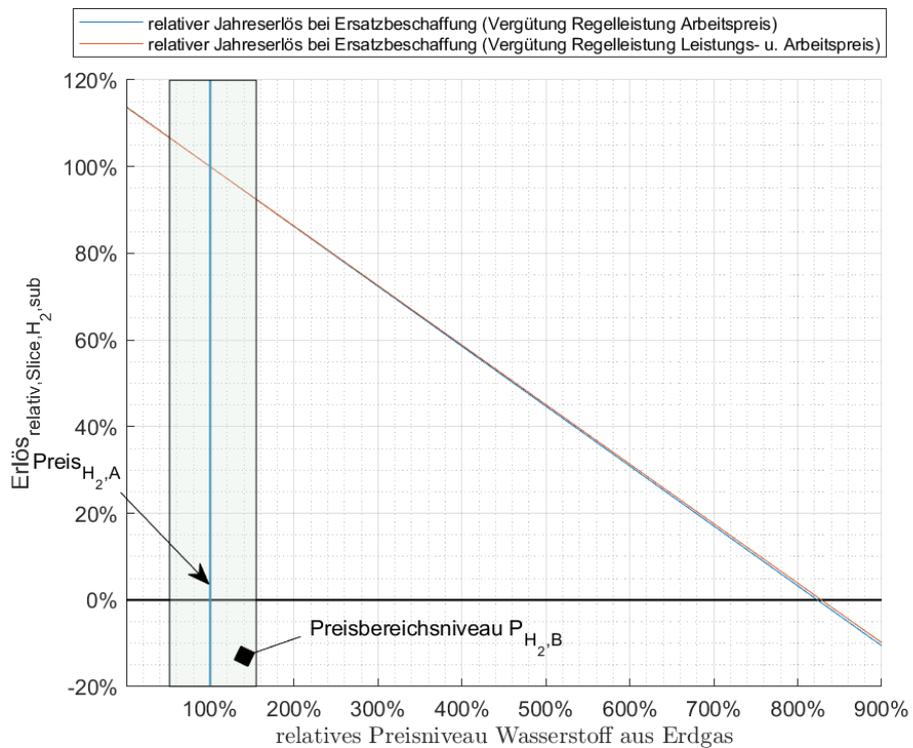


Abbildung 40: Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampfreformation Slice 40. Quelle: Eigene Darstellung

5.4. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur negativen Sekundärregelung

Neben der positiven Sekundärregelleistung wurden in Österreich im Jahr 2017 200 MW an negativer Sekundärregelleistungsreserve ausgeschrieben. Die im Jahr 2017 automatisch ausgeführten Abrufe bei negativen Sekundärregelleistungsanbietern mit Standort in Österreich für den österreichischen und deutschen Markt ist in 41 in 15 min Zeitmittelwerten ersichtlich. Dabei fällt auf, dass die nominal ausgeschriebene Leistung von -200 MW - rote Linie in der Abbildung - deutlich überschritten wurde. Es wurde mehr abgerufen, als regulär ausgeschrieben wurde. Wie auch im Fall der positiven Sekundärregelung ließ der Regelzonenführer mehr Regelleistung vorhalten, als üblicherweise notwendig ist. Allerdings stellen die sehr hohen Werte wie z.B. im August Messfehler dar.¹² Die Mindestgebotsgröße

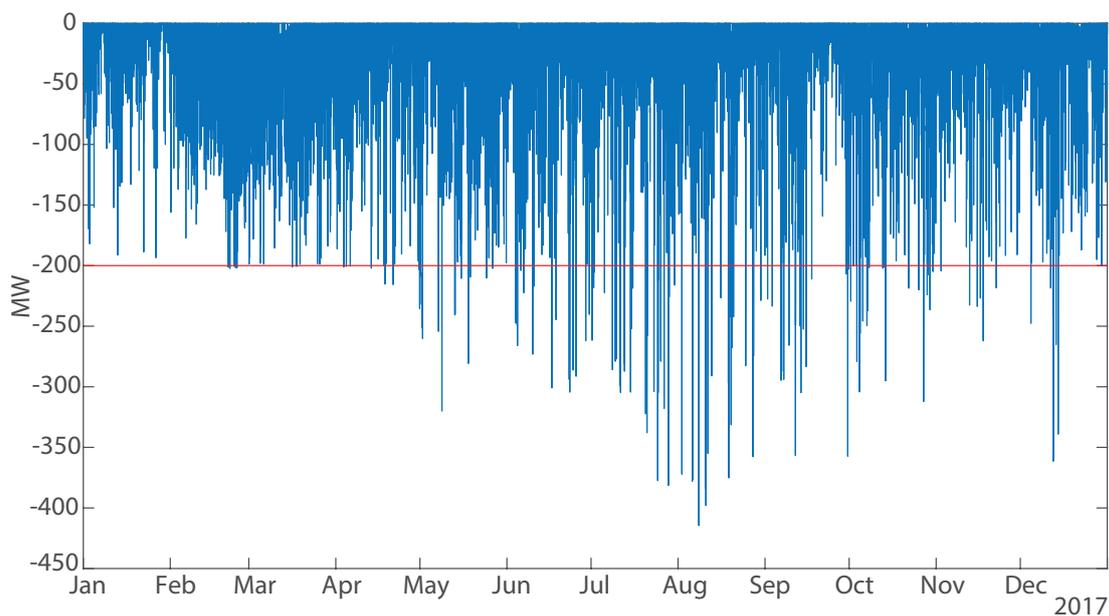


Abbildung 41: In Österreich abgerufene Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

für negative Sekundärregelleistung beträgt 5 MW und kann in 1 MW Schritten erweitert werden. Der Abruf der Gebote erfolgt anhand der Merit-Order Liste für den Arbeitspreis des Gebots. Es kommt somit beim Abruf der Regelleistung zunächst das günstigste Gebot zum Zug. Ist der Bedarf an Regelleistung noch nicht gedeckt, sind mehr Abrufe mit jeweils höheren Preisen notwendig. Damit kann, analog zur Vorgehensweise in Kapitel 5.3, anhand des Arbeitspreises eine Ordnung der Regelleistung in Klassen oder *Slices* in einer Breite von 5 MW eingeführt werden. Für den negativen Sekundärregelleistungsmarkt des Jahres 2017 entstehen damit 83 Klassen zu 5 MW $Slice_1$ bis $Slice_{83}$, siehe Abbildung 42. Jeder Slice kann nun dahingehend ausgewertet werden als ob dessen Leistungsbedarf vollständig und ganzjährig mit Elektrolyseuren erbracht wird. Da die Gebote größer als 5 MW sein können, überlappen die realen Gebote bzw. deren Zuschläge die Slice-grenzen bzw.

¹²Laut APG beinhalten die veröffentlichten Daten zum Teil Fehlmessungen die im Zusammenhang mit der Installation eines neuen Netzreglers im Mai 2017 stehen. Eine detaillierte Isolierung der Fehler und Bereinigung konnte von der APG nicht zur Verfügung gestellt werden.

spalten diese auf. Die grundlegende Aussagekraft, wie viel Wasserstoff in einem Slice maximal erzeugt werden kann bzw. anfällt, bleibt erhalten, da man das zugeschlagene Gebot immer einem Niveau zuordnen kann. Wird nur ein Teil des Gebots mit Elektrolyseuren realisiert, ist die erzeugte Menge an Wasserstoff proportional zum Verhältnis installierte Leistung pro 5 MW.

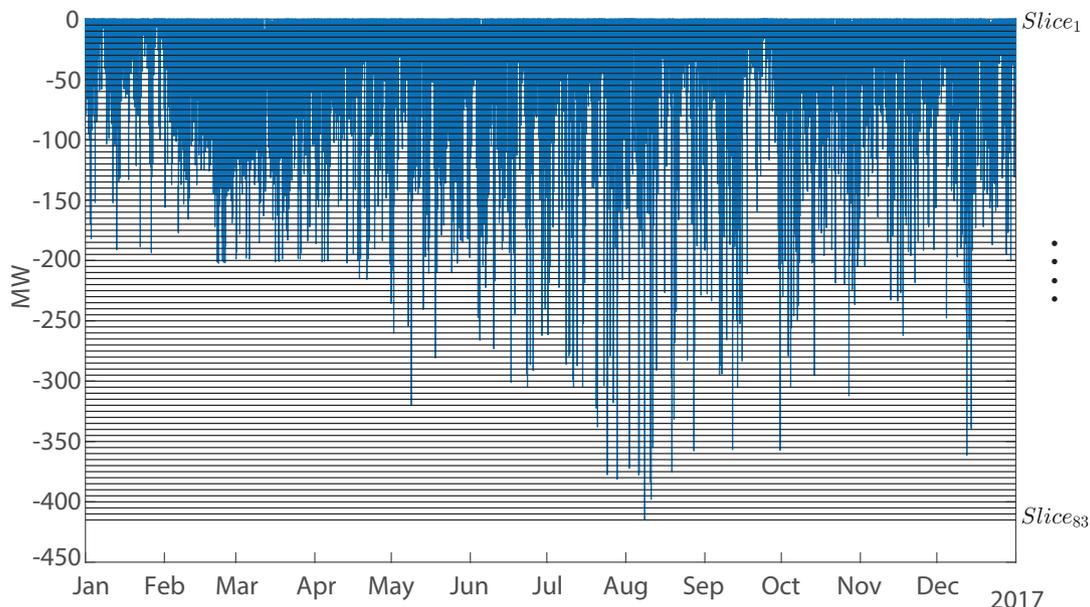


Abbildung 42: Einteilung der in Österreich abgerufenen Sekundärregelleistung in Streifen zu 5 MW. Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswertung der Volllaststunden in Abbildung 43 zeigt eine sehr starke Häufung im unteren Leistungsbereich. 68,6% entfallen bereits in den Bereich 1-10, der mit 50 MW 25% der ausgeschriebenen Leistung belegt. Ab $Slice_{41}$ bewegt sich die abgerufene Leistung jenseits des regulär ausgeschriebenen Bereichs. Diese außergewöhnlich hohen Leistungen erfordern aber nur 1,44% an überschüssiger Regelleistung pro Jahr.

Die untersten 50 MW stellen somit aus ökonomischer Sicht einer möglichst hohen Auslastung den attraktivsten Bereich für den Betrieb dar. Die Verengung auf wenige attraktive Arbeitsbereiche setzt sich auch im attraktivsten Bereich fort (siehe Abbildung 44). Die bisher etablierte Betrachtung geht von Elektrolyseuren aus, deren produktive Kapazität vollständig zur Erbringung von Regelleistung genutzt wird. Der Bereich des produktiven Einsatzes dieser Geräte auf diese Weise ist aber, wie gezeigt, schnell erschöpft. Allerdings ist die Produktionsrate im Jahresverlauf relativ gleichmäßig und zeigt keine ausgesprochene Saisonalität. Aber schon ab 55 MW bildete sich für Jänner 2017 eine Erzeugungslücke. Abbildung 46.

Hierbei muss allerdings nochmals festgehalten werden, dass – wie in Kapitel 5.3 bereits beschrieben wurde – in dieser Methodik prinzipiell ein Fehler vorliegt. Da wiederum nur 15-Minuten Mittelwerte zur Verfügung stehen, muss damit gerechnet werden, dass die Abrufe mehrerer nur kurzfristig anhaltender Abrufe zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, der sich als Abruf über 15 Minuten auf einem niedrigeren Sliceniveau in den Daten

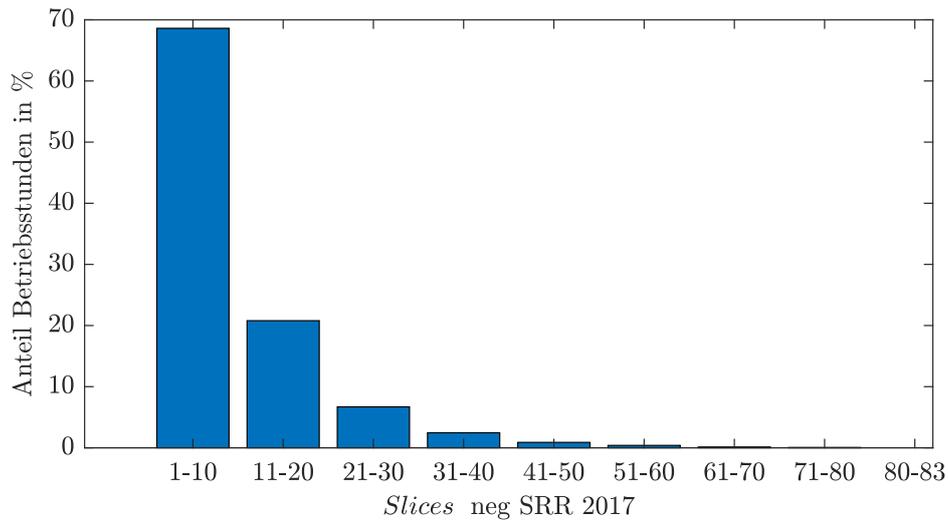


Abbildung 43: Verteilung der Auslastung über die *Slices*. Quelle: Eigene Darstellung

niederschlägt. Es muss deshalb tendenziell von einer Verschiebung der Auslastung von der niedrigen zu einer höheren Ordnung ausgegangen werden.

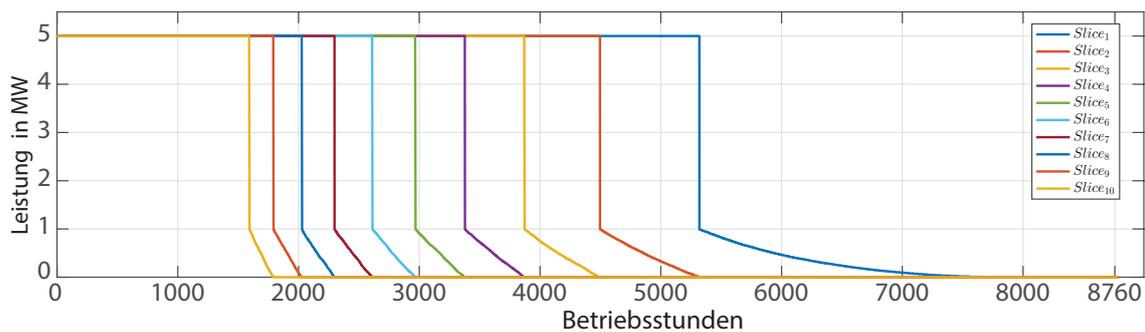


Abbildung 44: Betriebsstunden der *Slices* eins bis zehn negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

5.4.1. Technische Umsetzung - Regelleistung durch Teilbandnutzung

Um das Problem der geringen Auslastung von Angeboten in höheren Preis oder Leistungsbereichen der negativen Sekundärregelleistung zu beheben, ist es offensichtlich sinnvoll, die Elektrolyseure vorrangig zur Produktion von Wasserstoff nach einem zu stillenden Bedarf einzusetzen. Um in diesem Einsatzmuster negative Regelleistung anbieten zu können, muss der maximale Arbeitspunkt mindestens um die angebotenen Regelleistung geringer als die Nennleistung festgelegt werden. Wird dabei eine Maximierung der Auslastung angestrebt, erreicht man den Bereich der ununterbrochenen konstanten Last und damit dem Einsatzmuster zur positiven (Sekundär-) Regelleistung. Es bietet sich also der gekoppelte Einsatz von negativer und positiver Sekundärregelleistung an, allerdings erfordert der für die negative Regelleistung freizuhaltenen Bereich Geräte mit höherer Nennleistung und damit höhere Kapitalkosten, wenn die Nennleistung nicht überschritten werden soll.

