

# Netzintegration von Brennstoffzellen- und Elektrolysesystemen: Anwendungen und technische Ausführung

Marc Schumann<sup>\*‡</sup>, Daniela Vorwerk<sup>‡</sup>, Detlef Schulz

*Elektrische Energiesysteme*  
*Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg*  
 Hamburg, Deutschland  
<sup>\*</sup>marc.schumann@hsu-hh.de

<sup>‡</sup>Diese Autoren haben in gleichem Maße an diesem Beitrag mitgewirkt

**Kurzfassung** – Brennstoffzellen- und Elektrolysesysteme nehmen im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie als Beitrag für die Klimaneutralität des Energiesektors einen wichtigen Stellenwert ein. Die Elektrolyse als „Power-to-Gas“-Technologie bietet Potential zur Wandlung von regenerativem Strom zu speicherbarem Wasserstoff, welcher mittels der „Gas-to-Power“-Technologie Brennstoffzelle im Falle von elektrischen Bedarfen rückverstromt werden kann. Elektrolyseure sind bereits als Großanlagen zur Herstellung von Wasserstoff etabliert. Die Brennstoffzellentechnologie ist vielseitig einsetzbar und findet daher bereits in zahlreichen Bereichen und breiten Leistungsspektren Anwendung, z. B. als Heizsystem für Wohngebäude, zur Notstromversorgung oder in Großanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung. Die Stromnetzinfrastruktur ist weitestgehend als Drehstromsystem ausgebaut, daher muss der technische Anschluss der mit Gleichstrom arbeitenden Zellen zum sicheren Netzparallelbetrieb mittels zusätzlicher Leistungselektronik vorgenommen werden. Die bereits bestehende Erdgasinfrastruktur bietet Kapazität zur Speicherung regenerativ erzeugter Gase und ermöglicht somit die Erschließung weiterer Nutzungspfade von regenerativen Energien. Zur zuverlässigen Einspeisung durch Power-to-Gas-Anlagen in Gasleitungen der öffentlichen Gasversorgung bedarf es weiterer technischer Komponenten über den Elektrolyseur hinaus. Die maximal zulässige Einspeisemenge an reinem Wasserstoff in erdgasführende Leitungen wird maßgeblich durch die Wasserstoff-verträglichkeit der Netz- und Verbraucherkomponenten limitiert. Für die Einspeisung von synthetischem Methan bestehen Anforderungen an Reinheit und Beschaffenheit des einzuspeisenden Gases.

**Stichworte** – Netzintegration, Dezentrale Erzeugung, Power-to-Gas, Gas-to-Power

## NOMENKLATUR

ATS	Automatischer Trennschalter
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle
DN	Normdurchmesser
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EL	Elektrolyse

GDRM	Gasdruckregel- und Messanlage
HT	Hochtemperatur
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NEA	Netzersatzanlage
NT	Niedertemperatur
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
PEMFC	Polymerelektrolytmembran-brennstoffzelle (engl.: Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
PGC	Prozessgaschromatograph
SOFC	Festoxidbrennstoffzelle (engl.: Solid Oxide Fuel Cell)
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

## I. EINLEITUNG

„Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“

(Jules Verne, „Die geheimnisvolle Insel“, 1870)

Dieses Zitat ist insbesondere 150 Jahre nach seiner Entstehung brandaktuell. Heutzutage stehen wir durch die von Treibhausgasemissionen getriebene Erderwärmung vor der großen Herausforderung der Dekarbonisierung unseres Energiesystems [1]. In der Bundesrepublik Deutschland sind Kohle- und Atomausstieg bereits beschlossene Sache, alle Zeichen stehen auf umweltfreundliche Energieversorgung. Regenerative Erzeuger, wie Wind- und Solaranlagen, tragen dazu einen wichtigen Teil bei – allerdings unterliegt deren Dargebot natürlichen Fluktuationen. Neben zahlreichen etablierten Energiespeichertechnologien können auch Elektrolyseure und Brennstoffzellen im Rahmen der Energiewende eine wichtige Rolle spielen [1], [2]. Bei der Brennstoffzelle wird im Zuge der „kalten“ Verbrennung durch die Zufuhr von Wasserstoff und Luft (Sauerstoff) Strom und Wärme als sog. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Wasser als Reaktionsprodukt erzeugt. Der umgekehrte Prozess zur

Brennstoffzelle, der Elektrolyseprozess, spaltet Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff mittels elektrischer Leistungszufuhr [1]. Durch die Prozesse in Brennstoffzelle bzw. Elektrolyseur lassen sich die Energiesektoren Strom und Gas miteinander verbinden, wodurch Redundanz, Resilienz, Flexibilität, Übertragungs- und Speicherkapazität eines Energiesystems erhöht werden können [2]. Überschüssige Leistungsspitzen erneuerbarer Erzeugung werden durch Power-to-Gas-Verfahren in Elektrolyseuren in „grünes Gas“ umgewandelt und somit speicherbar gemacht, wohingegen im Falle einer „Dunkelflaute“ die Rückverstromung durch Brennstoffzellenkraftwerke erfolgen kann.

