

Simulation eines dezentralen Regelungssystems zur netzdienlichen Erzeugung von grünem Wasserstoff

Martin Winter¹, Antony Dominic¹, Gernot Schullerus¹, Thorsten Zenner¹

Zusammenfassung

Wasserstoff wird einen bedeutenden Beitrag zum Wandel von Industrie und Gesellschaft in eine klimaneutrale Zukunft leisten. Der Aufbau und die ökologisch und ökonomisch sinnvolle Nutzung einer Wasserstoffinfrastruktur sind hierbei die zentralen Herausforderungen. Ein notwendiger Baustein ist die effiziente Bereitstellung von grünem Strom und dem daraus produzierten grünen Wasserstoff. Der vorliegende Beitrag stellt ein dezentrales Regel- und Kommunikationssystem vor, mit dem Angebot und Nachfrage von grünem Strom und Wasserstoff in einem System aus dezentralen Akteuren in Einklang gebracht werden. In einer hierzu entwickelten Simulationsumgebung wird die Funktion und der Nutzen dieses dezentralen Ansatzes verdeutlicht.

Stichwörter

Grüner Wasserstoff, Netzstabilisierung, Dezentrale Regelung, Simulation, Transactive Energy

1 Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist dringend notwendig, um eine klimaneutrale Zukunft und energetische Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Durch die Abhängigkeit vom Wetter ist die regenerativ erzeugte Leistung volatil. Um trotz dieser Volatilität den direkten Bedarf zuverlässig erbringen zu können, muss die installierte regenerative Leistung erheblich vergrößert werden. Infolgedessen wird es künftig zu deutlichen Überkapazitäten kommen. Die heutzutage gängige Praxis, überschüssige Leistung abzuregeln, steht im Widerspruch zu einer effizienten Nutzung grünen Stroms [1].

Zukünftig muss die überschüssige Leistung voll ausgenutzt werden, um die gewonnene Energie zu speichern bzw. in Industrie und Mobilität zu nutzen. Hierbei kann für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Speicherung nicht alleine auf die Batterietechnologie gesetzt werden [2, 3, 4, 5], wie unterschiedliche Großprojekte bereits zeigen [6]. Wasserstoff kann über die saisonale Speicherung [7, 8] hinaus für viele weitere Anwendungen wie z.B. Prozesswärme, chemische Prozesse, synthetische Kraftstoffe und als Treibstoff für schwere Nutzfahrzeuge [9, 10] genutzt werden und fossile Ausgangsmaterialien substituieren. Die Abwärme von Wasserstoffsystemen wird durch Sektorkopplung genutzt, was den Gesamtwirkungsgrad dieser Systeme signifikant verbessert [11]. Durch die Sektorkopplung leistet die Erzeugung von grünem Wasserstoff einen zusätzlichen Beitrag zur Fernwärmeversorgung [12, 13]. Der Einsatz von Wasserstoffspeichersystemen in Privathaushalten ermöglicht auch jedem Einzelnen im kleinen Maßstab einen Beitrag zur Energiewende zu leisten [14, 15]. Durch die weiterhin fallenden Investitionskosten ist davon auszugehen, dass es künftig wesentlich mehr Elektrolyseure im Sub-Megawatt-Bereich geben wird.

¹ Reutlingen University, Reutlinger Energiezentrum, Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen, Germany

Diese Vielzahl erneuerbarer Energiesysteme muss für eine effiziente Nutzung der grünen Leistung durch ein Regelungssystem verwaltet werden. Das Regelungssystem allokiert die Leistung ökologisch und netzdienlich [16]. In [17] werden unterschiedliche Ansätze für ein solches Regelungssystem diskutiert und in [18] in drei Schichten unterteilt. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die in [18] mit *Tertiary Control* bezeichnete Regelungsebene, die die verfügbare Leistung auf die Akteure verteilt. In einem Netz, das aus zahlreichen Klein-PV- und -Windkraftanlagen sowie vielen Elektrolyseuren kleiner und mittlerer Leistung besteht, ist eine zentrale Reglertopologie im praktischen Einsatz von Nachteil. Für ein Netz aus vielen, unabhängigen Akteuren ist eine dezentrale Topologie besser geeignet, weil sie sich mit geringerem Aufwand skalieren lässt und ausfallsicherer ist. Ferner ist es für viele Betreiber von erneuerbaren Energiesystemen nicht akzeptabel, die Leittechnik ihrer Systeme für eine Beeinflussung von außen zu öffnen, was bei einem zentralen Regler der Fall wäre. Die Akzeptanz für eine lokal ausgeführte, dezentrale Regelung ist größer. Eine solche Regelung kann durch das Konzept der Transactive Energy [19] realisiert werden. Im Zusammenspiel der Stromauktionsteilnehmer und deren Bieterverhalten bildet sich der Strompreis [20].

In diesem Beitrag wird ein dezentrales Regel- und Kommunikationssystem für grünen Strom und Wasserstoff beschrieben. Im Unterschied zum Stand der Technik wird eine Kommunikationsplattform entwickelt, die einen automatisierten, sicheren Austausch von Informationen ermöglicht. Darauf aufbauend wird eine netzdienliche lokale Regelung implementiert. Durch die Entwicklung einer Simulationsumgebung und die Modellierung verschiedener Akteure wird das Gesamtsystem getestet und eine Bewertung ermöglicht.

Im folgenden Abschnitt 2 werden das betrachtete System und in Abschnitt 3 die Akteure dieses Systems beschrieben. Abschnitt 4 definiert die Kommunikationsschnittstellen zwischen den Akteuren. Das Regelverfahren wird in Abschnitt 5 dargestellt. Um diese Kommunikationsplattform und das Regelverfahren zu evaluieren, wurde die in Abschnitt 6 vorgestellte Simulationsumgebung entwickelt. In dieser Umgebung werden die Szenarien in Abschnitt 7 simuliert und die Ergebnisse in Abschnitt 8 präsentiert. Abschnitt 9 schließt diesen Beitrag ab.