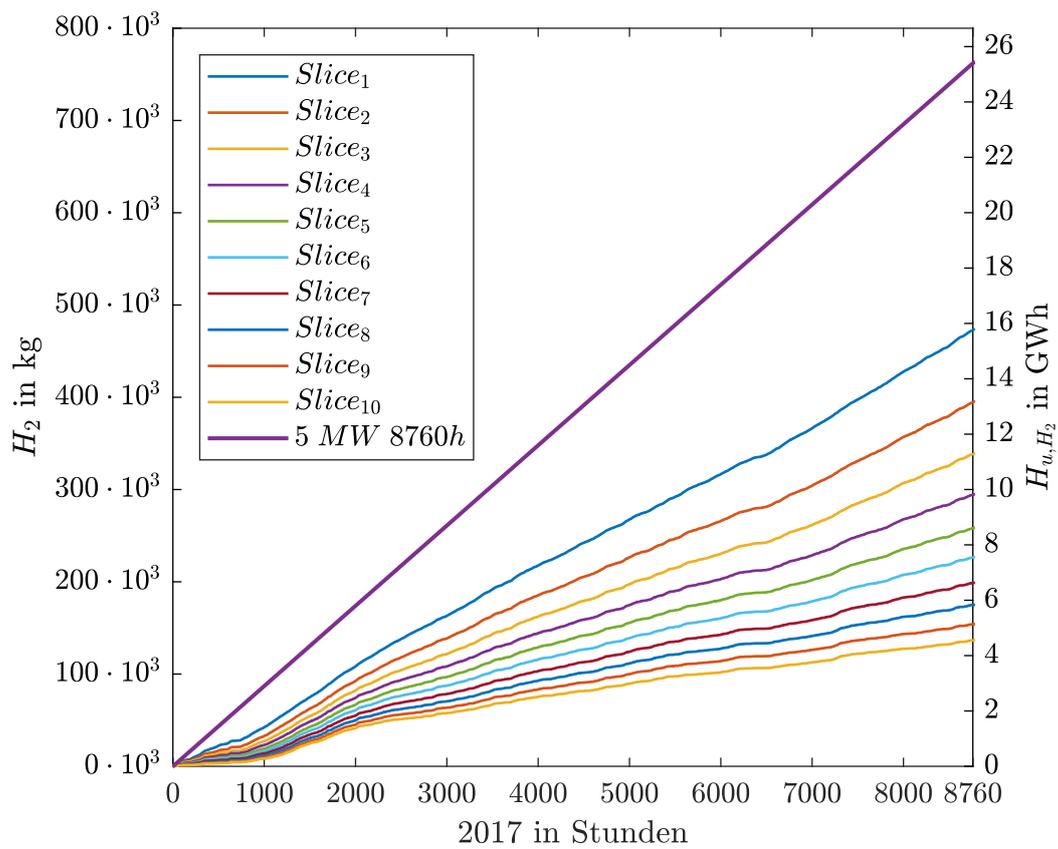


Abbildung 45: Erzeugte Menge Wasserstoff bei Erfüllung der *Slices* eins bis zehn negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

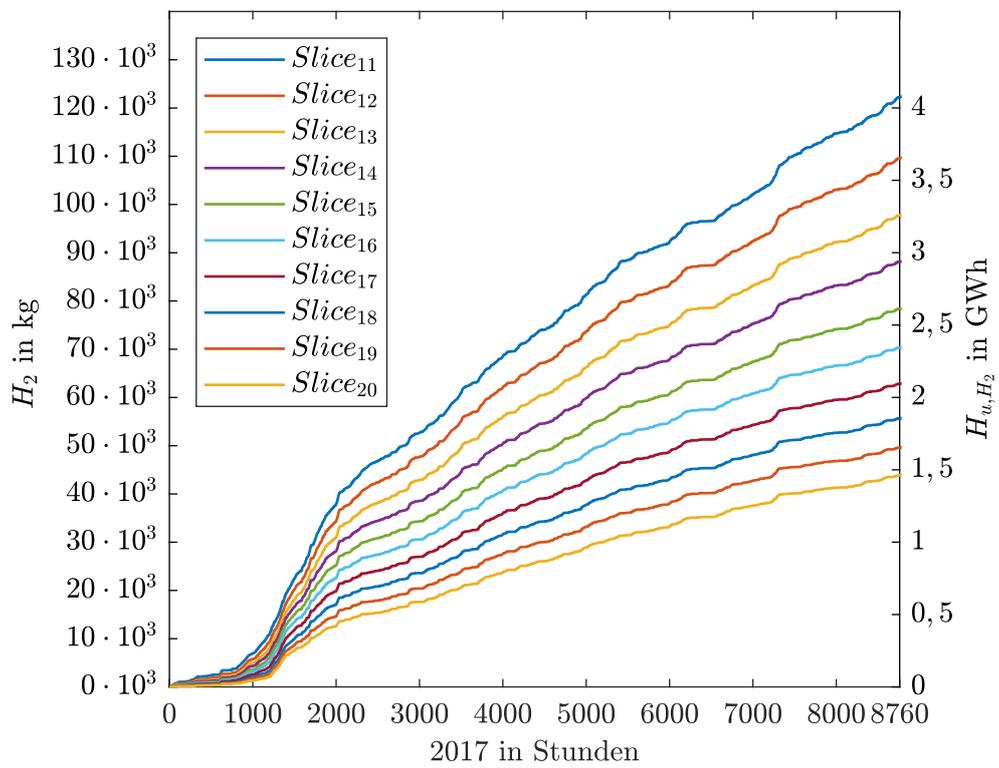


Abbildung 46: Erzeugte Menge Wasserstoff bei Erfüllung der *Slices* elf bis zwanzig negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

5.4.2. Technische Umsetzung - Regelleistung durch Überlastbetrieb

Die Möglichkeit, einen PEM-Elektrolyseur kurzfristig über der Nennleistung zu betreiben, ermöglicht die Einsatzstrategie den Elektrolyseur gemäß des jeweiligen Bedarfs bis zur Nennleistung zu nutzen und den Überlastbereich zur Erbringung von negativer Regelleistung vorzusehen. Dabei ist aber zu beachten, dass einem etwaigen Regelleistungsabruf eine notwendige Erholungsphase geringerer Leistung folgen muss, um den Wärmeüberschuss abbauen zu können. D.h die reguläre Erzeugung, die unabhängig vom Regelleistungsabrufen ist, muss auch hierbei Flexibilität hinsichtlich der Abnahmekette des Wasserstoffes, als auch beim Bezug der elektrischen Energie nach Fahrplan, bieten.

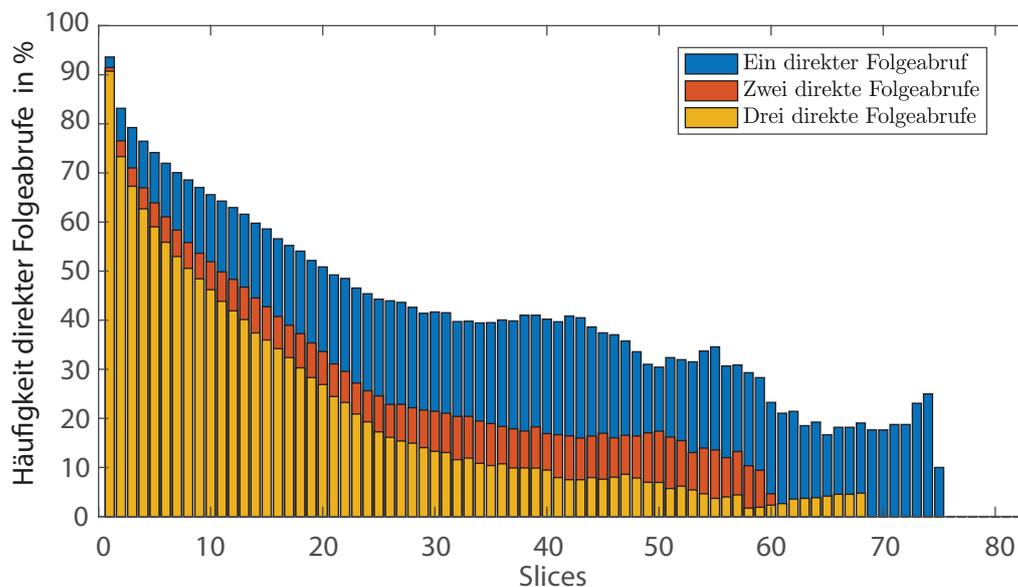


Abbildung 47: Relative Häufigkeit direkter Folgeabrufe nach einem Abruf negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

Nach Abbildung 47 gab es erst ab dem $Slice_{76}$ keinen Abruf, dem kein weiterer Abruf folgte. Da die Vertragsbedingungen mit dem Anbieter [5] eine ununterbrochene Verfügbarkeit fordern, muss eine zweite Elektrolyseureinheit bereitstehen, die im Falle einer weiteren Regelleistungsanforderung die Lieferverpflichtung erfüllt. Wenn der eigentliche Fahrplanbezug aufrechterhalten werden soll und dabei fortlaufend Regelleistungsanforderungen folgen, sind bereits 4 Elektrolyseure notwendig, um jederzeit Nennleistung und Regelleistung beziehen zu können. Geht man von einem symmetrischen Überlast-Erholungsverhältnis von $\pm 50\%$, aus wie für das Gerät in [28], reduziert sich der nutzbare Überlastbereich von 50% pro Gerät auf 12,5% der 4 Geräte. Allerdings würden vier Elektrolyseure nicht ausreichen, wenn mehr als 3 direkt aufeinanderfolgende Abrufe erfolgen. Sind die Elektrolyseure Teil eines Regelleistungspools mit anderer Technologie, bzw. noch freien zusätzlichen Kapazitäten, können diese für eine notwendige Übernahme der Leistungsaufnahme sorgen.

Im Unterschied zur Primärregelleistung existiert im Rahmen der Sekundärregelleistung

keine Regelung hinsichtlich der Nutzung von Technologien mit eingeschränktem Arbeitsvermögen. Deshalb sind die Konfigurationen für Primärregelleistung im Überlastbereich – wie sie unter Kapitel 5.2 eingeführt wurden – nicht anwendbar, da die entsprechenden Verordnungen für die Primärregelleistung eine „Erholungszeit“ von bis zu 2 Stunden erlauben.

5.5. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur positiven Tertiärregelung

Die in der Regelzone der APG in Österreich vorgehaltene positive Tertiärregelleistung betrug im Jahr 2017 insgesamt 280 MW. Im Unterschied zur Sekundärregelung werden dabei 200 MW als Wochenprodukt ausgeschrieben, die verbleibenden 80 MW werden immer durch Produkte bereitgestellt, die nur eine eintägige Lieferfrist aufweisen. Das Kriterium für den Zuschlag bildet der gebotene Leistungspreis, der – wie auch im Fall der Sekundärregelung – die Bereitstellung der Regelleistung – unabhängig von tatsächlichen Abrufen – über den jeweiligen Lieferzeitraum vergütet. Die jeweiligen Wochen- und Tagesprodukte werden zu Zeitscheiben je 4 Stunden aufgeteilt. Für jede dieser vierstündigen Einheiten kann jeweils ein Arbeitspreis geboten werden. Im Falle der Wochenprodukte existieren damit grundsätzlich für Montag-Freitag 6 vierstündige Zeitscheibengebote für den Arbeitspreis sowie weitere 6 für Samstag und Sonntag. Allerdings können diese Arbeitspreisangebote werktäglich nochmals in Richtung geringerer Kosten für den Regelzonenführer korrigiert werden. Für die Tagesprodukte gilt dagegen jede vierstündige Zeitscheibe nur für den jeweils ausgeschriebenem Produkttag. Eine Ausnahme bilden dabei nur die Tage am Wochenende sowie jene Stunden die das Wochenende zwischen den täglichen Ausschreibungen umfasst. (Freitag 12-24 Uhr, sowie Montag 00-12 Uhr) Für diese Zeiten gelten wiederum 6 einzelne Zeitscheiben. Auch für die Tagesprodukte lässt sich der Arbeitspreis am selben Tag bzw. am Freitag für die verbleibende Zeit einmalig korrigieren. Insgesamt gestaltet sich der Tertiärregelmarkt flexibler als der Sekundärregelmarkt: Einerseits durch – im Vergleich zur Sekundärregelung granularere handelbare Zeiteinheiten – andererseits aufgrund der Möglichkeit den Arbeitspreis, nochmals anpassen zu können.

Fasst man die 3 Zeitscheiben von 08:00-20:00 Uhr bzw. 20:00-08:00 zusammen, lassen sich diese in das Peak und Off-Peak Schema der Sekundärregelung eingliedern. Der durchschnittliche Leistungspreis lag für Peak-Phasen bei 4,02 €/MWh sowie 1,22 €/MWh Off-Peak. Die Arbeitspreise der tatsächlichen Abrufe betragen im Mittel 214,93 €/MWh Peak und 140,79 €/MWh an Werktagen sowie 152,91 €/MWh Peak und 145,10 €/MWh an den Tagen des Wochenendes.[4]

Die im Jahr 2017 abgerufene Menge an positiver Tertiärregelung betrug 10070,38 MWh. Dies stellt mit nur 4,2% der im selben Zeitraum abgerufenen positiven Sekundärregelleistung einen markanten Unterschied dar. In den Abbildungen 48 und 49 äußert sich der Unterschied auch grafisch. Die Anzahl der einzelnen Abrufe ist im Vergleich zur positiven Sekundärregelleistung deutlich geringer. Gleichzeitig erreicht das Preisniveau bereits bei $Slice_1$ bezüglich des Mittelwertes das mittlere Niveau der positiven Sekundärregelleistung.

Nach Aufbereitung der entsprechenden Preisdaten aus [3] lässt sich wieder für jede 15-minütige Zeitscheibe ein Mittelwert des Arbeitspreises der abgerufenen Regelleistung und des dabei gültige mittlere Leistungspreis erstellen.

Die Untersuchung des Einsatzes der Wasserstoffelektrolyseure zur Tertiärregelung folgt dem Muster der Untersuchung der positiven Sekundärregelung, siehe Kapitel 5.3. Der

Verlauf der positiven Tertiärregelleistungsabrufe wird wieder in diesmal 56 *Slices* aufgliedert um den 280 MW Abrufbereich in Streifen zu 5 MW einzuteilen. Die daraus resultierende Abrufcharakteristik wird einem 5,5 MW Elektrolyseur zugeführt und die dabei erzeugten und nicht-erzeugten Mengen an Wasserstoff werden mit den jeweiligen Preisen verknüpft.

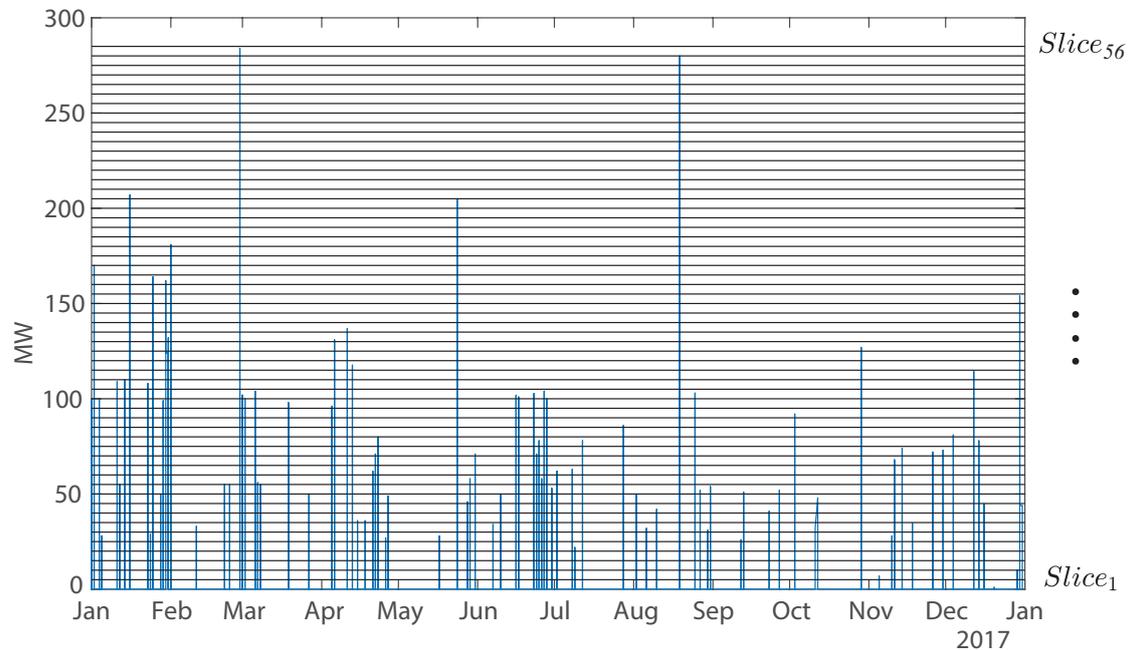


Abbildung 48: In Österreich 2017 abgerufene positive Tertiärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 7: Mittelwert- und Medianpreise des nicht produzierten Wasserstoffes bei positiver Tertiärregelleistung

<i>Slice</i>	Preis-Mittelwert in €/kWh	Preis-Medianwert in €/kWh	Produktionsminderung in %
1	0,337	0,277	1,51
10	0,430	0,349	0,77
20	0,589	0,450	0,34
30	1,020	0,540	0,12
40	1,331	0,592	0,05
50	2,351	2,778	0,03
56	2,778	2,778	0,02

Im Zuge des Vergleichs der Vergütung des nicht produzierten Wasserstoffes mit den Produktionskosten von Wasserstoff aus Dampfreformationsproduktion stellt sich durch das höhere Preisniveau der Tertiärregelung ein Erlösgleichgewicht zwischen Substitutions-Wasserstoff und Preis des nicht-produzierten Gases bei 685% Prozent des Vergleichspreises von 0,05 €/kWh ein, also 0,34 €/kWh. Werden auch die Leistungspreise berücksichtigt, liegt das Vergleichsniveau bei 720% oder 0,36 €/kWh.