Die technische Anbindung von Brennstoffzellen- und Elektrolysesystemen an bestehende Energieversorgungsnetze ist vorrangiges Thema dieses Beitrages. Der Betrieb von Elektrolyseuren erfolgt mittels Aufnahme von Gleichstrom, umgekehrt liefert die Brennstoffzelle Gleichstrom. Allerdings liegt das europäische elektrische Energieversorgungssystem überwiegend als Drehstromsystem in verschiedenen Spannungsebenen (Höchst-/Hoch-, Mittel- und Niederspannung) vor. Für die entsprechende Netzanbindung von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren bedarf es daher zusätzlicher Leistungselektronik, um diese Technologien im Netzparallelbetrieb einzusetzen. Darüber hinaus stellt Wasserstoff den Brennstoff für den Brennstoffzellenprozess und das Produkt aus der Wasserelektrolyse dar – allerdings besteht die Gasinfrastruktur derzeit in Deutschland noch fast ausschließlich aus Erdgasleitungen. Das dort geführte Erdgas, vorwiegend aus Methan bestehend, darf nach derzeitigem Stand nur bis zu maximal 10 Vol.-% Wasserstoff beinhalten [3], um den sicheren und zuverlässigen Betrieb der auf Erdgas ausgelegten Netzkomponenten und Endverbraucher nicht zu gefährden [4]. Zum Anschluss von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren an die Erdgasinfrastruktur sind daher zusätzliche Prozessschritte der Gasaufbereitung notwendig. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über stationäre Anwendungsmöglichkeiten und realisierte Anlagen der beiden Technologien gegeben, anschließend werden strom- und gasseitige technische Ausführungen zum Netzparallelbetrieb erläutert.

## II. STATIONÄRE ANWENDUNG VON BRENNSTOFFZELLEN UND ELEKTROLYSEUREN

### A. Brennstoffzellen

Brennstoffzellen finden u. a. Verwendung in der Heizbedarfsdeckung von Wohngebäuden [5], in der Notstromversorgung für kritische Infrastrukturen [6] und in Industrie- und Gebäudeanlagen mit großen Leistungsbedarfen an Strom und Wärme [7], [8]. Der Leistungsbereich erstreckt sich dabei von unter einem bzw. wenigen kW<sub>el</sub> für die Hausenergieversorgung [9] bis zum MW-Bereich bei Brennstoffzellenkraftwerken [10].

#### 1) Brennstoffzellenheizung in der Hausenergieversorgung

Immer mehr Hersteller bieten Brennstoffzellenheizungen anstelle von Gaskesseln für die Wärmeversorgung in Gebäuden an [5]. Ein Vorteil für die Installation von Brennstoffzellen im Haushaltssektor besteht durch die leichte Substitution konventioneller erdgasversorgter Heizungsanlagen bei bereits vorhandenem Gashausanschluss. Durch das Prinzip der KWK in Brennstoffzellen kann neben den Bedarfen für Raumwärme und Brauchwassererwärmung auch ein Teil des eigenen elektrischen Bedarfs gedeckt oder gegen

Vergütung eingespeist werden [5]. Für die Anwendung in der Hausenergieversorgung haben sich die beiden Zelltypen Polymerelektrolytmembran- (PEM) und Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) herauskristallisiert [5]. Die Niedertemperatur-PEMFC (NT-PEMFC) kommt dabei wirtschaftlich ausschließlich für Neubauten mit Niedertemperatur-Heizanlagen in Frage, wohingegen die Hochtemperatur-PEMFC (HT-PEMFC) und SOFC für den allgemeinen Gebäudebestand geeignet ist [5]. Zur Sicherung des gleichmäßigen Betriebs dient ein Wärmespeicher, der z. B. in Form eines Pufferspeichers bereitgestellt werden kann, zudem kann ein zusätzlicher Spitzenlastkessel installiert werden [5]. Die Wärmeleistung für solche Brennstoffzellenheizungen beträgt zwischen wenigen und mehr als 30 kW<sub>th</sub>. Der Betrieb erfolgt oftmals wärmegeführt mit kleinen Stromziffern. Der elektrische Anschluss besteht dabei auf der Niederspannungsebene (400 V) [11].