2 Beschreibung des Systems

Den Ausgangspunkt für das hier betrachtete System stellt das bereits vorhandene öffentliche Stromnetz dar. Wie Abbildung 1 zeigt, sind unterschiedliche Energiesysteme wie z.B. Stromerzeuger und Stromverbraucher an das Stromnetz angebunden. Diese Energiesysteme können zu einem netzgebundenen Microgrid gruppiert werden. Im Folgenden wird ein Verbund aus erneuerbaren Energiesyste-

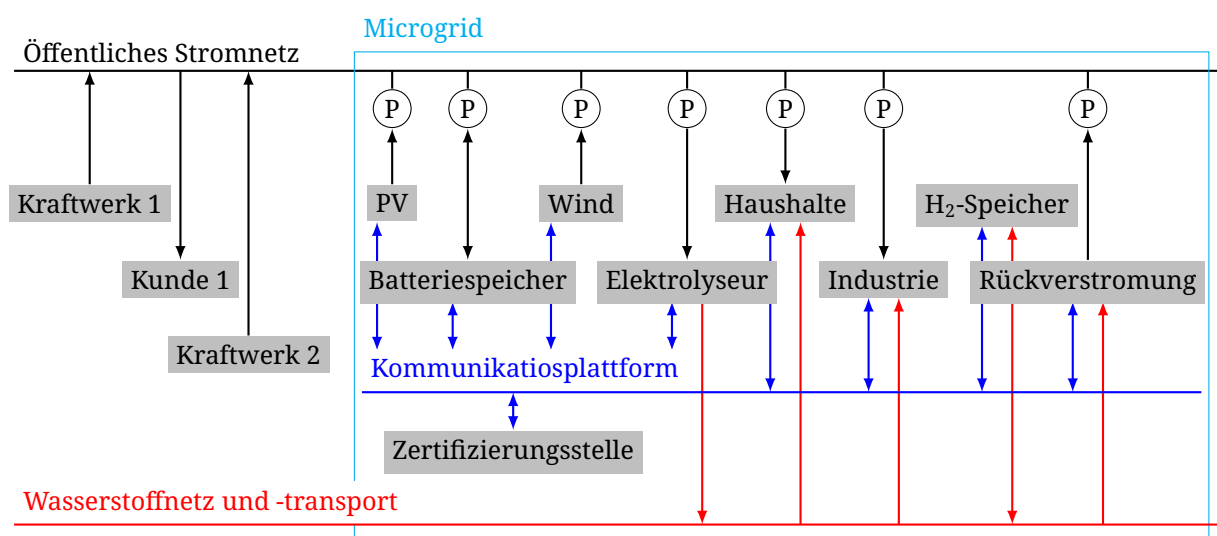


Bild 1: Akteure im System und Anbindung an Stromnetz, Wasserstoffnetz und Kommunikationsplattform

men, Stromspeichertechnologien und Stromverbrauchern beschrieben. Entsprechend seiner lokalen Regelung kann jeder Akteur in diesem Verbund elektrische Energie über das öffentliche Stromnetz austauschen. Dies wird für jeden Akteur individuell durch Stromzähler erfasst. Das in diesem Beitrag beschriebene System ersetzt daher weder das öffentliche Stromnetz noch den börslichen Stromhandel. Es baut viel mehr darauf auf und stellt eine Ergänzung dar. Neben dem Stromnetz sind die Erzeuger und Verbraucher von Wasserstoff über ein Wasserstoffnetz miteinander verbunden. Hier wird entweder über ein Netzwerk aus Pipelines oder z.B. durch Tanklastzüge Wasserstoff transportiert.

Für den effizienten Betrieb einer Wasserstoffinfrastruktur ist der Handel des zur Wasserstoffproduktion notwendigen Stroms, die Übertragungskapazität des Stromnetzes, der erzeugte Wasserstoff und der Transport des Wasserstoffs notwendig. Dieser Beitrag fokussiert sich auf den Stromhandel. Grundsätzlich kann jeder Akteur gleichzeitig Stromanbieter und Stromkunde sein. Im Folgenden wird ein Szenario betrachtet, in dem Akteure entweder Anbieter oder Kunde sind.

Die Kommunikationsplattform bietet die Funktion einer Börse. Stromanbieter veröffentlichen ein Angebot über Liefermenge und Preis für ein bestimmtes Zeitintervall über die Kommunikationsplattform. Stromkunden fragen ihre erforderliche Liefermenge beim Anbieter an und handeln einen Liefervertrag aus. Stromkunden und -anbieter finden auf direktem Wege zusammen und bilden nach marktmechanischen Prinzipien den Strompreis. Diese Art des Stromhandels setzt nicht auf das Prinzip der Merit-Order, sondern gleicht dem klassischen Future Handel mit Commodities. Es kommt daher nicht zum Merit-Order-Effekt [21]. Der Preis ist hierbei die Stellgröße der lokalen Regler in den Akteuren. Durch das Regelungssystem wird der Strom nicht nur gehandelt, sondern auch effizient verteilt.

3 Beschreibung der Akteure

3.1 Zertifizierungsstelle

Um die Identität und Autorisierung der Akteure sicherzustellen, werden digitale Signaturen und asymmetrische Verschlüsselungen auf Basis von Zertifikaten genutzt [22]. Dazu muss jeder Akteur für die Teilnahme am Microgrid ein solches digitales Zertifikat erhalten. Dieses Zertifikat ist öffentlich verfügbar und kann über die Kommunikationsplattform abgerufen werden. Jeder Akteur, der Teil des Microgrids werden möchte, erzeugt ein Zertifikat und fragt die Signierung dieses Zertifikats an. Diese Anfragen werden von der Zertifizierungsstelle bearbeitet. Eine Signierungsanfrage wird abgelehnt, wenn die Voraussetzungen für die Teilnahme am Microgrid nicht erfüllt sind. Wird die Signierungsanfrage angenommen, signiert die Zertifizierungsstelle das Teilnehmerzertifikat des Akteurs mit dem privaten Schlüssel der Zertifizierungsstelle. Dieser Prozess ist automatisiert. Der Akteur ist nun ein Teilnehmer am Microgrid und kann über die Kommunikationsplattform Daten austauschen.

3.2 Teilnehmer

Ein Teilnehmer kann ein Stromanbieter oder Stromkunde sein. Die Beschreibung eines Anbieters und eines Kunden ist in einigen Aspekten identisch. Im Folgenden wird daher der abstrakte Teilnehmer beschrieben, bevor das Zusammenspiel von Anbieter und Kunde erläutert wird.

Ein Teilnehmer kommuniziert über die in Abschnitt 4 definierten Kommunikationsschnittstellen mit anderen Teilnehmern und der Zertifizierungsstelle. Auf Grundlage dieser Kommunikation wird ein Regelverfahren implementiert, das in Abschnitt 5 beschrieben wird. Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild eines Teilnehmers.