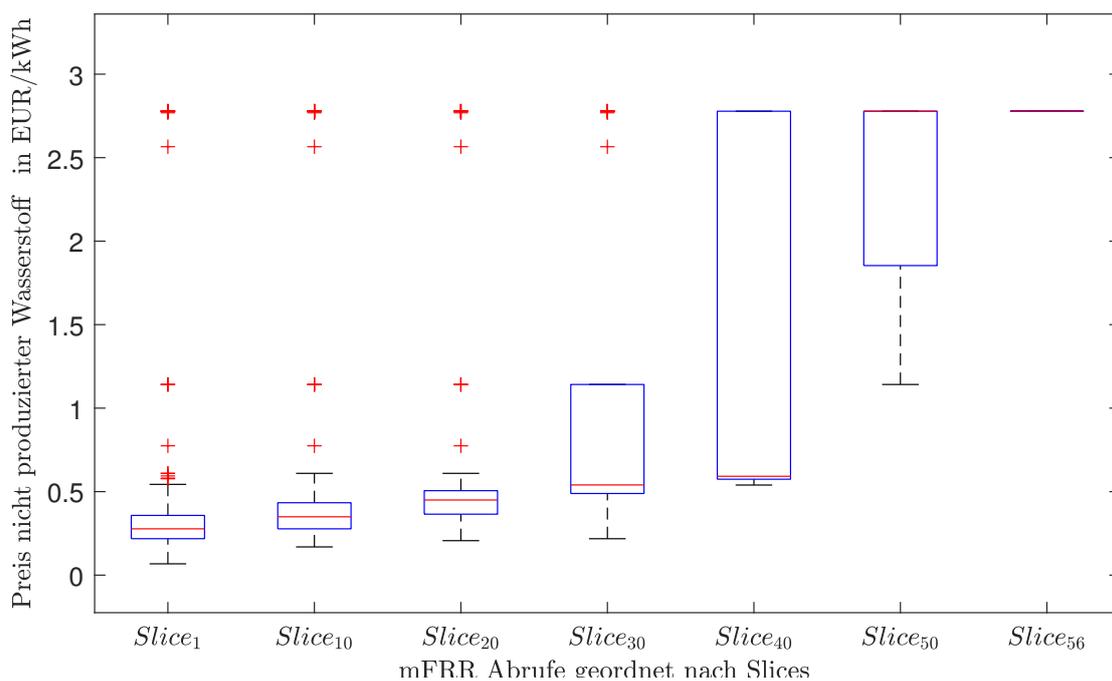


Abbildung 49: Verteilung des Preises des nicht produzierten Wasserstoffes auf den Slice-niveaus 1-56. Quelle: Eigene Darstellung

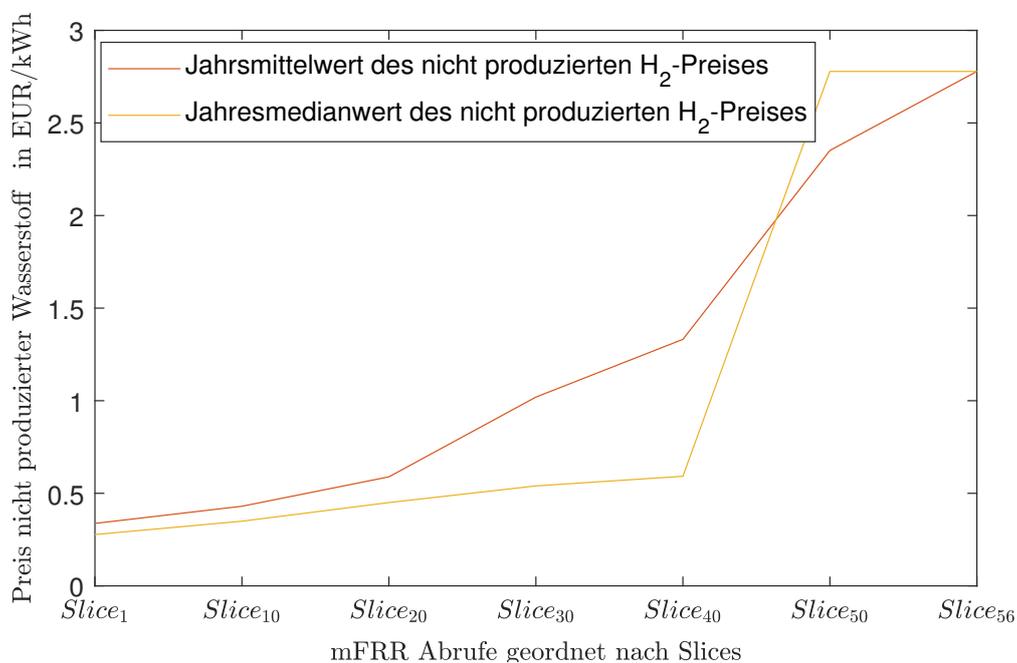


Abbildung 50: Preis des nicht produzierten Wasserstoffes in Abhängigkeit des betrachteten Slices. Quelle: Eigene Darstellung

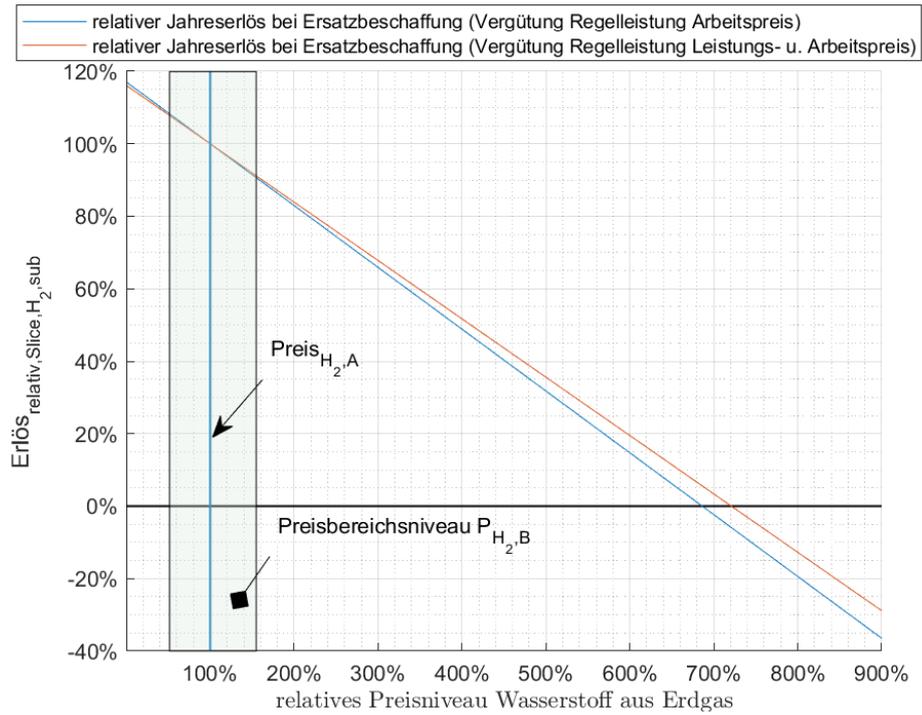


Abbildung 51: Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampferormation Slice 1. Quelle: Eigene Darstellung

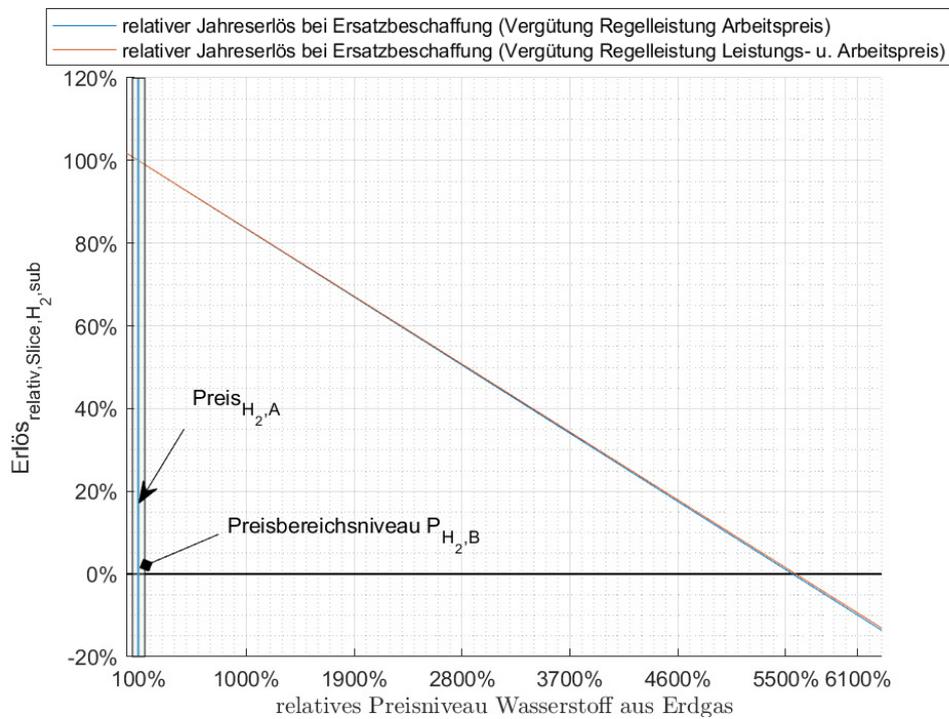


Abbildung 52: Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampferormation Slice 56. Quelle: Eigene Darstellung

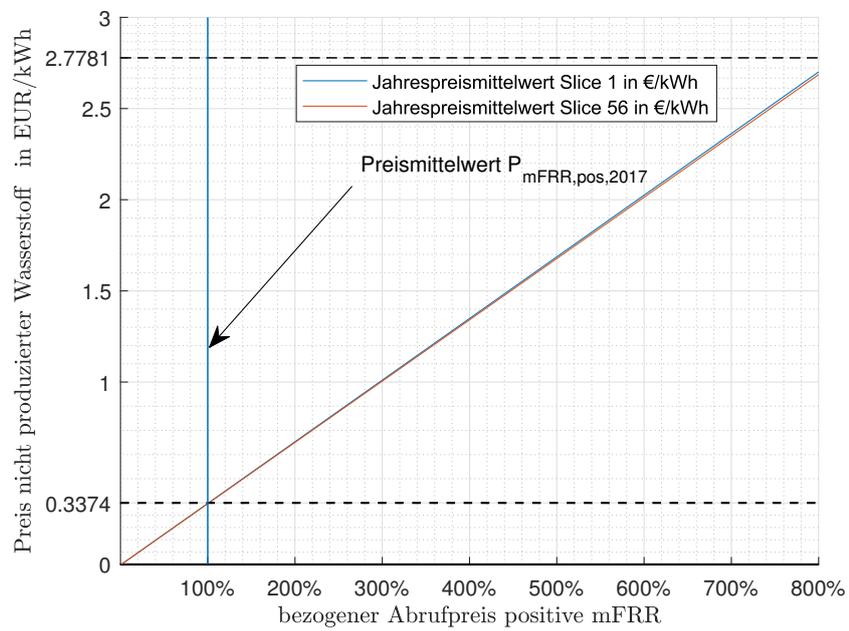


Abbildung 53: Preis des nicht produzierten Wasserstoffes bei Variation des Abrufpreises der Tertiärregelung. Quelle: Eigene Darstellung

5.6. Einsatz von PEM-Elektrolyseuren zur negativen Tertiärregelung

Das sich unter Abschnitt 5.4 für die oberen 150 MW und darüber hinaus einstellende Muster der negativen Sekundärregelleistung setzt sich auch bei der Tertiärregelung fort. Die Anzahl der Volllaststunden nimmt weiter ab. Eine Integration von Elektrolyseuren in den Tertiärregelmarkt ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wie im Leistungsbereich über 50 MW der Sekundärregelung nur über die Nutzung eines kleinen Teilbereichs der Leistungsbandbreite eines Elektrolyseurs möglich, der einem anderen Einsatzzweck als Regelleistungsbereitstellung dient.

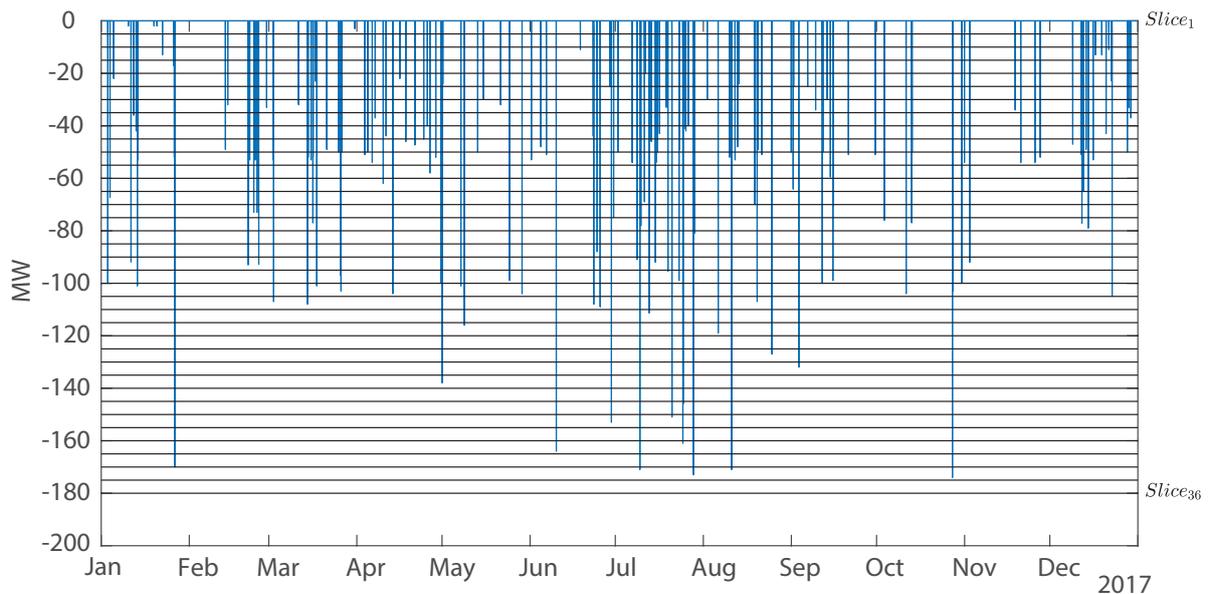


Abbildung 54: Einteilung der in Österreich abgerufenen Tertiärregelung in Streifen zu 5 MW. Quelle: Eigene Darstellung

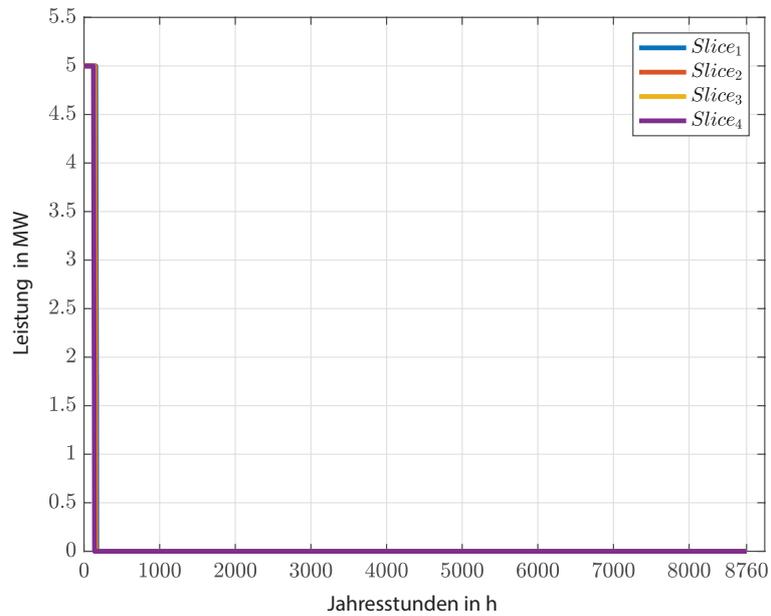


Abbildung 55: Einteilung der in Österreich abgerufenen Tertiärregelung in Streifen zu 5 MW. Quelle: Eigene Darstellung

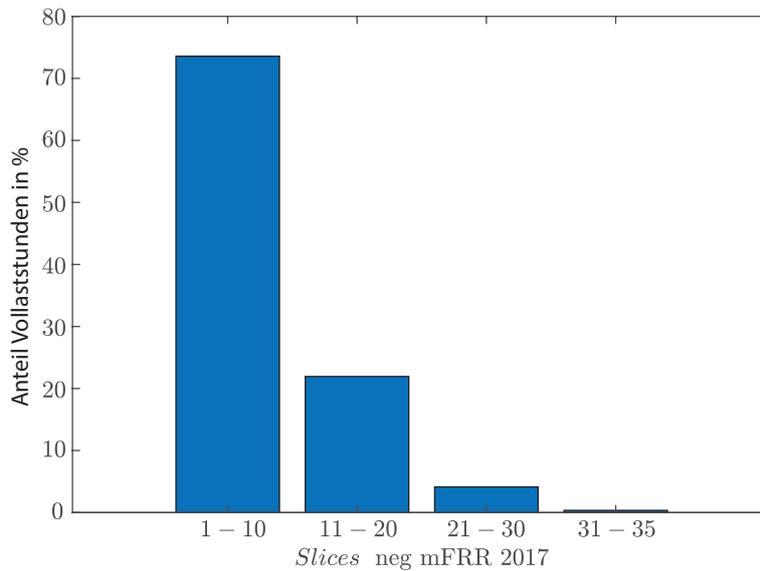


Abbildung 56: Verteilung der Volllaststunden über die Slices. Quelle: Eigene Darstellung

6. Regelleistung und Blindleistungsbereitstellung in einem Mittelspannungsnetz

Ergänzend zu den vorangegangenen Abschnitten wird in diesem Kapitel der Einsatz eines PEM-Elektrolyseurs zur lokalen Erzeugung von Wasserstoff bei gleichzeitiger Erbringung der Netzdienstleistungen negative Sekundärregelleistung und Blindleistungskompensation in einem Verteilnetz evaluiert.