#### 2) Brennstoffzellen zur Ersatzstromversorgung

Bei der Ersatzstromversorgung wird zwischen den Anwendungen unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Netzersatzanlage (NEA) unterschieden. Durch die USV soll bei Ausfall der primären Energiequelle unmittelbar eine kurzzeitige Versorgung von Verbrauchern gewährleistet werden. Daher sind diese Technologien oft nur für kurze Überbrückungszeiten dimensioniert. Dabei hat sich nach heutigem Stand die Technologie der Blei-Säure-Akkus durchgesetzt [6]. Die NEA hingegen dienen zur temporären Versorgung von ganzen Netzbereichen über längere Ausfallzeiten der Hauptversorgung. Aufgrund einer gewissen Anlaufzeit werden sie oftmals um eine USV ergänzt [6]. Klassische NEA sind heute Dieselgeneratoren. Bisher führen Brennstoffzellen neben den etablierten Technologien für USV und NEA noch ein „Nischendasein“ [6].

Allerdings weisen Brennstoffzellen in der Notstromversorgung Vorteile gegenüber herkömmlichen Anlagen auf. Für die individuellen Standortanforderungen an die jeweilige Notstromversorgung muss stets die geeignete Technologie herangezogen werden. Schnelles Anlaufverhalten bei Netzausfall bieten z. B. die NT-Typen PEMFC und Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFC), die ihre Nennleistung üblicherweise nach einer Anlaufzeit zwischen 30 Sekunden und 3 Minuten erreichen. Zur Überbrückung bei kleinen Leistungen kann dabei durch Anwendung von Doppelschichtkondensatoren, sog. „Superkondensatoren“ vollständig auf Batterien verzichtet werden. Ein Nachteil ist dabei der Kostenpunkt, allerdings zeichnen sich Superkondensatoren durch hohe Zyklenfestigkeit und geringe Wartungsintensität aus [6]. Ein weiterer Vorteil der Brennstoffzellentechnologie gegenüber Akkus und Batterien ist, dass diese bei Nichtbetrieb keinen elektrochemischen Verschleiß aufweist, wodurch sich Degradationseffekte verringern. ABBILDUNG 1 zeigt die Möglichkeiten zur Integration von Brennstoffzellen in DC-USV bzw. AC-USV.

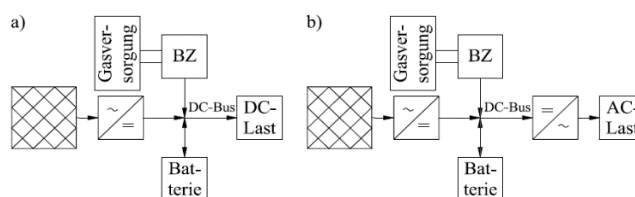


ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHER AUFBAU EINER USV MIT BRENNSTOFFZELLENERWEITERUNG. A) VERSORGUNG EINES GLEICHSPANNUNGSVERBRAUCHERS, B) VERSORGUNG EINES WECHSELSPANNUNGSVERBRAUCHERS, EIGENE DARSTELLUNG NACH [6].

Der Betrieb von z. B. PEMFC mit Druckwasserstoff und Luftkühlung bedeutet zudem einen komponentenarmen Aufbau und einen niedrigen Betreuungsaufwand, DMFC werden mit flüssigem Methanol in einfach zu handhabenden Tankpatronen betrieben. Darüber hinaus sind Brennstoffzellen modular über weite Leistungsbereiche, i. d. R. etwa zwischen 20 % und 100 % ihrer Nennleistung zu betreiben und effizienter im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren [6]. ABBILDUNG 2 zeigt den schematischen Aufbau einer Brennstoffzellen-NEA.