Der Anbieter berechnet die voraussichtliche Verfügbarkeit seiner Erzeugerleistung. Diese Leistung kann durch einen statischen Verlauf gegeben sein. Die Leistung vieler erneuerbarer Energiesysteme ist jedoch abhängig vom Wetter und daher volatil. Mit Hilfe von Wetterdaten und einem Simulationsmodell für das erneuerbare Energiesystem kann die voraussichtlich verfügbare Leistung bestimmt werden. Diese Leistung wird in Form von Angeboten zu einem vom Regelverfahren definierten Preis

über die Kommunikationsplattform veröffentlicht. Ähnlich zum Spotmarkt sind die Angebote in Zeitintervalle unterteilt. In diesem Beitrag werden Zeitblöcke von 15 Minuten berücksichtigt. Die Angebote sind mit dem privaten Schlüssel des Anbieters signiert.

Der Kunde berechnet auf der Grundlage eines statischen Verlaufs oder eines Modells seinen voraussichtlichen Leistungsbedarf. Der Kunde kann alle Angebote abrufen und ist daher in der Lage, seinen Leistungsbedarf dem Angebot anzupassen. Entsprechend dem lokalen Regelverfahren werden einzelne dieser Angebote beim Anbieter angefragt. Dazu wird eine Anfrage veröffentlicht, die mit dem privaten Schlüssel des Kunden signiert und mit dem öffentlichen Schlüssel des Anbieters verschlüsselt ist.

Der Anbieter prüft die Anfragen und nimmt sie entsprechend seiner noch verfügbaren Leistung an oder lehnt sie ab. Wenn eine Anfrage angenommen wurde, wird ein Liefervertrag geschlossen und über die Kommunikationsplattform veröffentlicht. Der Liefervertrag ist mit den privaten Schlüsseln von Anbieter und Kunde signiert und mit dem öffentlichen Schlüssel des Kunden verschlüsselt. Anbieter und Kunde sind nun verpflichtet, die im Vertrag festgelegte Leistung in dem definierten Lieferzeitraum ins Netz einzuspeisen bzw. aus dem Netz zu entnehmen.

Sobald eine Lieferung durchgeführt wurde, kennzeichnet der Kunde den Liefervertrag als erfüllt und erstellt eine Vertragsbestätigung. Liefervertrag und Vertragsbestätigung dienen anschließend zur Erstellung einer korrekten Abrechnung.

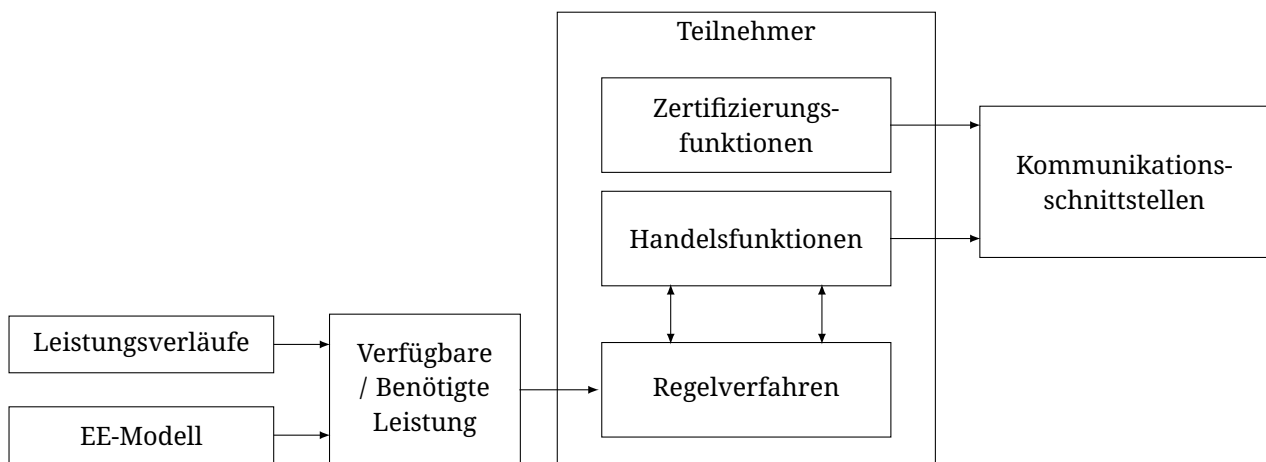


Bild 2: Blockdiagramm eines Teilnehmers

4 Kommunikationsplattform

Die entwickelte Kommunikationsplattform bietet Teilnehmern die Möglichkeit, Informationen sicher und nachvollziehbar auszutauschen. Teilnehmer können Daten an die Plattform senden und von ihr abrufen. Die Plattform verwaltet diese Daten und stellt sie öffentlich bereit.

In diesem Beitrag basiert die Kommunikationsplattform auf einem MQTT-Broker. Die Kommunikationsschnittstellen bauen auf dem MQTT-Protokoll auf. Die Teilnehmer veröffentlichen Daten in bestimmte Topics und rufen sie aus bestimmten Topics ab. Dabei sind die Topics hierarchisch nach Art des Datums strukturiert. Alle Teilnehmer und die Zertifizierungsstelle tauschen die Zertifizierungsdaten x_z, \dots aus. Diese beinhalten Zertifizierungsanfragen und Zertifikate. Alle Teilnehmer tauschen Marktdaten x_m, \dots aus. Die Marktdaten beschreiben die angebotene Leistung in Menge und Preis für jeden Abtastzeitpunkt.