6.1. Aufbau und Beschreibung des Beispielnetzes

Das betrachtete Netz ist ein 20 kV Mittelspannungsnetz und wird von einem österreichischen Verteilnetzbetreiber im ruralen Raum betrieben. Es ist über ein Umspannwerk mit dem vorgelagerten 110 kV Netz des Netzbetreibers verbunden. Topologisch besteht das Beispielnetz aus zwei radialen Netzsegmenten und fünf Ringstrukturen, die als geschlossene Ringe betrieben werden. Da das Netz über einen langen Zeitraum gewachsen ist, ergibt sich eine Vielzahl an verschiedenen Leitungs- und Kabeltypen, Herstellern und damit auch eine große Bandbreite an Betriebsparametern.

Tabelle 8: Daten des 20 kV Mittelspannungsnetzes

Anschluss Typ	Netzsegmente						
	Y_1	Y_2	Y_3Y_4	Y_5Y_6	Y_7Y_8	Y_9Y_{10}	$Y_{11}Y_{12}$
Leitungslänge in km	44	37	121	127	108	153	69
Freileitungsanteil in %	43,18	27,03	45,45	52,76	42,59	58,18	46,38
Kabelanteil in %	56,82	72,97	54,55	47,24	57,41	41,83	53,62

Die Speisung des Mittelspannungsnetzes erfolgt über einen 110/20 kV Transformator mit einer Nenn-Scheinleistung von 25 MVA. Der gesonderte Abgang W der Sammelschiene stellt die Verbindung zu einem Fremdnetz her. Das Fremdnetz dient der Anbindung eines Windparks bestehend aus sieben Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von jeweils 2 MW. Einspeisedaten des Windparks standen allerdings nicht zur Verfügung. Um auch die lokalen Erzeugungswerte des Windparks berücksichtigen zu können, wurde ein in rund 25 km Entfernung gelegener Windpark mit einer Erzeugungsleistung von 9 MW mit bekannten Einspeisedaten als Ersatzsystem verwendet. Die Messwerte des 9 MW Windparks wurden linear auf die installierte Leistung des 14 MW Windparks skaliert.

Mit Stand Oktober 2017 waren im angeschlossenen Niederspannungsnetz 5,286 MWp an Photovoltaikerzeugungsleistung installiert. Die Verteilung der PV-Anlagen über das Netzgebiet wird vom Netzbetreiber als näherungsweise gleich verteilt angegeben. Zur Ermittlung der Einspeiseleistung aus den verteilten Photovoltaikanlagen standen Daten zur Globalstrahlung der ZAMG für einen zentralen Standort innerhalb des Beispielnetzes im 10-

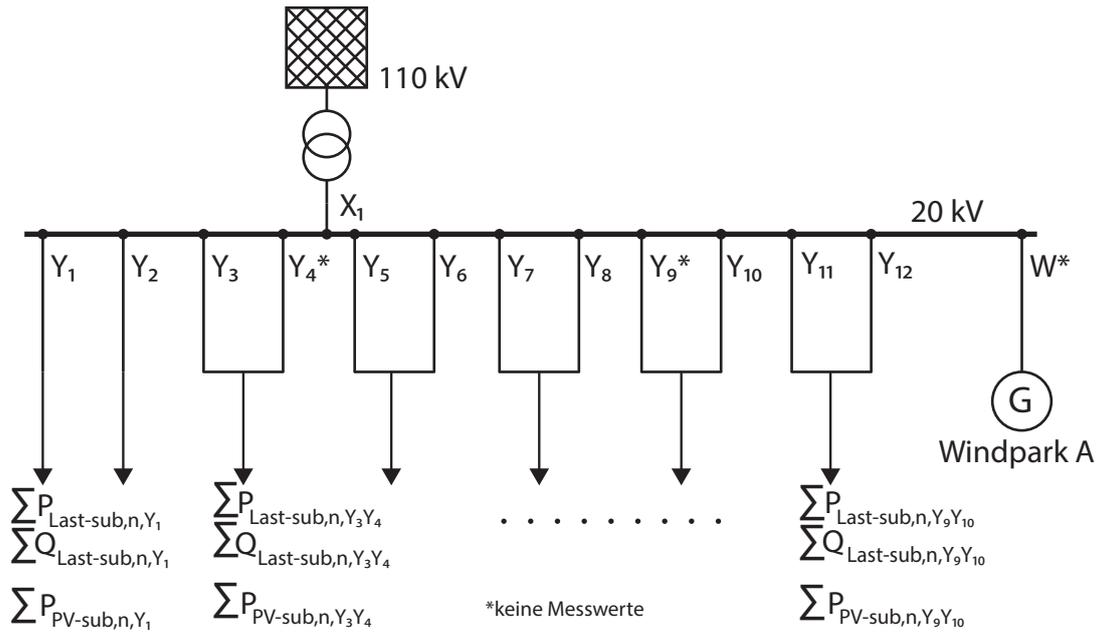


Abbildung 57: Vereinfachte Darstellung der Verschaltung des Beispielnetzes im Umspannwerk. Quelle: Eigene Darstellung

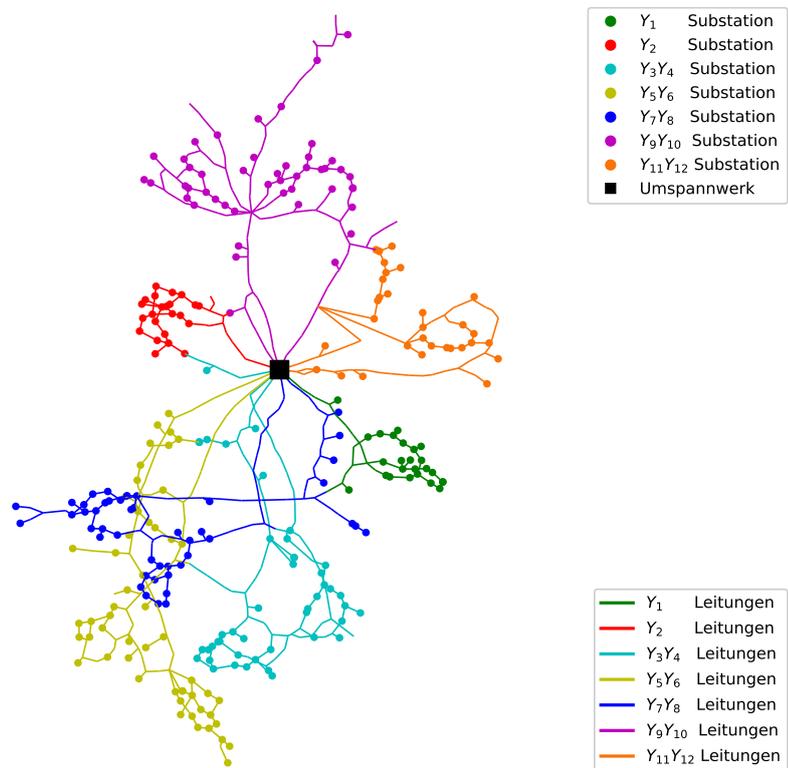


Abbildung 58: Topologische Darstellung der Leitungen und Ortsnetzstationen des Beispielnetzes. Quelle: Eigene Darstellung

min Zeitraster zur Verfügung. Für den selben zentralen Standort wurde der jahreszeitliche Verlauf des Umwandlungsfaktors von Globalstrahlung in eingespeiste elektrische Leistung aus [26] herangezogen.

Für die Bestimmung der installierbaren Kapazität eines Wasserstoffelektrolyseurs, der auch zur Netzfrequenzregelung eingesetzt werden soll, ist die maximal auftretende Verbrauchslast der maßgebliche Faktor. Zu diesem Zweck wurden Lastflussdaten zum Monat des historischen Verbrauchsmaximums bereitgestellt, Jänner 2017. Die Messdaten umfassen Wirk- und Blindleistung sowie Spannungen und Ströme in 15-minütigen Zeitmitteln an den Abgängen der Sammelschiene des Umspannwerkes.

6.2. Ein Argument für Elektrolyseure auf der Verteilnetzebene

Die Schwierigkeit, Elektrolyseure für Netzdienstleistungen und im Speziellen für die Aufbringung von Regelenergie weiträumig zu etablieren, liegt im Fehlen einer hoch verfügbaren, leistungsfähigen Verbrauchs- oder Einspeisesenke für den produzierten Wasserstoff. In Österreich ist neben dem elektrischen noch das Erdgasnetz großflächig verfügbar. Allerdings bereitet ein vorrangig für Heizzwecke ausgelegtes Energiesystem Schwierigkeiten, in den wärmeren Jahreszeiten auf Verteilnetzebene Energie in Form von Gas aufzunehmen. Siehe [51]. Entweder müsste die entstehende Lücke mit größeren lokalen Speichern überbrückt werden oder die Energiewandlung müsste über mehrere Monate ruhen. Damit sinken durch die verminderte Auslastung und das Ausbleiben der Regelenergieleistung die wirtschaftlichen Anreize, genannte Systeme in unteren Verteilnetzebenen zu betreiben.

Im Freien betriebene Landwirtschaft, mit ihrer natürlichen Saisonalität, bietet ein zur Heizsaison antizyklisches Verhalten. Die Aktivität und damit die Mobilität steigen im Frühjahr an, um nach einem Höhepunkt im Sommer und Frühherbst über den Spätherbst in eine winterliche Ruhephase überzugehen. Der Kraftstoffeinsatz in der Landwirtschaft bewegt sich bei etwa 248.732 Tonnen pro Jahr bzw. im Mittel 91 Liter pro Hektar, siehe [31]. Zuzüglich des Bedarfs für die Forstwirtschaft erreichen die in Summe 450.000 Tonnen Diesel nur etwa 8% des Dieserverbrauchs in Österreich. Die aktuellen Entwicklungen im Mobilitätssektor mit dem Ziel einer Dekarbonisierung tendieren zu Batteriespeichersystemen bei elektrifizierten PKWs und Klein-LKWs. Der Einsatz von schweren Maschinen und ein anderes Einsatzmuster als im Personenverkehr sprechen aber für einen Energiespeicher mit höherer Energiedichte im Agrarsektor. Aus erneuerbaren Energien gewonnenes Gas ist z.B eine Möglichkeit, die gewünschte Energiedienstleistung bereitzustellen.

Im durch das Beispielnetz versorgten Gebiet leben 29984 Menschen, die sich auf etwa 13000 Haushalte verteilen. Siehe [7]. Diese verteilen sich im Durchschnitt auf 2-3 Personenhaushalte. Das Gebiet wird durch ein Gasnetz versorgt. Da allerdings keine Daten zum Gasverbrauch vorliegen, wird der Verlauf aus [47] aus einer klimatisch und strukturell vergleichbaren Region anhand des durchschnittlichen Jahresverbrauchs von Haushalten skaliert.[14] Dabei wird eine vollständige Versorgung durch das Gasnetz unterstellt,

gleichzeitig aber die Bandbreite aus Gasverbrauchern in Wohnungen und Einfamilienhäusern abgebildet, wobei der Wohntyp Einfamilienhäuser im betrachteten Gebiet dominiert. Der dabei entstehende Fehler wird sich zu den Zeiten hoher Heizlasten niederschlagen. Wie sich zeigen wird ist der maßgebliche Faktor das Ausbleiben des Gasbedarfs im Sommer. Der zugehörige Jahresverlauf für den Erdgasverbrauch zu Heizzwecken ist in Abbildung 59 abgebildet. Der darin erkennbare Rückgang des Verbrauchs auf Null ab Juni, der auf den Daten aus [47] basiert, findet sich auch in [8] und in [51] und ist für untere Erdgasnetzebenen im ruralen Raum charakteristisch.

Für die jahreszeitliche Abhängigkeit des Treibstoffverbrauches in der Landwirtschaft wurden keine umfassenden Daten in der Literatur gefunden. In [41] wird aber der über die Jahre 2013-2016 ermittelte Wert des Kraftstoffverbrauchs eines Agrarbetriebes in Sachsen angegeben. Die klimatischen Bedingungen zwischen Neukirch in Sachsen und dem Gebiet des Beispielnetzes sind vergleichbar. Die darin publizierte Verbrauchskennlinie wird mit Hilfe des Jahresverbrauchs an Diesel, wie er in Tabelle 10 aufgelistet ist, skaliert. Der sich daraus ergebende Verbrauch wird in Abbildung 59 dargestellt. Einschränkend sollte dabei angemerkt werden, dass die ermittelte Linie nur auf einen Betrieb und damit eine Art der Landwirtschaft beruht. Unterschiedliche Produkte erfordern unterschiedliche zeitliche Abfolgen in den Produktionsabläufen und können die Charakteristik beeinflussen.

Werden beide Linien kombiniert, so entsteht ein Summenverbrauch, der die Verbrauchslücke im Sommer schließt. Es bildet sich ein Korridor mit einem Minimum von 3,79 MWh/h. Der Verbrauch erreicht im Sommer noch ein Maximum von 10,22 MWh/h und damit ein noch höheres Potential, das sich mit Gastreibstoff aus Elektrolyseuren erschließen ließe. Im Winter liegt das Potential nochmals um den Faktor 10 höher. In weiterer Folge wird aber vom Minimum ausgegangen, da sich im Sektor Landwirtschaft auch die Erzeugung von Biogas anbietet das in der Lage ist den höheren Bedarf abzudecken. Der Energiebedarf in der Landwirtschaft beruht auf der Dieselsechnologie. Alternative Antriebssysteme wie Brennstoffzellen oder Gasturbinen sowie die traditionelle, allerdings mit Gas betriebene Verbrennungskraftmaschine weisen andere, teils bessere Wirkungsgrade auf. Es wird trotzdem der Energiebedarf auf Dieselbasis bzw. der Ersatz der Energiemenge als Arbeitsgrundlage beibehalten.

Tabelle 9: Daten zum landwirtschaftlichen Dieselbedarf im vom Beispielnetz versorgten Gebiet

Anbaufläche Landwirtschaft in ha	Dieserverbrauch in l/Jahr	Dieserverbrauch Landwirtschaft in MWh/Jahr
36467,94	3318582,99	34513.26

Tabelle 10: Daten zum landwirtschaftlichen Dieselbedarf im vom Beispielnetz versorgten Gebiet

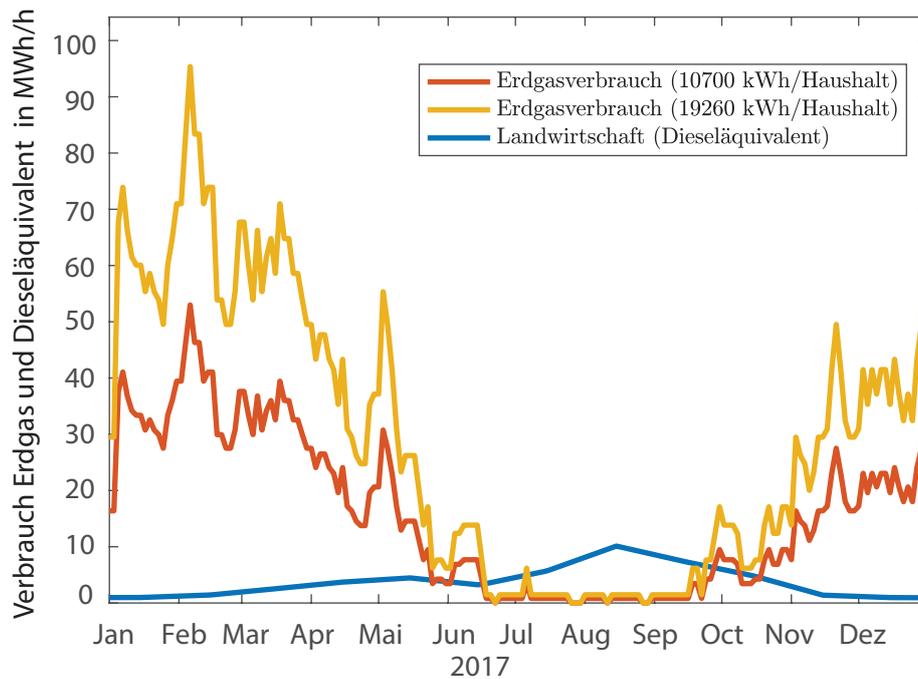


Abbildung 59: Vergleich des Erdgasverbrauchs und des Dieselkraftstoffverbrauchs in der Landwirtschaft in der Region des Beispielnetzes. Quelle: Eigene Darstellung

6.2.1. Ergebnisse des Betriebs im Beispielnetz

Mit dem unter Punkt 4.4 ermittelten Wirkungsgrad von 58% des PEM-Elektrolyseurs ergibt sich zur stetigen Produktion von 3,79 MWh/h an Wasserstoff eine elektrische Nennleistung des Elektrolyseurs von 6,53 MW. Wird der unter Kapitel 5.4 eingesetzte Elektrolyseur mit einer Einzelstackleistung von 1,1 MW auf eine Nennleistung von 7,7 MW durch Hinzufügen weiterer Stacks skaliert, verbleibt eine für negative Regelleistung einsetzbarer Bereich von 15,2% der Nennleistung oder 1,17 MW. 1 MW an Leistung des Elektrolyseurs wird einem Regelleistungspool zur Verfügung gestellt, der den Abrufen eines *Slice* folgt.