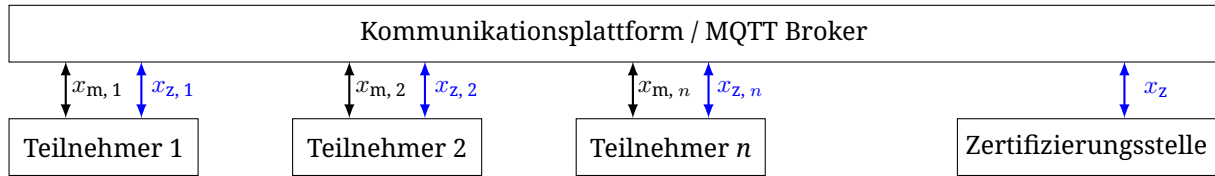


Bild 3: Teilnehmer und deren Interaktion mit der Kommunikationsplattform und dem Stromnetz

5 Regelverfahren

Wie Abbildung 2 zeigt, hat jeder der n Teilnehmer im Microgrid sein eigenes dezentrales Regelungssystem. Die Schnittstellen dieses Regelungssystems sind in Abbildung 4 dargestellt. Über die Kommunikationsplattform haben alle Teilnehmer Zugriff auf die Marktdaten $x_{m,n}$. Außerdem kennt jeder Teilnehmer seinen eigenen Zustand, der durch den Vektor $x_{p,n}$ beschrieben wird. Dieser Vektor beschreibt die voraussichtlich verfügbare Leistung bzw. den Leistungsbedarf des Teilnehmers wie in Abschnitt 3.2 beschrieben im zeitlichen Verlauf. Der Ausgangsvektor u_n beschreibt den Preis, zu dem der Teilnehmer zu jedem Zeitpunkt bereit ist, einen Liefervertrag zu schließen. Über Reglerparameter p_n wird das Regelverfahren für den konkreten Teilnehmer parametrisiert, um die verschiedenen Randbedingungen und Betriebscharakteristika der Systeme zu berücksichtigen.

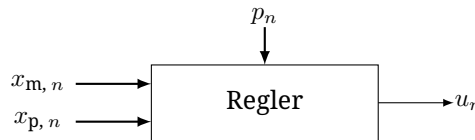


Bild 4: Schnittstellen des Regelverfahrens

Für eine wirtschaftliche und effiziente Nutzung regenerativen Stroms, um daraus grünen Wasserstoff herzustellen soll folgende Zielfunktion (1) durch das Regelverfahren minimiert werden. Diese Zielfunktion berücksichtigt im Optimierungsintervall von t_1 bis t_2 den wirtschaftlichen Betrieb jedes einzelnen Teilnehmers sowie eine möglichst geringe ungenutzte regenerative Leistung.

$$J = \int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_n (c_{n, \text{Ausgaben}}(u_n, p_n) - c_{n, \text{Einnahmen}}(u_n, p_n))^2 + q \cdot \Delta P_{\text{green}}(t) \right) dt \quad (1)$$

Die Ausgaben und Einnahmen eines Teilnehmers sind durch $c_{n, \text{Ausgaben}}(u_n, p_n)$ bzw. $c_{n, \text{Einnahmen}}(u_n, p_n)$ beschrieben. Diese Funktionen sind abhängig vom Reglerausgangsvektor u_n und den Reglerparametern p_n . $\Delta P_{\text{green}}(t)$ beschreibt die verfügbare, aber nicht genutzte regenerative Leistung. Der Faktor q dient der Gewichtung. Um das Stromnetz stabil zu halten, gilt die Randbedingung, dass die eingespeiste Leistung $P_{\text{Supply}}(t)$ zu jedem Zeitpunkt gleich der entnommenen Leistung $P_{\text{Demand}}(t)$ sein muss. In diesem Beitrag wurde als Proof of Concept ein erster einfacher Algorithmus implementiert, der dieses Optimierungsproblem noch nicht löst. Das implementierte Regelverfahren stellt den Preis $u_n(t)$ in Abhängigkeit der Zeit ein.

$$u_n(t) = \frac{u_{2,n} - u_{1,n}}{t_{a,n}} \cdot t + u_{1,n}$$

Die Parameter $u_{1,n}$ und $u_{2,n}$ stellen den minimalen bzw. den maximalen Preis dar, den ein Teilnehmer bereit ist zu akzeptieren. Die Zeit $t_{a,n}$ gibt, an wie weit im Voraus Lieferverträge geschlossen werden. Die Preisfunktion $u_n(t)$ implementiert mit einem linearen Preisanstieg das Verhalten eines Stromkunden, der seine Leistung absetzen muss und daher bereit ist, einen höheren Preis zu zahlen, je näher der Lieferzeitpunkt rückt. Bei einem Stromanbieter sind die Werte der Parameter $u_{1,n}$ und $u_{2,n}$ entsprechend vertauscht, sodass es zu einem linearen Preisabfall kommt.

6 Simulationsumgebung

Zur Simulation des Gesamtsystems bestehend aus Kommunikationsplattform, Zertifizierungsstelle und Teilnehmern wurde eine Simulationsumgebung aufgebaut. Abbildung 5 zeigt das Blockschaltbild dieser Simulationsumgebung. Über eine Benutzerschnittstelle werden alle Teilnehmer und die Simulation parametrisiert. Die Ergebnisse der Simulation werden durch eine Datenauswertung verarbeitet. Die Simulationsumgebung selbst besteht aus n Teilnehmern und der Zertifizierungsstelle. Diese Akteure kommunizieren untereinander mit Hilfe der Kommunikationsplattform, die als MQTT Broker implementiert ist.

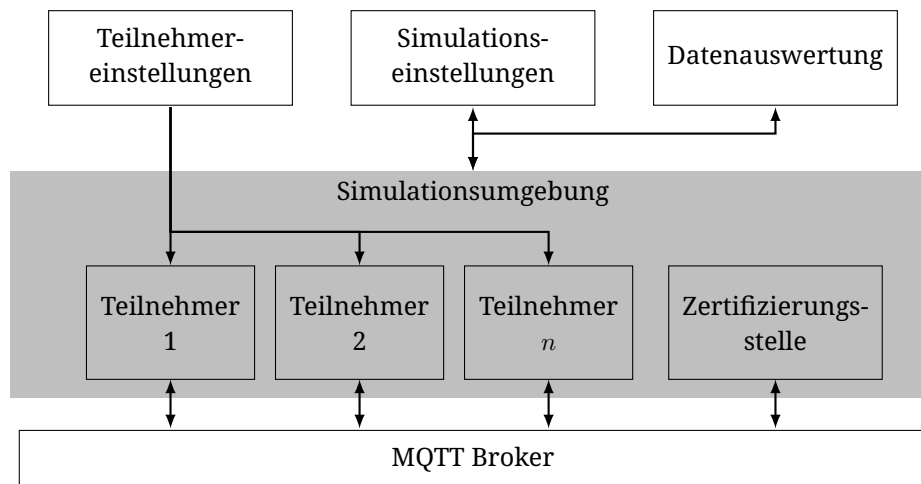


Bild 5: Blockdiagramm der Simulationsumgebung

Zu Beginn der Simulation wird die Zertifizierungsstelle initialisiert. Anschließend fragen die Akteure gegenüber der Zertifizierungsstelle ihre Zertifizierung an. Sind alle Akteure zertifiziert, beginnt die Simulation. Während des Simulationszeitraums führt jeder Teilnehmer seine Handlungen in einer unabhängigen, asynchronen Schleife aus. Dies spiegelt die Topologie eines realen Systems wider, in dem viele dezentrale Akteure ihre eigenen Leittechniksysteme haben werden. Die Simulationsuhr kann in ihrer Geschwindigkeit manipuliert werden, um lange Simulationszeiträume in einer akzeptablen Zeit zu berechnen.

7 Betrachtete Szenarios

Die Funktionsweise des in diesem Beitrags dargestellten Systems wird anhand eines Microgrids präsentiert, das aus den in Tabelle 1 gezeigten Teilnehmern besteht. In diesem Beitrag wird der Betrieb dieses Systems im Verlauf eines Tages simuliert. Hierzu ist die Berechnung der Leistungsprofile für

Tabelle 1: Teilnehmer und ihre Parameter im betrachteten Szenario

Teilnehmer	Leistung	u_1	u_2	t_a in h	Leistungsverlauf
Kernkraftwerk	1000 kW	500	100	4	konstant
Windpark	0 ... 500 kW	300	1	1.5	Windmodell
Solarpark	0 ... 750 kW	150	1	1.5	Solarmodell
Privathaushalte	190 ... 750 kW	1	450	3	H0-Profil
Industriebetrieb	900 kW	1	400	2.5	konstant
Elektrolyseur	500 kW	1	200	2	konstant

die verfügbare Leistung der Stromerzeuger bzw. die benötigte Leistung der Stromverbraucher erforderlich. Der im Folgenden verwendete Tagesverlauf dieser Leistungen ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Leistung des Kernkraftwerks wird als konstant angenommen. Aufgrund der geringen Dynamik eines Kernkraftwerks ist die Zeit t_a hoch eingestellt, denn das Kernkraftwerk muss seine erzeugte Leistung absetzen. Die Leistungen des Wind- und Solarparks wurden auf Grundlage der Wetterdaten von 2019 für Stuttgart berechnet. Die Modellierung dieser erneuerbaren Energiesysteme wurde durch eine Einbindung der pySAM Bibliotheken [23] realisiert. Das System-Advisor-Model (SAM) ist eine vom National Renewable Energy Laboratory veröffentlichte Software, die dazu dient, den Betrieb und die Wirtschaftlichkeit von konfigurierbaren erneuerbaren Energiesystemen zu simulieren. Diese erneuerbaren Energiesysteme zeichnen sich durch sehr geringe Gestehungskosten aus, was durch die Parameter u_1 und u_2 ausgedrückt ist. Die Leistung ist volatiler als die eines Kernkraftwerkes, was durch einen geringeren Wert für t_a ausgedrückt wird, bezogen auf den für das Kernkraftwerk angenommenen Wert. Die Leistung der Privathaushalte ist durch das H0-Profil des Bundesverbands der Energiewirtschaft (BDEW) modelliert. Der Industriebetrieb bezieht eine konstante Leistung aus dem Netz. Im Folgenden werden zwei Szenarios betrachtet, die sich durch die Betriebsführung des Elektrolyseurs unterscheiden. In Szenario A wird der Elektrolyseur konstant mit Nennleistung betrieben. In Szenario B wird der Elektrolyseur entsprechend seiner durch Lieferverträge festgelegten Leistung im Teillastbetrieb genutzt. Alle anderen Akteure speisen unabhängig von den geschlossenen Lieferträgen ihre Leistung ins Netz ein bzw. entnehmen diese Leistung.

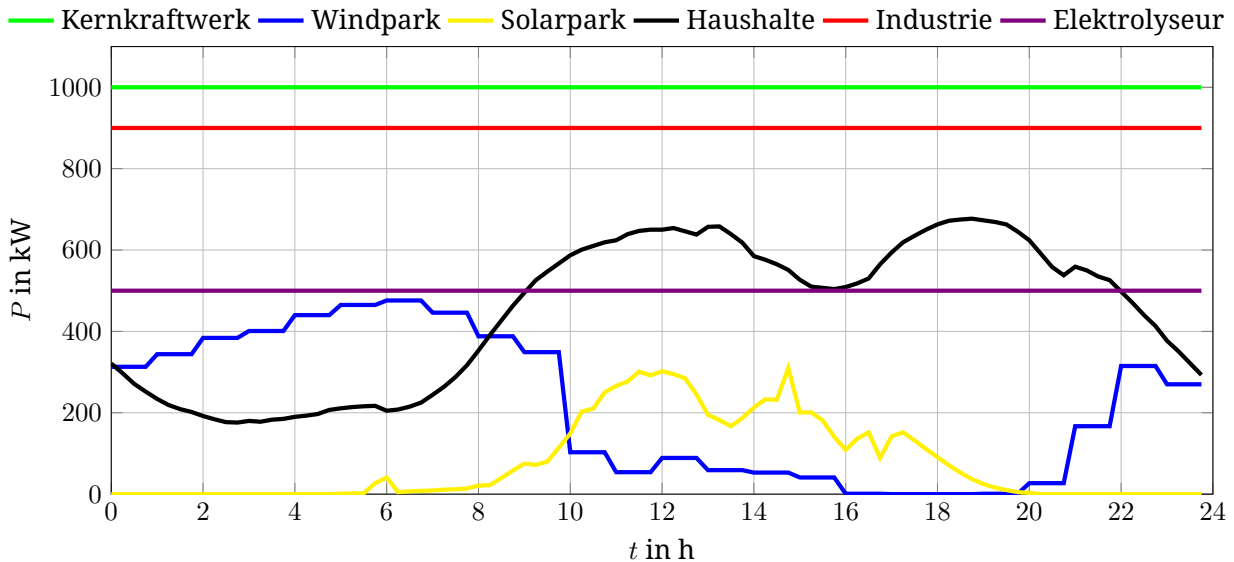


Bild 6: Leistung der Stromerzeuger und -verbraucher im Tagesverlauf der Simulation