Abbildung 60 stellt die Ergebnisse dar. Der Unterschied zwischen dem *Slice*₁₁ und *Slice*₂₀ in Bezug auf die erzeugte Menge Wasserstoff ist gering. Der *Slice*₂₀ produziert 98,37% der Menge des *Slice*₁₁ von 34,6 GWh bzw. $1040 \cdot 10^3$ kg. Zum Vergleich: Die *Slices* 2,3 und 4 in Abbildung 45 erzeugen mit drei 5 MW Systemen bzw. einem gleichwertigen 15 MW System eine in Summe ähnliche Menge Wasserstoff – allerdings ausschließlich aus Regelleistung. Dabei müssen aber auch bis zu 15 MW elektrischer Leistung aufgenommen werden.

Von der Erzeugung des Windparks verbleibt nur noch ein Überschuss von 16,3%, der lokal verbraucht werden oder ins 110kV Netz zurückgespeist werden kann. Die zum Betrieb des Elektrolyseurs notwendige Energie kann nur zu 34,4% aus dem Windpark gedeckt werden; der Rest muss aus dem 110kV Netz zugeführt werden. Das bediente Niveau der Regelleistung hat auf den Bezug keinen Einfluss. Das Verhältnis bleibt für alle *Slices* bei

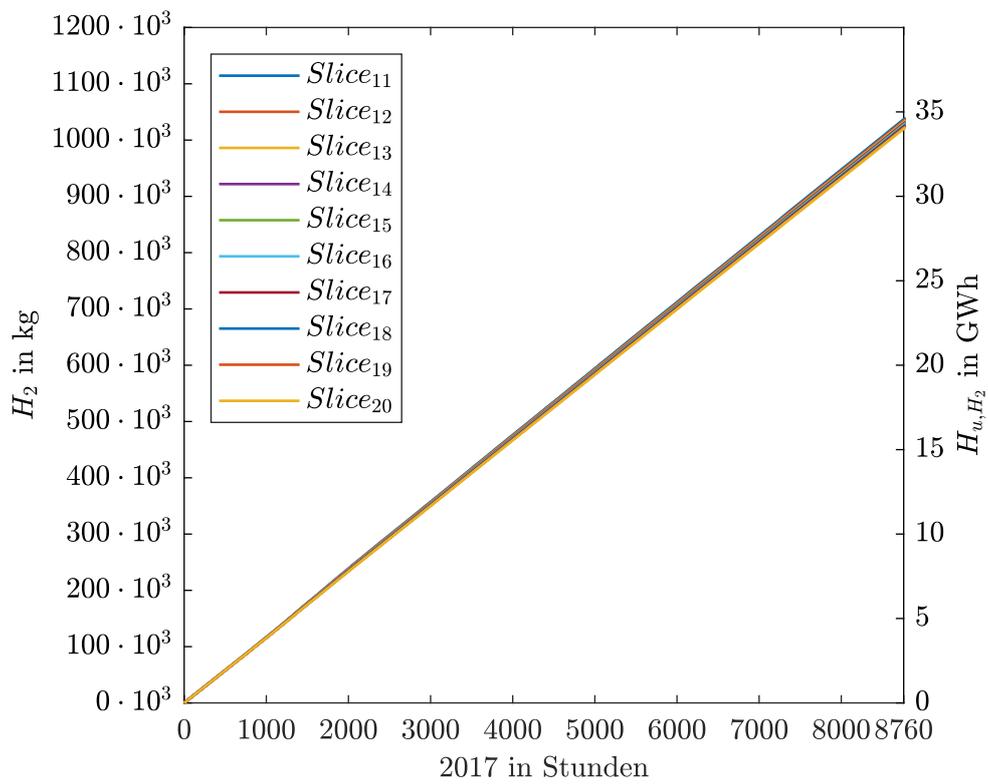


Abbildung 60: Erzeugte Menge Wasserstoff bei Erfüllung der *Slices* elf bis zwanzig negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung

34,4%. Wird zusätzlich die Photovoltaik einbezogen, steigt die lokale Deckung auf 42,1%. Der verfügbare Rest an lokaler Energie aus Photovoltaik und Wind beträgt 16,6%. Die Regelleistung hat auch hier keinen Einfluss auf das Ergebnis.

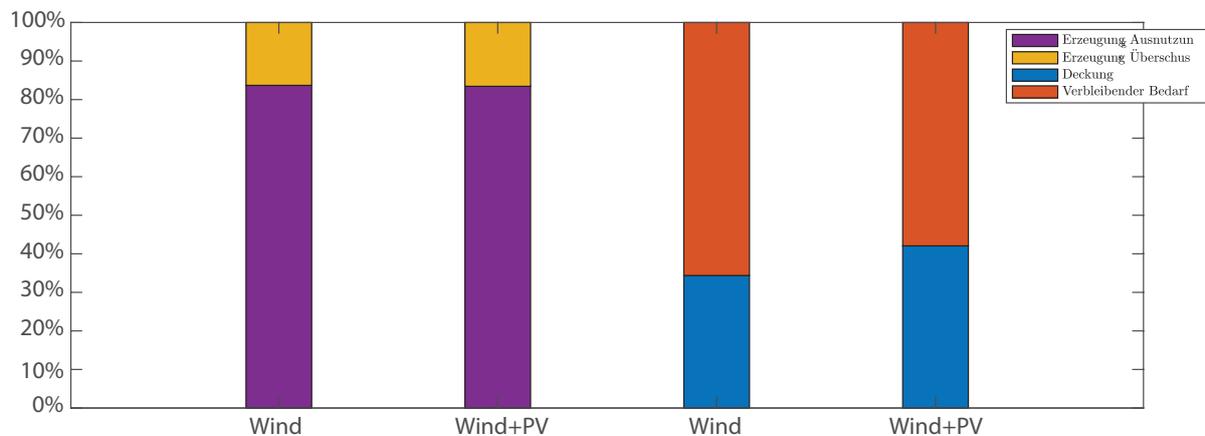


Abbildung 61: Vergleich der Deckung des Elektrolyseurbedarfs durch Wind mit Wind zuzüglich Photovoltaik inklusive Regelleistung $Slice_{11}$ Quelle: Eigene Darstellung

6.3. Blindleistungsbereitstellung im Verteilnetz

Neben der Einsatzmöglichkeit als Regelleistungsanbieter können diese mit einer geeigneten Leistungselektronik ausgestatteten Geräte auch positive und negative Blindleistung liefern. Fällt der Betriebsstandort des Elektrolyseurs mit einem Standort mit Blindleistungsbedarf zusammen, so ergibt sich ein zusätzlich nutzbares Anwendungspotential. Im vorliegenden Fall des Verteilnetzes erreicht der Leistungsfaktor aufgrund der schwach ausgelasteten Kabelleitungen Minimalwerte bis zu 0.2 p.u., siehe Abbildung 62. Um die nachteiligen Auswirkungen der Bereitstellung von Blindleistung über die Active Frontend Leistungselektronik des Elektrolyseurmodelles auf den Betrieb der Wasserstoffherzeugung abzuschätzen, wird der Q-Regelung des Elektrolyseurs der gemessene Blindleistungsbedarf des Verteilnetzes am Umspannwerk als Sollwert vorgegeben. Die Blindleistungsdienstleistung erfolgt für den Monat Jänner 2017 neben dem wie im vorigen Punkt simulierten Einsatz als Wasserstoffgenerator und Regelleistungsbereitsteller.

Der Verlust an erzeugtem Wasserstoff durch den schlechteren Wirkungsgrad erreicht 0,71% am Ende des Monats Jänner im Vergleich zum Einsatz ohne Blindleistungserzeugung. Der Wirkungsgrad des Active Frontend pendelt dabei zwischen 0,94 und 0,96 und weicht dabei 0,5 bis 2% vom unkompenzierten Betrieb ab, siehe Abbildung 65

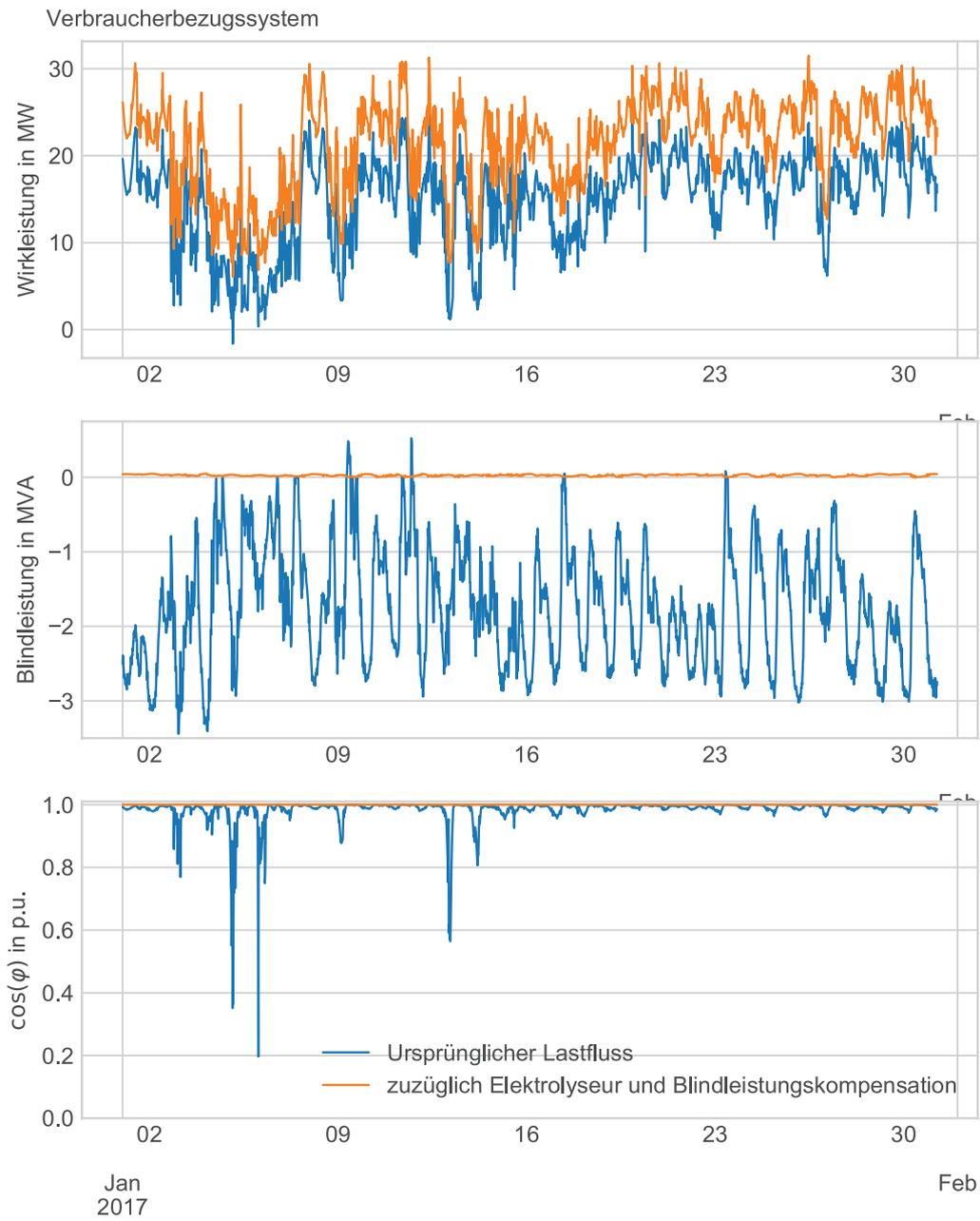


Abbildung 62: Ergebnis der Blindleistungskompensation bei Regelleistung $Slice_{11}$. Quelle: Eigene Darstellung

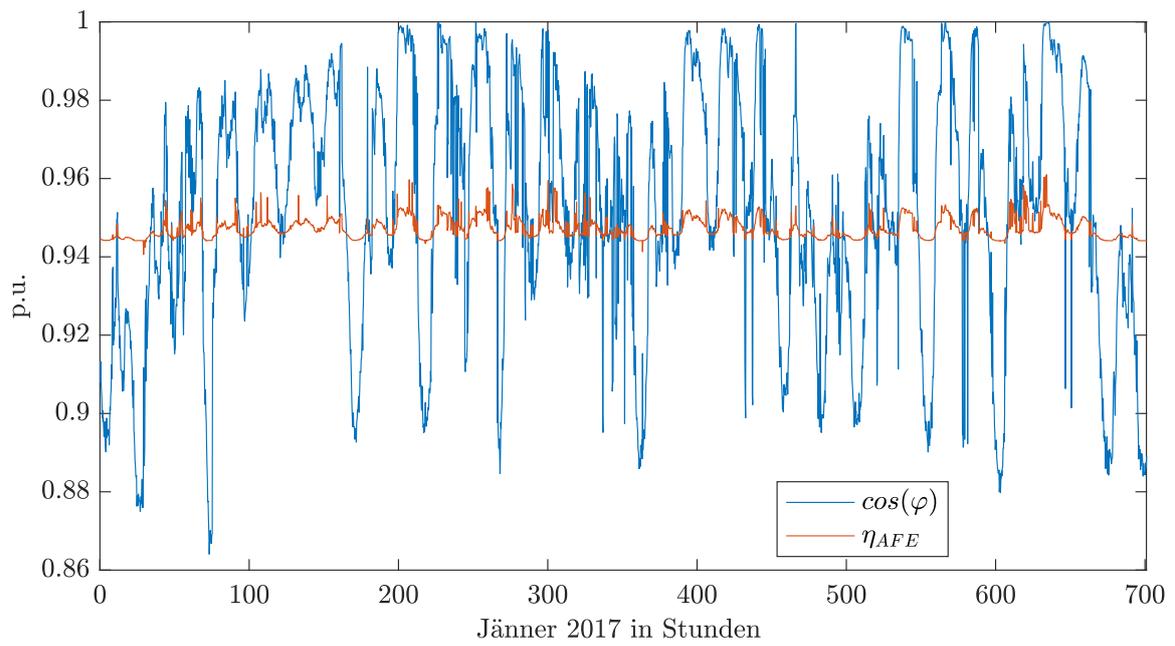


Abbildung 63: $\cos(\varphi)$ und Wirkungsgrad der Leistungselektronik bei der Blindleistungskompensation Regelleistung *Slice*₁₁ Quelle: Eigene Darstellung