8 Ergebnisse der Simulation

Abbildung 7 zeigt die Leistungsverläufe der einzelnen Teilnehmer für das Szenario A im zeitlichen Verlauf. In rot ist die Leistung dargestellt, die über die Kommunikationsplattform in Form von Lieferverträgen disponiert wurde. In blau ist die Leistung dargestellt, die der Teilnehmer ins Netz einspeist bzw. aus dem Netz entnimmt. Abbildung 7 zeigt, dass die verfügbare Leistung aller Stromerzeuger abgerufen und den Stromkunden allokiert wird. Die Leistung dieser Teilnehmer am Netz entspricht der Leistung, die durch Lieferverträge ausgehandelt wurde. Durch das Regelverfahren und die Parametrierung der Teilnehmer wird der Elektrolyseur mit niedrigster Priorität berücksichtigt. Hier ist nicht genug Leistung verfügbar, um den Elektrolyseur bei Nennleistung zu betreiben, wodurch sich die Leistung am Netz von der durch Lieferverträge geschlossenen Leistung unterscheidet. Der Bedarf der Privathaushalte und der Industriebedarf werden vollständig gedeckt. Bei $t = 0$ beginnen alle Akteure bei einer Leistung von 0 kW, da sich das System noch nicht im Gleichgewicht befindet. Diese Anlaufphase

muss in künftigen Beiträgen gesondert berücksichtigt werden.

Abbildung 8 zeigt im Vergleich zu Abbildung 7 das Szenario B, in dem der Elektrolyseur entsprechend dem durch die Lieferverträge gegebenen Bedarf im Teillastbetrieb genutzt wird. Durch den Teillastbetrieb ist der Elektrolyseur in der Lage, seine Leistung am Netz entsprechend der geschlossenen Lieferverträge anzupassen.

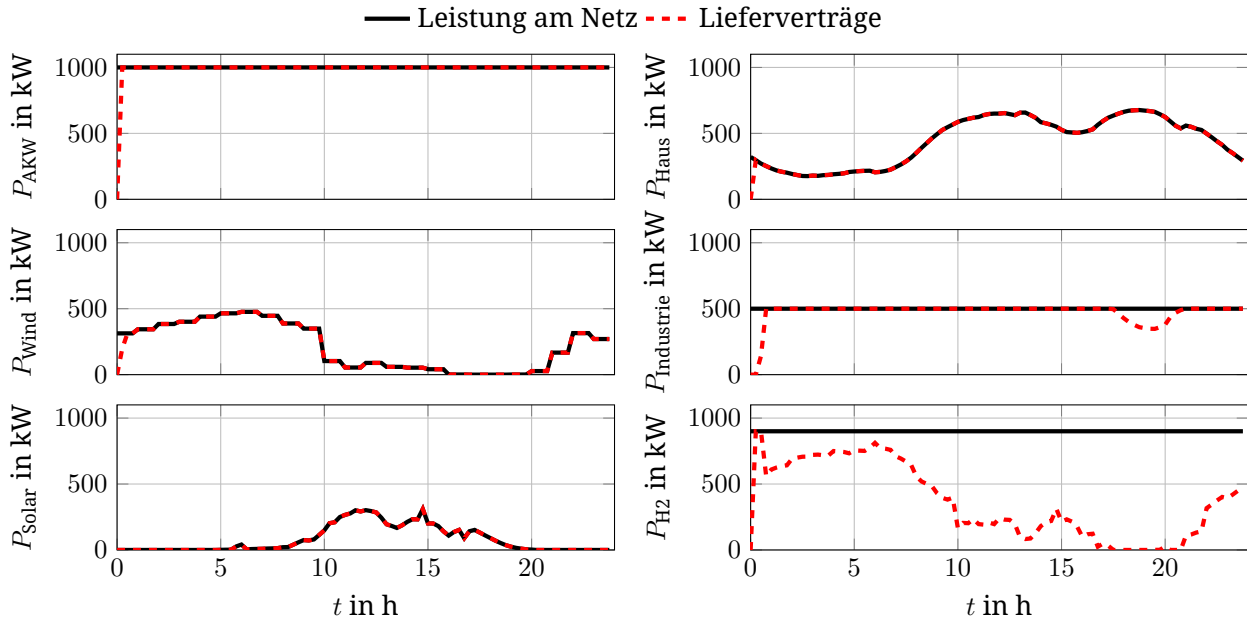


Bild 7: Leistungsverläufe der einzelnen Teilnehmer in Szenario A

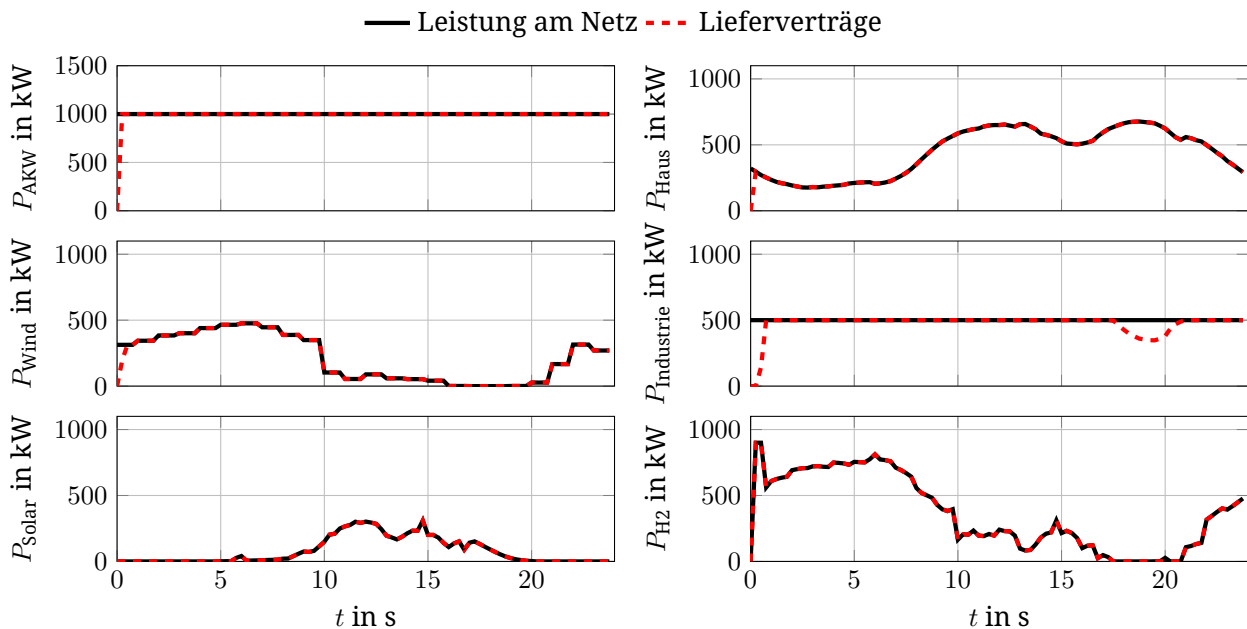


Bild 8: Leistungsverläufe der einzelnen Teilnehmer in Szenario B

Abbildung 9 zeigt die Leistungsdifferenzen am Netz (2) für das Szenario A bzw. Szenario B im Vergleich. In Szenario A ist die Leistungsbilanz nicht ausgeglichen. Über das öffentliche Stromnetz muss Leistung bezogen werden, um den Leistungsmangel auszugleichen. In Szenario B wird durch den Teillastbetrieb des Elektrolyseurs die entnommene Leistung der zur Verfügung stehenden Leistung angepasst. Der Elektrolyseur wird netzdienlich betrieben. Bei $t = 0$ ist das Anlaufverhalten des Systems zu sehen. Im

Zeitraum zwischen 17:30 und 21:00 ist die verfügbare Leistung aller Stromanbieter im Microgrid nicht ausreichend, um den Bedarf der Privathaushalte und der Industrie zu decken. Da das Microgrid netzgebunden ist, kann diese auftretende Differenz in einem solchen Fall über das öffentliche Stromnetz ausgeglichen werden.

$$\Delta P_{\text{Netz}}(t) = P_{\text{AKW}}(t) + P_{\text{Wind}}(t) + P_{\text{Solar}}(t) - P_{\text{Haus}}(t) - P_{\text{Industrie}}(t) - P_{\text{H}_2}(t) \quad (2)$$

Diese Ergebnisse zeigen, dass mit der vorgestellten Kommunikationsplattform und der hier präsentierten einfachen Regelstrategie ein Demand-Management realisiert wird. Dies führt dazu, dass überschüssiger regenerativer Strom nicht abgeregelt werden muss, sondern zur wirtschaftlich wettbewerbsfähigen und netzdienlichen Erzeugung von grünem Wasserstoff dient. Das direkte Zusammenbringen von Stromanbietern und -kunden bildet nach marktmechanischen Prinzipien den Strompreis. Die Regelstrategie führt zu einer ausgeglichenen Leistungsbilanz und in der Folge zu einem stabilen Stromnetz.

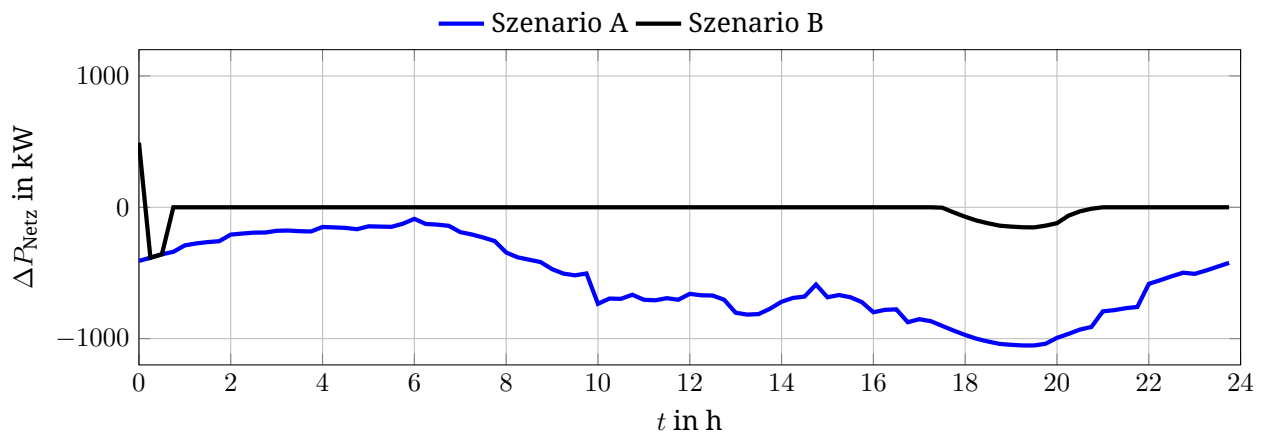


Bild 9: Vergleich der Leistungsdifferenz im Netz

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung bringt signifikante Volatilität ins Stromnetz ein. Dieses Problem wird nach jetzigem Stand der Technik durch ein Supply Management, also das Abschalten der überschüssigen Leistung gelöst. Diese Vorgehensweise ist ineffizient, da verfügbare Leistung nicht genutzt wird. Der vorliegende Beitrag bietet eine Simulationsumgebung, mit der ein Konzept entwickelt und getestet werden kann, das die verfügbare regenerative Leistung wirtschaftlich und effizient verteilt, sodass überschüssige Leistung zur Herstellung von grünem Wasserstoff genutzt werden kann.

Zu diesem Zweck wurden einzelne Akteure am Stromnetz zu einem netzgebundenen Microgrid gruppiert. Eine Teilnahme am Microgrid ist nur durch vorherige Zertifizierung gegenüber einer Zertifizierungsstelle möglich. Teilnehmer am Microgrid können bestimmt durch ihr lokales Regelverfahren ihre verfügbaren oder benötigten Ressourcen über eine Kommunikationsplattform veröffentlichen und mit anderen Teilnehmern kommunizieren. Der Strompreis bildet sich durch Angebot und Nachfrage der Teilnehmer und vermeidet dabei das Merit-Order-Prinzip. Erste Simulationsergebnisse zeigen, dass durch dieses direkte Gegenüberstellen von Anbieter und Kunde eine effiziente Allokierung der verfügbaren Leistung möglich ist. Im Gegensatz zum Stand der Technik wird ein Demand-Management realisiert und durch die verbindlichen Lieferverträge ein stabiles Stromnetz geschaffen.