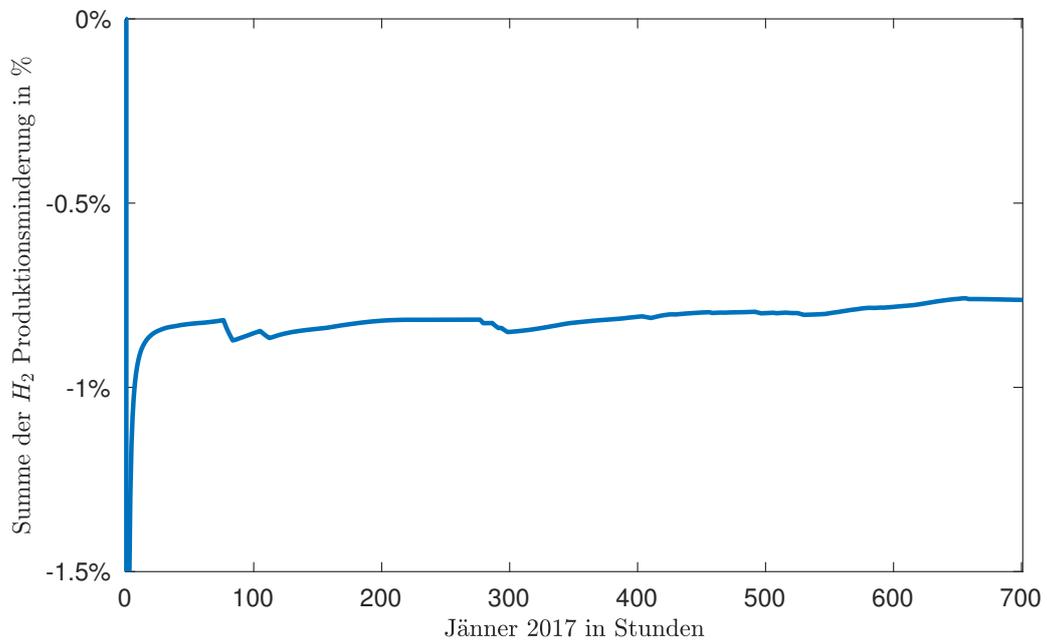


Abbildung 64: Verlauf des Verlustes an Wasserstoffproduktion durch die Blindleistungskompensation. Quelle: Eigene Darstellung

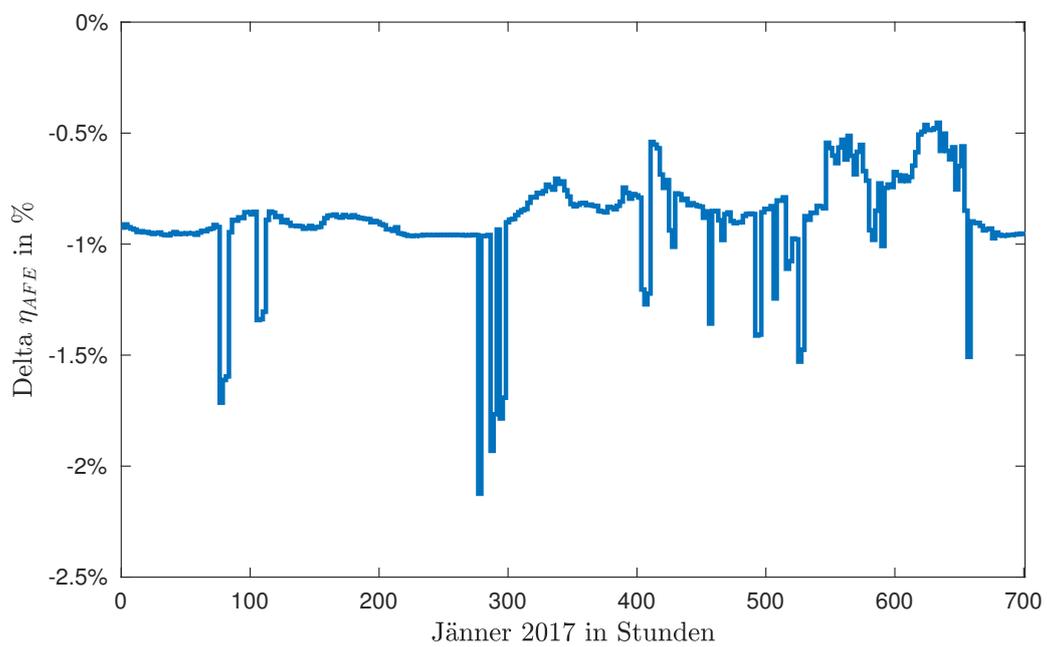


Abbildung 65: Abweichung des Leistungselektronikwirkungsgrades durch die Blindleistungskompensation. Quelle: Eigene Darstellung

7. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der Einsatz von Elektrolyseuren zu Regelleistungszwecken. Die aktuell Marktreife erlangenden PEM-Elektrolysesysteme zeichnen sich durch ein dynamisches Betriebsverhalten aus. Insbesondere die Fähigkeit innerhalb von Minuten aus dem ausgeschalteten Zustand bis zur Nennleistung hochgefahren werden zu können, macht diese Geräte attraktiv, um unvorhergesehene Überschüsse im elektrischen Energiesystem zu absorbieren. Diese Eigenschaft deckt sich mit dem Anforderungsprofil der negativen Sekundär- und Tertiärregelung. Allerdings zeigt sich bei Betrachtung des Jahres 2017, dass im Fall der Sekundärregelung die anfallende Energiemenge im unteren Viertel des 200 MW breiten negativen Sekundärregelbandes konzentriert ist. Die relativ kleinen Abweichungen dominieren über den Jahresverlauf gesehen. 68,6 % entfallen auf Abrufe in der Höhe 0-50 MW und 45,2 % auf den Bereich 0-25 MW. Der Bereich, in dem Elektrolyseure ausschließlich mit negativer Sekundärregelung betrieben werden können, ist aus wirtschaftlichen Gründen schnell erschöpft. Nur der Bereich 0-25 MW erreicht 3000 Volllaststunden oder mehr. Jene Leistungen, die darüber hinaus gehen, sollten deshalb durch Elektrolyseure abgedeckt werden, die vorrangig Wasserstoff zu anderen Zwecken produzieren. Das Muster der geringen Energiemengen bzw. Volllaststunden setzt sich bei der negativen Tertiärregelung fort. Die im Jahr 2017 ausgeschriebene negative Tertiärregelung von 180 MW lässt sich wirtschaftlich ebenfalls nur als Teil eines für andere Zwecke genutzten Elektrolyseurparks realisieren.

Geht man dagegen vom Einsatzmuster einer über lange Zeiträume kontinuierlichen Wasserstoffproduktion aus, ermöglicht dies den Einsatz des Elektrolyseursystems als Anbieter positiver Regelleistung. Der Verzicht auf die Produktion von Wasserstoff im Fall eines positiven Regelleistungsabrufes folgt dem Gedanken, das wirtschaftliche Ergebnis des Elektrolyseurbetriebs durch die Bereitstellung von Flexibilität in der Leistungsaufnahme zu verbessern. Eine Auswertung des Preisniveaus der positiven Sekundärregelung liefert eine mittlere Vergütung von 0,146 €/kWh im Jahr für den Bereich der häufigsten Abrufe. Im Vergleich dazu liegt das Preisniveau für Wasserstofferzeugung mittels Erdgas bei rund 0,05 €/kWh. Angesichts dieses Preisverhältnisses stellt sich allerdings die Frage, wie sich die Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse durch PEM-Geräte wirtschaftlich betreiben lässt, wenn die Kosten für das zu ersetzende Produkt aus alternativer Produktion deutlich geringer sind.

Sofern sich positive Blindleistung mit Elektrolyseuren realisieren lässt und die hohe Dynamik der PEM-Elektrolyseure eingesetzt wird, kann auch Primärregelung angeboten werden. Die erreichbaren Leistungsgradienten von 0,1 MW/s erfüllen die Anforderungen der Primärregelung. Die Vergütung der Primärregelleistungsdienstleistung muss dabei die höheren Kapitalkosten für Geräte größerer Leistungen mit geringerer Auslastung tragen. Die gute Eignung der Überlastfähigkeit der PEM-Elektrolyseure ermöglicht in Verbindung mit der EU-Verordnung 2017/1485, Artikel 156, zum Einsatz von speicherbegrenzten Systemen für die Erbringung von Primärregelung eine Verringerung der notwendigen Nennleistung um bis zu 20,45% bei gleichbleibender präqualifizierter Primärregelung. Alternativ lassen sich die produzierte Menge Wasserstoff und damit die

Auslastung um bis zu 41,19% steigern. Die angesprochene EU-Verordnung lässt sich auch auf den Einsatz von Elektrolyseuren zur Primärregelung mit eingeschränktem Arbeitsvermögen aufgrund beschränkter Wasserstoffgasspeicherung anwenden. Die Anforderungen sind sich recht einfach mit Gasspeichern ausreichender Größe zu erreichen, allerdings setzt ein solcher Betrieb Nachladestrategien voraus, die jenen von Batteriespeichersystemen gleichen.

Die Eigenschaft der PEM-Elektrolyseure große elektrische Leistungen flexibel aufzunehmen, macht sie für deren Einsatz als Regelleistungsanbieter attraktiv. Dabei sollte allerdings nicht die Möglichkeit außer Acht gelassen werden, die Elektrolyseure mit geeigneter Leistungselektronik zusätzlich auch als Blindleistungsanbieter einzusetzen und damit die Nutzung der Investition zu erhöhen.

Literatur

- [1] Amela Ajanovic. „On the economics of hydrogen from renewable energy sources“. Diss. Technische Universität Wien, 2006.
- [2] Christian Alács. „Bereitstellung von schneller Regelleistung und Momentanreserve durch Batteriespeicher“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 30. Sep. 2016. URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC13469324> (besucht am 15.05.2018).
- [3] APG. *Ausschreibungsplattform*. URL: <https://www.apg.at/emwebapgrem/startApp.do>.
- [4] APG. *Preisbericht Regelleistungsmarkt 2017-2018*. Austrian Power Grid, 2018. URL: <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung/marktforum>.
- [5] APG. *Rahmenvertrag Sekundärregelung (Fassung 01.02.2017)*. 1. Feb. 2017. URL: <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung/sekundaerregelung/ausschreibungen>.
- [6] APG. *Statistik der Netzregleung in der Reglezone APG*. URL: <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung/statistik>.
- [7] Statistik Austria. „Statistik des Bevölkerungsstandes Österreichs 2017“. In: (2017). URL: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/index.html (besucht am 31.03.2018).
- [8] Haslinger Belinda. „Biogaseinspeisung – Anforderungen an das Gasnetz“. Magisterarb. FH Joanneum Kapfenberg, 2004.
- [9] Riederer Michael Brückl Oliver Haslbeck Matthias. *Zukünftige Bereitstellung von Blindleistung und andere Maßnahmen für die Netzsicherheit*. INA - Institut für Netz- und Anwendungstechnik GmbH, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 9. Sep. 2016. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/zukuenftige-bereitstellung-von-blindleistung-und-anderen-massnahmen-fuer-die-netzsicherheit.pdf> (besucht am 10.05.2018).
- [10] International Electrotechnical Commission. *IEC60034-30-1: Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors*. Norm. I, 2014.
- [11] Christophe Coutanceau, Stève Baranton und Thomas Audichon. „Hydrogen Electrochemical Production“. In: *Hydrogen Electrochemical Production*. Hrsg. von Christophe Coutanceau, Stève Baranton und Thomas Audichon. Hydrogen Energy and Fuel Cells Primers. Academic Press, 2018. ISBN: 978-0-12-811250-2. DOI: 10.1016/B978-0-12-811250-2.00001-7. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128112502000017>.
- [12] Deutsche Energie-Agentur GmbH. „dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien.“ In: (11. Feb. 2014). URL: http://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9094_dena-Studie_Systemdienstleistungen_2030.pdf (besucht am 09.05.2018).

- [13] e-control. „Tor Teil B: Technische Regeln für Netze mit Nennspannung $\geq 110\text{kV}$ Version 2.0“. In: (2008). URL: <https://www.e-control.at/documents/20903/26585/tor-b-20081027-v2.pdf/f48873d7-3b43-4eb1-a656-947e267c1934> (besucht am 09.05.2018).
- [14] e-control. *Wie hoch ist mein durchschnittlicher Gasverbrauch?*. Hrsg. von e-control. 2004. URL: <https://www.e-control.at/documents/20903/26157/durchschnittlicher-gasverbrauch.pdf/f49a8d49-8f97-42bb-b00c-d0ce0016ad11> (besucht am 28.04.2018).
- [15] ENTSO-E. *Continental Europe Operation Handbook Policy P1 Load-Frequency Control and Performance*. 12. März 2009. URL: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_final.pdf (besucht am 09.05.2018).
- [16] Manuel Espinosa-López u. a. „Modelling and experimental validation of a 46 kW PEM high pressure water electrolyzer“. In: *Renewable Energy* 119 (2018), S. 160–173.
- [17] Andreas Fleischhacker. „Modelling and combined simulation of a Power-to-Gas process“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2013. URL: http://catalogplus.tuwien.ac.at/UTW:UTW:UTW_alma2164122750003336 (besucht am 12.05.2018).
- [18] R. Garcia-Valverde, N. Espinosa und A. Urbina. „Simple PEM water electrolyser model and experimental validation“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 37.2 (21. Jan. 2011), S. 1927–1938. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.09.027.
- [19] Agata Godula-Jopek. *Hydrogen production: by electrolysis*. John Wiley & Sons, 2015.
- [20] Vielstich W. Hamann C. *Elektrochemie*. Wiley-VCH, 2015. ISBN: 978-3-527-31068-5.
- [21] Peter Huang. „Humidity Standard of Compressed Hydrogen for Fuel Cell Technology“. In: *The Electrochemical Society* 12 (1 2008), S. 479–484. DOI: 10.1149/1.2921574.
- [22] Peter H. Huang. „Humidity Standard of Compressed Oxygen for Future Generation PEM Fuel Cells“. In: *The Electrochemical Society* 17 (1 2009), S. 393–399. DOI: 10.1149/1.3142768.
- [23] Betancour A. Hydrogenics. *Harvesting surplus electricity for 'Power to Gas'*. 2016. URL: <http://www.h2gta.ca/wp-content/uploads/2015/11/Power-to-Gas-Hydrogenics-A-Betancour.pdf> (besucht am 19.05.2018).
- [24] Hiroshi Ito u. a. „Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (17 2011), S. 10527–10540. ISSN: 0360-3199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.127.
- [25] Johannes Kochems. „Blindleistungserbringung im zukünftigen bundesdeutschen Stromsystem: Technische Alternativen und energiewirtschaftliche Umsetzungsmöglichkeiten“. In: 11. Feb. 2016. URL: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session_C4/LF_Kochems.pdf (besucht am 15.05.2018).
- [26] Europäische Kommission. *Photovoltaic Geographical Information System*. URL: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html.

- [27] Europäische Kommission. „Verordnung 2017/1485: Festlegung einer Leitlinie für den Übertragungsnetzbetrieb“. In: (2. Aug. 2017). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/1485/oj>.
- [28] M Kopp u. a. „Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42.19 (2017), S. 13311–13320.
- [29] Rodney L LeRoy, Christopher T Bowen und Donald J LeRoy. „The thermodynamics of aqueous water electrolysis“. In: *Journal of The Electrochemical Society* 127.9 (1980), S. 1954–1962.
- [30] Harald Miland. „Operational experience and control strategies for a stand-alone power system based on renewable energy and hydrogen“. Diss. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Trondheim, 2005. URL: <http://hdl.handle.net/11250/248740> (besucht am 13.05.2018).
- [31] Gerhard Moitzi. *Kraftstoffeffizienz in der Pflanzenproduktion*. 24. Nov. 2005. URL: http://www.dib.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/PF-BioLandwirtschaft/pubs/ProdSys/2005_Kraftstoffeffizienz_in_der_Pflanzenproduktion_OEKL.pdf.
- [32] Patrick T Moseley und Jürgen Garche. *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing*. Newnes, 2014.
- [33] Mario Nikowitz. „Konzeptionierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Netzumrichters für einen Laborprüfplatz“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2016.
- [34] Atkins Peter und de Paula Julio. *Physikalische Chemie*. Wiley VCH, 1786. ISBN: 9783527332472.
- [35] C. Philibert. „Producing ammonia and fertilizers: new opportunities from renewables“. In: (1. Okt. 2017). URL: <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2017/06/Producing-ammonia-and-fertilizers-new-opportunities-from-renewables.pdf>.
- [36] *Power to Gas – eine Systemanalyse*. Johannes Kepler Universität Linz, Montanuniversität Leoben, Technische Universität Wien, 2014. URL: https://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/projekte/PtG/Endbericht_-_Power_to_Gas_-_eine_Systemanalyse_-_2014.pdf.
- [37] Proton on Site. *M Series Hydrogen Generation Systems. Technical Specifications*. 13. Apr. 2018. URL: https://www.protononsite.com/sites/default/files/2018-04/PD-0600-0119_rev_a.pdf (besucht am 13.05.2018).
- [38] Marc Melaina Sara Dillich Todd Ramsden. „Hydrogen Production Cost Using Low-Cost Natural Gas“. In: *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record* 12024 (24. Sep. 2012). URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/12024_h2_production_cost_natural_gas.pdf (besucht am 16.06.2018).
- [39] Maximilian Schalenbach u. a. „Acidic or alkaline? Towards a new perspective on the efficiency of water electrolysis“. In: *Journal of The Electrochemical Society* 163.11 (2016), F3197–F3208.