Im weiteren Verlauf des Projekts muss die Simulationsplattform ausgebaut werden, um größere Zeiträume und komplexere Szenarien simulieren zu können. Dazu zählt die Einführung eines Buchhalters in die Kommunikationsplattform. Der Buchhalter überwacht die Einhaltung der geschlossenen Lieferverträge. Sollte es zu Abweichungen bei den Liefermengen kommen, passt der Buchhalter die Rechnungsbeträge an und veranlasst ggf. Strafzahlungen. Die Leistungsfähigkeit der Kommunikationsplattform muss erweitert werden, um viele dezentrale Teilnehmer in Echtzeit einbinden zu können.

Eine Lösung für das formulierte Optimierungsproblem muss als dezentrale Regelstrategie implementiert und evaluiert werden. Schließlich sollten die Ergebnisse dieser Arbeiten an einem Microgrid im Labormaßstab getestet werden, bevor das Gesamtsystem an realen Anlagen in Betrieb geht.

10 Literatur

- [1] Deutsche Energie-Agentur GmbH, “dena-leitstudie aufbruch klimaneutralität,” vol. 2021. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf
- [2] J. Li, J. Lin, H. Zhang, Y. Song, G. Chen, L. Ding, and D. Liang, “Optimal investment of electrolyzers and seasonal storages in hydrogen supply chains incorporated with renewable electric networks,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy, Sustainable Energy, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1773–1784, 2020.
- [3] D. Gusain, M. Cvetkovic, R. Bentvelsen, and P. Palensky, “Technical assessment of large scale pem electrolyzers as flexibility service providers,” in *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, 17.06.2020 - 19.06.2020, pp. 1074–1078.
- [4] S. R. Ghatak, S. Sannigrahi, and P. Acharjee, “Design framework for optimal deployment of photovoltaic hydrogen system with battery storage in unbalanced distribution system,” *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 2020 IEEE International Conference on*, pp. 473–479, 2020.
- [5] Z. Yang, C. Gao, B. Tang, H. Zhang, Y. Cao, and W. Tian, “The power-to-hydrogen capacity optimization for balancing fluctuant wind power,” *2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), Systems and Informatics (ICSAI), 2017 4th International Conference on*, pp. 278–282, 2017.
- [6] C. Darras, M. Muselli, P. Poggi, C. Voyant, J.-C. Hogue, and F. Montignac, “Pv output power fluctuations smoothing: The myrte platform experience,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 19, pp. 14 015–14 025, 2012.
- [7] J. Vaculik, Z. Hradilek, P. Moldrik, and D. Minarik, “Calculation of efficiency of hydrogen storage system at the fuel cells laboratory,” in *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE, 12.05.2014 - 14.05.2014, pp. 381–384.
- [8] D. Iannuzzi and M. Pagano, “Efficiency of hydrogen based storage systems for stand-alone pv applications: Numerical and experimental results,” in *2009 International Conference on Clean Electrical Power*. IEEE, 09.06.2009 - 11.06.2009, pp. 555–561.
- [9] Deutsche Energie-Agentur GmbH, “Power to x: Technologien.” [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf
- [10] C. Hebling, M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle, A. Held, M. Jahn, N. Müller, T. Pfeifer, P. Plötz, O. Ranzmeyer, A. Schaadt, F. Sensfuß, T. Smolinka, M. Wietschel, “Wasserstoff-roadmap für deutschland,” 2019. [Online]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf
- [11] A. Ghayur and T. V. Verheyen, “Increasing hydrogen energy efficiency by heat integration between fuel cell, hydride tank and electrolyzer,” in *2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)*. IEEE, 09.12.2019 - 11.12.2019, pp. 1–4.
- [12] J. Li, J. Lin, Y. Song, X. Xing, and C. Fu, “Operation optimization of power to hydrogen and heat (p2hh) in adn coordinated with the district heating network,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy, Sustainable Energy, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1672–1683, 2019.
- [13] G. Pan, W. Gu, Y. Lu, H. Qiu, S. Lu, and S. Yao, “Optimal planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering power to hydrogen and heat and seasonal storage,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy, Sustainable Energy, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2662–2676, 2020.
- [14] J. Matsuura, K. Kawahara, and Z. Yoshifumi, “Optimal control of a hybrid system of photovoltaic and fuel cell in residential use,” in *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1–5.
- [15] N. A. El-Taweel, H. Khani, and H. E. Z. Farag, “Hydrogen storage optimal scheduling for fuel supply and capacity-based demand response program under dynamic hydrogen pricing,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4531–4542, 2019.
- [16] T. Chaiyatham and I. Ngamroo, “Alleviation of power fluctuation in a microgrid by electrolyzer based on optimal fuzzy gain scheduling pid control,” *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, no. 2, p. 158, 2014.
- [17] Y. Luo, M. Xian, M. Mohanpurkar, B. P. Bhattarai, A. Medarn, R. Kadavil, and R. Hovsopian, “Optimal scheduling of electrolyzer in power market with dynamic prices,” in *2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [18] E. Espina, J. Llanos, C. Burgos-Mellado, R. Cardenas-Dobson, M. Martinez-Gomez, and D. Saez, “Distributed control strategies for microgrids: An overview,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 193 412–193 448, 2020.

- [19] J. F. Martins, E. Romero-Cadaval, D. Vinnikov, and M. Malinowski, “Transactive energy: Power electronics challenges,” *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 20–32, 2022.
- [20] M. H. Cintuglu and O. A. Mohammed, “Behavior modeling and auction architecture of networked microgrids for frequency support,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 1772–1782, 2017.
- [21] M. R. Frank Sensfuß, “Analyse des preiseffektes der stromerzeugung aus erneuerbaren energien auf die börsenpreise im deutschen stromhandel: -analyse für das jahr 2006-: Gutachten im rahmen von beratungsleistungen für das bundesministerium für umwelt, naturschutz und reaktorsicherheit (bmu),” *Fraunhofer Insitut für System- und Innovationsforschung*, vol. 2007. [Online]. Available: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/65ed9ffd-5bf6-4374-b775-59c4f7a25c12/content>
- [22] J. Buchmann, *Einführung in die Kryptographie*, 5th ed., ser. Springer-Lehrbuch. Berlin and Heidelberg: Springer, 2010.
- [23] National Renewable Energy Laboratory, “System advisor model (sam),” Download, 2022. [Online]. Available: <https://sam.nrel.gov/>

Danksagung: Diese Arbeit wurde durch den Europäischen Fond für Regionale Entwicklung (EFRE) Baden-Württemberg und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.