- [40] Maximilian Schalenbach u. a. „Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover“. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 38.35 (2013), S. 14921–14933.
- [41] Grope, Johan Scholwin, Frank. *Durchführbarkeitsstudie - Biogas als Kraftstoff aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen in Neukirch/Lausitz*. Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie, Weimar, 2017. URL: https://www.biogasundenergie.de/downloads/scholwin_publication_132.pdf.
- [42] Dirk Schönberger. *Hydrogen @ Siemens CO₂-freie Wasserstoffherzeugung mit Elektrolyse, ein wesentlicher Baustein für die Energiewende und die Dekarbonisierung der Industrie oder „Strom gibt Gas“*. Hrsg. von 14. Symposium Energieinnovation Graz. 17. Juni 2018. URL: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/pr/Stream_G/Session_G5/PR_Schoenberger.pdf.
- [43] Adolf J. Schwab. *Elektroenergiesysteme 3. Auflage*. Springer-Verlag, 2012.
- [44] Siemens Hydrogen Solutions. *Siemens Silyzer 300. The next paradigm of PEM electrolysis*. Produktbroschüre. 12. Apr. 2018. URL: https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/corporate-core/sustainable_energy/hydrogensolutions/brosch%C3%BCren/ct-ree-18-047-db-silyzer-300-db-de-en-rz.pdf (besucht am 13.05.2018).
- [45] D Stolten und B Emonts. *Hydrogen Science and Engineering*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. ISBN: 978-3-527-33238-0.
- [46] Arcola Theatre und Ceres Power. „Hydrogenics wraps up Ontario utility-scale grid stabilization trial“. In: *Fuel Cells Bulletin* (7 2012), S. 9. DOI: 10.1016/S1464-2859(11)70221-8. (Besucht am 12.05.2018).
- [47] Matthias Theißing. *Biogas Einspeisung und Systemintegration in bestehende Gasnetze - Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft*. FH Joanneum Kapfenberg. 2006.
- [48] Geert Tjarks. *Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie und Umwelt*. Bd. 366: *PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen*. 12. Jan. 2017. ISBN: 978-3-95806-217-7. URL: <http://hdl.handle.net/2128/14724> (besucht am 14.04.2018).
- [49] Deutsche Übertragungsnetzbetreiber. *Anforderungen an die Speicherkapazität bei Batterien für die Primärregelleistung*. 29. Sep. 2015. URL: <https://www.regelleistung.net/ext/download/anforderungBatterien> (besucht am 16.06.2018).
- [50] Deutsche Übertragungsnetzbetreiber. *Eckpunkte und Freiheitsgrade bei der Erbringung von Primärregelleistung*. 3. Apr. 2015. URL: <https://www.regelleistung.net/ext/download/eckpunktePRL> (besucht am 16.06.2018).
- [51] Marco Wiederin. *Auswirkungen vom Gasnetz auf eine Power-to-Gas Anlage bzw. das Stromnetz*. Wien, Techn. Univ., Dipl.-Arb., 2014, 2014. URL: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC11644182> (besucht am 27.04.2018).

Abbildungsverzeichnis

1.	Anteil der Erzeugungstechnologien an der installierten Gesamtleistung in Österreich. Quelle: Eigene Darstellung nach Daten der e-contro)	1
2.	Anforderung an die Blindleistungskapazität für Erzeugungsanlagen an Netzen mit Spannungen $\geq 110kV$. Quelle:[13]	2
3.	Grundprinzip Elektrolyseurzelltypen: a) Alkali b) PEM-EL c) Hochtemperatur. Quelle: Eigene Darstellung nach [19] und [11]	9
4.	Vereinfachtes Schema eines PEM-Elektrolyseur Systems. Quelle: Eigene Darstellung nach [32] und [48]	12
5.	Vereinfachte Blockdarstellung des Elektrolyseurmodelles. Quelle: Eigene Darstellung	15
6.	Die für dieses Modell resultierende Zell-Polarisationskurve. Quelle: Eigene Darstellung	19
7.	Grundlegender Aufbau der Leistungselektronik und Netzanbindung. Quelle: Eigene Darstellung	25
8.	Digramm zur d,q Transformation. Quelle: Eigene Darstellung	26
9.	Struktur der P,Q Regelung des AFE (Äußerer Regelkreis). Quelle: Eigene Darstellung	28
10.	Hysteres-Zweipunktregelung für die Ströme $I_{U,V,W}$. Quelle: Eigene Darstellung	29
11.	Prinzipdarstellung des resultierenden Stromes $I_{U,ist}$ mit Hysteresesteuerung. Quelle: Eigene Darstellung	29
12.	Simulationsergebnisse Wirkungsgrad AFE für verschiedene Werte $\cos(\varphi)$ bei steigender Scheinleistung. Quelle: Eigene Darstellung	31
13.	Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Wirk- und Blindleistung. Quelle: Eigene Darstellung	32
14.	Der Gesamtsystemwirkungsgrad von 1 MW Elektrolyseursystemen mit unterschiedlichem Druck und Membranflächen. Quelle: Eigene Darstellung . .	33
15.	Verlauf der Elektrolyseuranschlussleistung beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung	36
16.	Verlauf der Stackspannung beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung	36
17.	Verlauf der Summe der beiden Stackströme beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung	37
18.	Verlauf der Temperatur im Elektrolyseursystem beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung	37
19.	Verlauf des Druckes Kathodenseitig beim Hochfahren zum FCR-Betrieb. Quelle: Eigene Darstellung	38
20.	Verlauf des Wasserstoffausstosses nach der kathodenseitigen Druckregelung. Quelle: Eigene Darstellung	38
21.	Abrufe der Primärregelleistung in Österreich bzw. der Regelzone APG 2017. Quelle: Eigene Darstellung nach Daten der APG	39
22.	Wasserstofferzeugung mit Primärregelbeteiligung ± 1 MW 2,2 MW PEM-Elektrolyseur. Quelle: Eigene Darstellung	40

23.	Verlauf der Stacktemperatur, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz zur Bestimmung des maximalen 15-Minuten Arbeitspunktmaximums des 2,2 MW Elektrolyseurs Quelle: Eigene Darstellung	44
24.	Verlauf der Stacktemperatur, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz zur Bestimmung des maximalen 30-Minuten Arbeitspunktmaximums des 2,2 MW Elektrolyseurs Quelle: Eigene Darstellung	45
25.	Mögliche Erhöhung des Arbeitspunktes in Abhängigkeit der geforderten Mindestzeit speicherbegrenzter Primärregelung Quelle: Eigene Darstellung	46
26.	Verlauf der Stacktemperatur, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz beim Doppelhöckertest des 2,2 MW Elektrolyseurs (Arbeitspunkt 1,81 MW, 15-Minutenkonfiguration) Quelle: Eigene Darstellung	47
27.	Mögliche Verkleinerung der Elektrolyseurnennleistung in Abhängigkeit der geforderten Mindestzeit speicherbegrenzter Primärregelung Quelle: Eigene Darstellung	48
28.	Ermittlung der Energieaufnahmekapazität des 2,2 MW Elektrolyseurs mit AP: 1,63 MW. Quelle: Eigene Darstellung	50
29.	Temperaturverlauf bei Erfüllung von ± 1 MW FCR 2017 APG mit erhöhtem Arbeitspunkt Nennleistung für 15 und 30 Minuten Mindestanforderung Quelle: Eigene Darstellung	52
30.	Temperaturverlauf bei Erfüllung von ± 1 MW FCR 2017 APG mit minimierter Nennleistung für 15 und 30 Minuten Mindestanforderung Quelle: Eigene Darstellung	52
31.	Verlauf des Kathodendruckes, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz des negativen 30-Minuten Gasspeichervolumens des 2,2 MW Elektrolyseurs. Quelle: Eigene Darstellung	54
32.	Verlauf des Kathodendruckes, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz beim negativen Doppelhöckertest Quelle: Eigene Darstellung	55
33.	Verlauf des Kathodendruckes, der Elektrolyseurleistung und der Netzfrequenz beim positiven Doppelhöckertest Quelle: Eigene Darstellung	56
34.	In Österreich 2017 abgerufene positive Sekundärregelleistung Quelle: Eigene Darstellung	58
35.	Beispiel des SRL-Signals auf Sekundenbasis für Anbieter in Österreich. Quelle:APG	59
36.	Verteilung des Preises des nicht produzierten Wasserstoffes auf den Slice-niveaus 1-40. Quelle: Eigene Darstellung	60
37.	Mittelwert- und Medianpreise des nicht produzierten Wasserstoffes in Abhängigkeit des betrachteten Slices. Quelle: Eigene Darstellung	61
38.	Preis des nicht produzierten Wasserstoffes bei Variation des Abrufpreises der Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	62
39.	Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampfreformation Slice 1. Quelle: Eigene Darstellung	64
40.	Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampfreformation Slice 40. Quelle: Eigene Darstellung	64
41.	In Österreich abgerufene Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	65
42.	Einteilung der in Österreich abgerufenen Sekundärregelleistung in Streifen zu 5 MW. Quelle: Eigene Darstellung	66

43.	Verteilung der Auslastung über die <i>Slices</i> . Quelle: Eigene Darstellung . . .	67
44.	Betriebsstunden der <i>Slices</i> eins bis zehn negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	67
45.	Erzeugte Menge Wasserstoff bei Erfüllung der <i>Slices</i> eins bis zehn negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	68
46.	Erzeugte Menge Wasserstoff bei Erfüllung der <i>Slices</i> elf bis zwanzig negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	69
47.	Relative Häufigkeit direkter Folgeabrufe nach einem Abruf negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	70
48.	In Österreich 2017 abgerufene positive Tertiärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	73
49.	Verteilung des Preises des nicht produzierten Wasserstoffes auf den Slice-niveaus 1-56. Quelle: Eigene Darstellung	74
50.	Preis des nicht produzierten Wasserstoffes in Abhängigkeit des betrachteten <i>Slices</i> . Quelle: Eigene Darstellung	74
51.	Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampfreformation Slice 1. Quelle: Eigene Darstellung	75
52.	Erlösentwicklung bei Veränderung des Wasserstoffpreises aus Dampfreformation Slice 56. Quelle: Eigene Darstellung	75
53.	Preis des nicht produzierten Wasserstoffes bei Variation des Abrufpreises der Tertiärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	76
54.	Einteilung der in Österreich abgerufenen Tertiärregelung in Streifen zu 5 MW. Quelle: Eigene Darstellung	77
55.	Einteilung der in Österreich abgerufenen Tertiärregelung in Streifen zu 5 MW. Quelle: Eigene Darstellung	78
56.	Verteilung der Volllaststunden über die <i>Slices</i> . Quelle: Eigene Darstellung .	78
57.	Vereinfachte Darstellung der Verschaltung des Beispielnetzes im Umspannwerk. Quelle: Eigene Darstellung	80
58.	Topologische Darstellung der Leitungen und Ortsnetzstationen des Beispielnetzes. Quelle: Eigene Darstellung	80
59.	Vergleich des Erdgasverbrauchs und des Dieselkraftstoffverbrauchs in der Landwirtschaft in der Region des Beispielnetzes. Quelle: Eigene Darstellung	83
60.	Erzeugte Menge Wasserstoff bei Erfüllung der <i>Slices</i> elf bis zwanzig negativer Sekundärregelleistung. Quelle: Eigene Darstellung	84
61.	Vergleich der Deckung des Elektrolyseurbedarfs durch Wind mit Wind zusätzlich Photovoltaik inklusive Regelleistung <i>Slice</i> ₁₁ Quelle: Eigene Darstellung	85
62.	Ergebnis der Blindleistungskompensation bei Regelleistung <i>Slice</i> ₁₁ . Quelle: Eigene Darstellung	86
63.	$\cos(\varphi)$ und Wirkungsgrad der Leistungselektronik bei der Blindleistungskompensation Regelleistung <i>Slice</i> ₁₁ Quelle: Eigene Darstellung	87
64.	Verlauf des Verlustes an Wasserstoffproduktion durch die Blindleistungskompensation. Quelle: Eigene Darstellung	87
65.	Abweichung des Leistungselektronikwirkungsgrades durch die Blindleistungskompensation. Quelle: Eigene Darstellung	88

A.1. Matlab/Simulink Implementierung des Active Front End für den PEM-Elektrolyseur. Quelle: Eigene Darstellung	107
A.2. Matlab/Simulink Implementierung des PEM-Elektrolyseur. Quelle: Eigene Darstellung	108

Tabellenverzeichnis

1. Vergleich der verschiedenen Elektrolyseursysteme nach [32]	11
2. Parameter der PEM-Zellspannung nach[48]	19
3. Vergleich der 4 Gerätekonfigurationen zur Erbringung 1 MW FCR 2017 mit Überlastausnutzung	48
4. Vergleich Jahresproduktion 1 MW FCR 2017 mit Überlastausnutzung . . .	49
5. Notwendiges Gasspeichervolumen zur Einhaltung der 15- und 30-Minuten Kriterien und Druckgrenzen des 2,2 MW Elektrolyseurs	53
6. Mittelwert- und Medianpreise des nicht produzierten Wasserstoffes bei positiver Sekundärregelleistung	61
7. Mittelwert- und Medianpreise des nicht produzierten Wasserstoffes bei positiver Tertiärregelleistung	73
8. Daten des 20 kV Mittelspannungsnetzes	79
9. Daten zum landwirtschaftlichen Dieselbedarf im vom Beispielnetz versorgten Gebiet	82
10. Daten zum landwirtschaftlichen Dieselbedarf im vom Beispielnetz versorgten Gebiet	82
A.1. Simulink Parameter des Drei-Phasen Transformators 1	105
A.2. Simulink Parameter des Drei-Phasen Transformators 2	105
A.3. Simulink Parameter der Drossel 1	105
A.4. Simulink Parameter der Zwischenkreis-Glättdrossel	105
A.5. Simulink Parameter des Zwischenkreis-Kondensators	105
A.6. Simulink Parameter der IGBT B6 Brücke	105
A.7. Simulink Parameter der Diode im Zwischenkreis	106
A.8. Simulink Parameter für die thermischen Widerstand und Kapazität	106

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AFE Active Frontend

aFRR	automatic Frequency Recovery Reserve
AP	Arbeitspunkt
APG	Austrian Power Grid
EC	Elektro-chemisch
EL	Elektrolyseur
FCR	Frequency Containment Reserve
FRR	Frequency Restoration Reserve
mFRR	manual Frequency Recovery Reserve
PEM	Proton Exchanging Membrane
PQ	Präqualifizierte
PRL	Primärregelung
PRR	Primärregelreserve
SRL	Sekundärregelung
SRR	Sekundärregelreserve
TRL	Tertiärregelung
TRR	Tertiärregelreserve

Griechische Formelzeichen		Einheit
α	Ladungstransferkoeffizient	1
ΔG	Freie Enthalpie oder Gibbs-Energie	J
$\Delta m_{H_2, SRR_{pos,i}}$	Ausfall Wasserstoffmasse, Zeitscheibe i, SRR positiv	MWh
$\Delta p_{cool-stack}$	Druckverlust Kühlmittelstrom	bar
$\Delta T_{stack-cool}$	Temperaturspreizung Stackkühlung	K
$\Delta W_{H_2, SRR_{pos,i}}$	Ausfall Wasserstoffenergie, Zeitscheibe i, SRR positiv	MWh
$\delta_{membran}$	Membrandicke	μm
η_{AFE}	Wirkungsgrad des Active-Frontend	1
$\eta_{cool-motor}$	Wirkungsgrad Motor-Kühlpumpe	1
$\eta_{Ohm}, \eta_{Konzentration}, \eta_{Aktivierung}$	Überspannungen einer EC-Zelle	V
η_{pumpe}	Wirkungsgrad Kühlpumpe	1
γ	Spannungsbezugsphasenwinkel dq zu 3-Phasensystem	rad
λ	Feuchtegrad der Membran	1
ρ_{H_2O}	Dichte Wasser	kg/m^3
$\sigma_{membran}$	Membranleitfähigkeit	μm
θ_i	Stromzeigerwinkel im dq-System	rad
$\varepsilon_{H_2}(T)$	Wasserstoffdiffusionskoeffizient der Membran	$(\text{mol}\mu\text{m})/\text{bar}$
$\varepsilon_{O_2}(T)$	Sauerstoffdiffusionskoeffizient der Membran	$(\text{mol}\mu\text{m})/\text{bar}$

Lateinische Formelzeichen		Einheit
$\dot{m}_{cool-stack}$	Zellflächenspezifischer Kühlmittelstrom	kg/(scm ²)
\dot{q}_{cell}	Flächenspezifischer Reaktionsabwärmestrom	J/(scm ²)
\dot{q}_{diss}	Zellflächenbezogener Wärmeverlust des EL-Gerätes	J/(scm ²)
$\dot{n}_{H_2,K,EL}$	Erzeugter Stoffmengenstrom Wasserstoff	mol/(cm ² s)
$\dot{n}_{H_2,K}$	Stoffmengenstrom Wasserstoff auf Kathodenseite	mol/(cm ² s)
$\dot{n}_{H_2,Produktion}$	Produzierte Stoffmenge Wasserstoff Ausgang EL-System	W/cm ²
$\dot{n}_{O_2,A,EL}$	Erzeugter Stoffmengenstrom Sauerstoff	mol/(cm ² s)
$\dot{n}_{O_2,A}$	Stoffmengenstrom Sauerstoff auf Kathodenseite	mol/(cm ² s)
$\dot{n}_{O_2,diff}$	Stoffmengenstrom Sauerstoff auf Kathodenseite	mol/(cm ² s)
$\dot{q}_{cool/heat}$	Flächenspezifischer Kühlwärmebedarf	J/(scm ²)
Erlös _{Slice,H₂,sub}	Jahreserlöse Ersatz mit Fremdwasserstoff SRR positiv	EUR
$\tilde{C}_{H_2,Arbeit,Slice,SRR_{pos},i}$	varierte Arbeitskosten, Zeitscheibe i, SRR positiv	EUR/MWh
$a_{H_2}, a_{O_2}, a_{H_2O}$	Aktivitäten von H_2, O_2 und H_2O	1
$A_{cell,stack}$	Gesamtzellfläche eines Elektrolyseurstacks	cm ²
atm	Atmosphären entspricht 1,01325	bar
$C_{Arbeit,SRR_{pos},i}$	Arbeitskosten, Zeitscheibe i, SRR positiv	EUR/MWh
$C_{H_2,Arbeit,Slice,SRR_{pos},i}$	Kosten Wasserstoffausfall, Zeitscheibe i, SRR positiv	EUR/MWh
$C_{Leistung,SRR_{pos},i}$	Leistungskosten, Zeitscheibe i, SRR positiv	EUR/MWh
$c_{p,stack,spec}$	Zellflächenspezifische Wärmekapazität des EL-Gerätes	J/(cm ² K)
$c_{p,Wasser}$	Spezifische Wrmekapazität Wasser	J/(kgK)

F	Faradaykonstante (96485,3399)	As/mol
f_{η}	Ersatzwirkungsgradfunktion AFE	
$f_{EL,Extern,SRRpos}$	Elektrolyseurleistungsfunktion spezialisiert für aSRR positiv	W
$f_{EL,Extern}$	Elektrolyseurleistungsfunktion Netzdienstleistungssimulation	
f_{ist}	Netzistfrequenz	Hz
f_{ist}	Netzsollfrequenz	Hz
f_{Netz}	Netzistfrequenz am Anschluss Elektrolyseursystems	Hz
G_i	Netzkennzahl des i-ten Netzes	W
H	Standard-Bildungsenthalpie	J
i_0	Austauschstromdichte	A/(cm ²)
I_d, I_q, I_0	Ströme im dq System	A
I_U, I_V, I_W	Ströme im 3-Phasensystem	A
i_{cell}	Stromdichte einer Elektrolyseur-Einzelzelle	A/cm ²
$I_{DC,Stack}$	Gleichstrom pro Stack	A
$K_{L,i}$	Kummulierte Lastkennzahl der i-ten Netzes	W/Hz
$K_{L,i}$	Kummulierte Maschinenkennzahl des i-ten Netzes	W/Hz
$K_{R,i}$	Kummulierte Netzkennzahl des i-ten Netzes	W/Hz
$m_{H_2,SRRpos,i}$	Produzierte Wasserstoffmasse, Zeitscheibe i, SRR positiv	MWh
M_{H_2O}	Wasser Molmasse	g/mol
$n_{Ladungsträger}$	Anzahl der an der Reaktion beteiligten Ladungsträger	1
$n_{Stacks \text{ pro AFE}}$	Anzahl der Stacks die pro AFE-Einheit versorgt werden	1
n_{cell}	Stackspannung	1
p^0	Normaldruck Standardbedingungen 1	bar

$P_{AFE,ist}$	Ist-Wirkleistungsaufnahme des Active Frontend	W
$P_{AFE,soll}$	Soll-Wirkleistungsaufnahme des Active Frontend	W
p_{Anode}	Gasdruck auf Anodenseite	bar
P_{AUX}	Nebenverbraucherleistung des Elektrolyseursystems	W
$P_{cool-stack,ele}$	Zellflächenbezogener Kühlleistungsbedarf Elektrolyseursystem	W/cm ²
$P_{FCR,PQ}$	Präqualifizierte FCR Leistung	MW
$P_{Generator,i}$	Nennleistung des i-ten Generators	W
$p_{Kathode,Soll}$	Solldruck auf der Kathodenseite	N/m ²
$p_{Kathode}$	Gasdruck auf Kathodenseite	bar
$P_{Kuppel,ist}$	Ist-austauschleistung über Kuppelleitung	W
$P_{Kuppel,soll}$	Soll-austauschleistung über Kuppelleitung	W
$P_{Last,i}$	Verbrauch der i-ten Last	W
$p_{part,H2,A}$	Wasserstoffpartialdruck auf Kathodenseite	bar
$p_{part,H2O,A}$	Wasserdampfpartialdruck auf Kathodenseite	bar
$p_{part,O2,A}$	Sauerstoffpartialdruck auf Anodenseite	bar
$P_{PEM,Sys,ist}$	Ist-Wirkleistung des Elektrolyseurgesamtsystems	W
$P_{PEM,Sys,nenn}$	Nennleistung des Elektrolyseurgesamtsystems	W
$P_{PEM,Sys,soll}$	Sollwirkleistung des Elektrolyseursystems	W
$P_{Slice,SRR_{pos},i}$	Leistungsabruf, Zeitscheibe i, SRR positiv	MW
p_{varia}	Variationsvariable SRR positiv	1
$Preis_{H2,A}$	Preis Fremdwasserstoff	EUR/kWh
$Q_{AFE,ist}$	Ist-Blindleistungsaufnahme des Active Frontend	W
$Q_{AFE,soll}$	Soll-Blindleistungsaufnahme des Active Frontend	W

$Q_{Batterie}$	Elektrische Speicherkapazität einer Batterie	MWh
$Q_{PEM, Sys, ist}$	Ist-Wirkleistung des Elektrolyseurgesamtsystems	VA
$Q_{PEM, Sys, soll}$	Sollblindleistung des Elektrolyseursystems	VA
R	Molare Gaskonstante (8,314495)	J/(K · mol)
R_{ele}	Flächenspezifischer Widerstand Elektroden	Ωcm^2
R_{mem}	Flächenpezifischer Widerstand Membran	Ωcm^2
$R_{therm, spec}$	Zellflächenbezogener Wärmeübergangskoeffizient des EL-Gerätes	J/(scm^2)
$R_{therm-stack}$	Gerätespezifischer Wärmeübergangskoeffizient des EL-Gerätes	J/(sK)
S	Entropie	J/K
T_{Stack}	Stacktemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$T_{Umgebung}$	Umgebungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
U_d, U_q, U_0	Spannungen im dq System	V
U_U, U_V, U_W	Spannungen im 3-Phasensystem	V
$U_{0, rev}$	Standardzellspannung einer EC-Zelle	V
$U_{0, th}$	Thermoneutrale Spannung einer EC-Zelle	V
U_{cell}	Zellenspannung einer Elektrolyseur-Einzelzelle	V
$U_{DC, Stack}$	Gleichspannung am Stack	V
U_{kl}	Klemmenspannung einer EC-Zelle	V
U_{Nernst}	Nernstspannung einer EC-Zelle	V
U_{Stack}	Stackspannung	V
$U_{T, rev}$	Temperaturabhängige Zellspannung einer EC-Zelle	V

A. Simulink Implementierungen

P_n	Schaltgruppe	U_1 [kV]	R_1 [p.u.]	L_1 [p.u.]	U_2 [V]	R_2 [p.u.]	L_2 [p.u.]	R_m [p.u.]	L_m [p.u.]
$Stacks \cdot P_{Stack} \cdot 1,5$	YY0	20	10^{-4}	0,04	400	10^{-4}	0,04	500	500

Tabelle A.1: Simulink Parameter des Drei-Phasen Transformators 1

P_n	Schaltgruppe	U_1 [V]	R_1 [p.u.]	L_1 [p.u.]	U_2 [V]	R_2 [p.u.]	L_2 [p.u.]	R_m [p.u.]	L_m [p.u.]
$Stacks \cdot P_{Stack} \cdot 1,5$	YY0	400	10^{-4}	0,04	200	10^{-4}	0,04	500	500

Tabelle A.2: Simulink Parameter des Drei-Phasen Transformators 2

S_n	R [p.u.]	L [p.u.]
$P_{Stack} \cdot 1,5$	$8,66 \cdot 10^{-3}$	0,17

Tabelle A.3: Simulink Parameter der Drossel 1

S_n	R [p.u.]	L [p.u.]
$P_{Stack} \cdot 1,5$	$8,66 \cdot 10^{-3}$	0,136

Tabelle A.4: Simulink Parameter der Zwischenkreis-Glättdrossel

S_n	R [p.u.]	C [p.u.]
$P_{Stack} \cdot 1,5$	$8,66 \cdot 10^{-3}$	0,145

Tabelle A.5: Simulink Parameter des Zwischenkreis-Kondensators

S_n	$R_{Snubber}$ [p.u.]	$C_{Snubber}$ [p.u.]	R_{on} [p.u.]
$P_{Stack} \cdot 1,5$	$2,17 \cdot 10^6$	∞	$2,17 \cdot 10^{-2}$

Tabelle A.6: Simulink Parameter der IGBT B6 Brücke

R_{on}	L_{on}	V_f	$R_{Snubber}$	$C_{Snubber}$	
[Ω]	[H]	[V]	[Ω]	[F]	[!ht]
10^{-4}	0	0,8	10^5	∞	

Tabelle A.7: Simulink Parameter der Diode im Zwischenkreis

$R_{Stack,thermal}$	$C_{Stack,thermal}$
$\left[\frac{W}{K} \frac{1}{MW} \right]$	$\left[\frac{W}{K} \frac{1}{MW} \right]$
$3,072 \cdot 10^{-6}$	11,5

Tabelle A.8: Simulink Parameter für die thermischen Widerstand und Kapazität

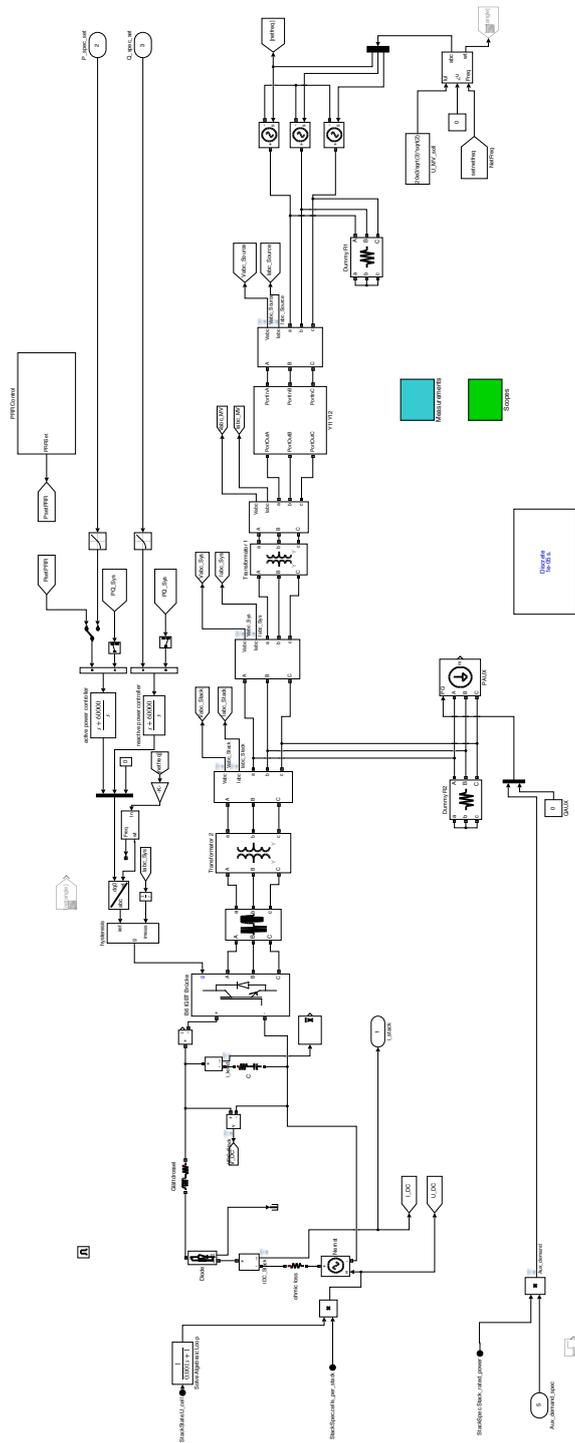


Abbildung A.1: Matlab/Simulink Implementierung des Active Front End für den PEM-Elektrolyseur. Quelle: Eigene Darstellung

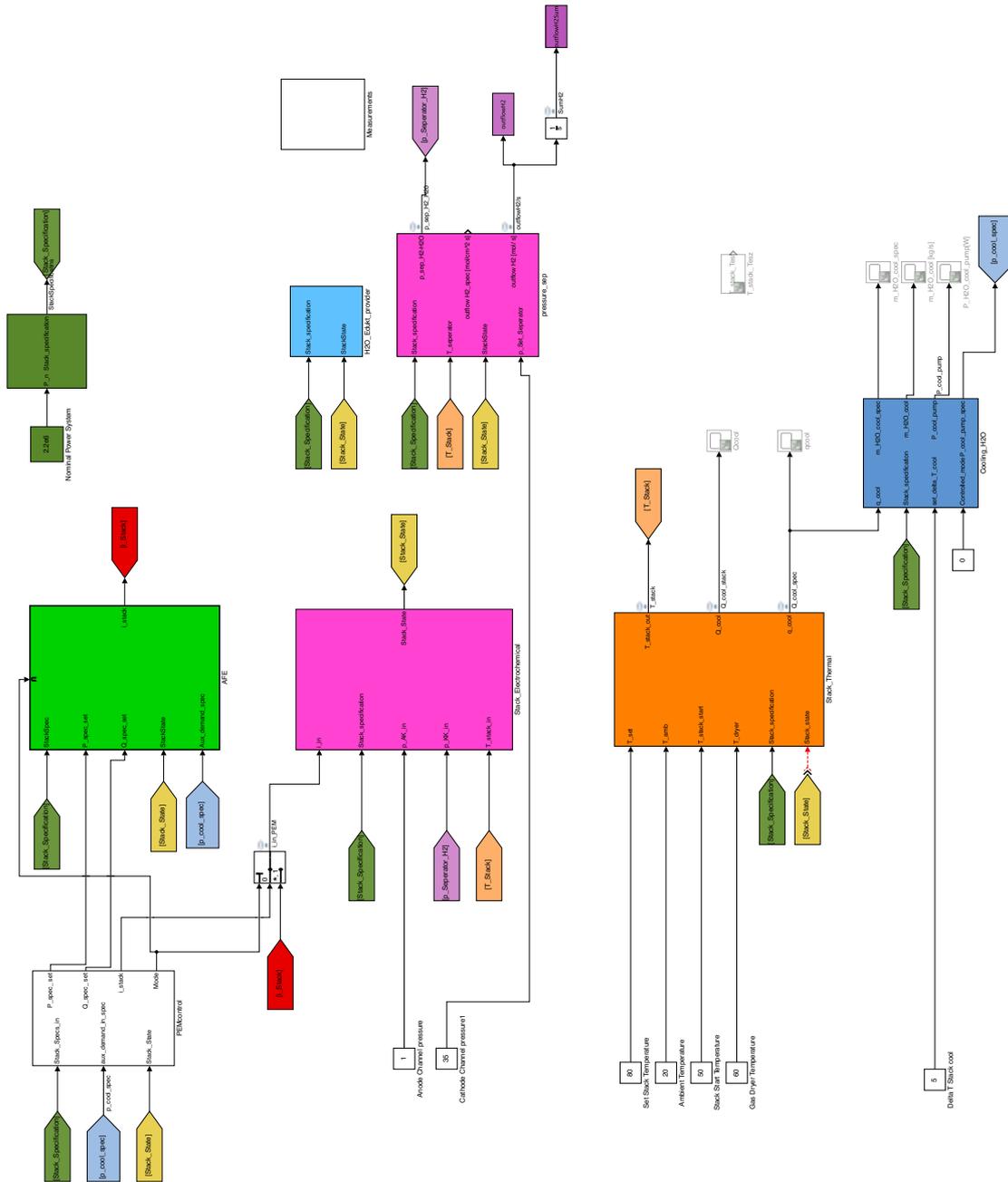


Abbildung A.2: Matlab/Simulink Implementierung des PEM-Elektrolyseur. Quelle: Eigene Darstellung

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, 1. August 2018

Christoph Edler