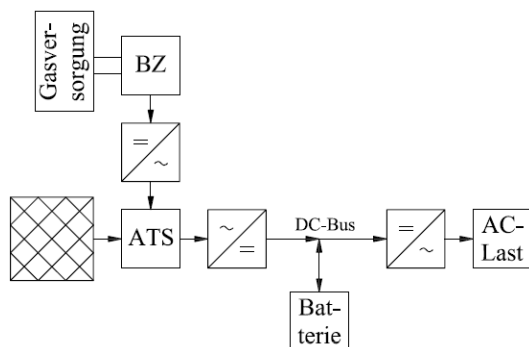


ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHER AUFBAU EINER AC-USV MIT ERWEITERUNG EINER BZ-NEA MIT AUTOMATISCHEM TRENN-SCHALTER (ATS), EIGENE DARSTELLUNG NACH [6].

### 3) Brennstoffzellenkraftwerke

Beim Betrieb von Brennstoffzellen in KWK können diese bei größeren installierten Leistungen durch deren ständige Verfügbarkeit in industriellen Standorten zur Deckung der Eigenbedarfe von Strom und Prozesswärme oder zur Versorgung von größeren Gebäudekomplexen wie Krankenhäusern, Universitäten und ganzen Wohngebieten dienen [8], [12]. Im Gegensatz zu herkömmlichen Blockheizkraftwerken (BHKW), die für den Einsatz als KWK-Anlagen nur gleichmäßig optimal betrieben werden können, bietet die Brennstoffzelle flexiblere Arbeitspunkte auch bei geringem Wärmebedarf [13]. Mittlerweile werden dezentrale Brennstoffzellenkraftwerke in einem großen Leistungsspektrum z. B. zwischen 250 kW und 2,8 MW z. B. von dem Hersteller FuelCell Energy Solutions angeboten [14].

Seit 2016 ist das erste industrielle Brennstoffzellenkraftwerk in Betrieb, welches die Schwelle über 1 MW in der Bundesrepublik Deutschland übertreten hat [7], [12]. Dabei handelt es sich um eine Schmelzkarbonatbrennstoffzelle, welche zu den HT-Brennstoffzellen zählt [15]. Dieses Brennstoffzellenkraftwerk mit einer Leistung von 1,4 MW und einem elektrischen Wirkungsgrad von etwa 47 % soll dabei den Werkstoffhersteller Friatec AG in Mannheim durch KWK mit bis zu 60 % des Eigenbedarfs an elektrischer Leistung und Wärme versorgen [12], [15], [16]. Die dabei anfallende Prozesswärme mit einem Temperaturniveau von bis zu 400 °C kann in verschiedenen Produktionsprozessen nutzbar gemacht werden [12]. Die Versorgung vieler Brennstoffzellentechnologien mit Erdgas hat eine notwendige Abspaltung des Kohlenstoffs zur Folge [17]. Dafür fallen weniger andere Schadstoffe wie Stickoxide, Schwefeloxide und Feinstaub als bei der klassischen Verbrennung von Erdgas an. Perspektivisch kann die Anlage auch mit Biogas oder reinem Wasserstoff betrieben werden, wobei auf die interne Reformierung verzichtet werden könnte [17].

Darüber hinaus sind von der Firma FuelCell Energy die Brennstoffzellenkraftwerke SureSource 1500 mit einer elektrischen Leistung von 1,4 MW bzw. 4000 mit 3,7 MW entwickelt worden. Diese weisen jeweils elektrische Wirkungsgrade von rund 47 % bzw. 60 % auf. Standardmäßig erfolgt der elektrische Anschluss der Anlagen bei 20 kV AC, erdgasseitig ist ein Anschluss für eine Fördermenge von 309 Nm<sup>3</sup>/h für die 1,4 MW-Lösung, bzw. von 650 Nm<sup>3</sup>/h für die Leistung von 3,7 MW erforderlich [8], [10]. Die Ausführung SureSource-Recovery bietet eine Möglichkeit zur Verwendung der ungenutzten Energie an Druckminderungsstationen in der Erdgasinfrastruktur [18].

## B. Einsatz von Elektrolyseanlagen

### 1) Großelektrolyseure als Power-to-Gas Einheit

Mittlerweile sind in der Bundesrepublik Deutschland zahlreiche Großelektrolyseure installiert, welche überschüssigen regenerativen Strom in „grünen Wasserstoff“ umwandeln. Im Hamburger Hafen wird derzeit die weltweit größte Gesamtleistung von 100 MW für Elektrolyseanlagen geplant [19]. Dabei sind die Verwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff vielfältig: Er kann entweder in der chemischen Industrie stofflich genutzt werden, bis zu einem gewissen Grad direkt in die Erdgasinfrastruktur eingespeist, in Trailern gespeichert oder Wasserstofftankstellen für Brennstoffzellenfahrzeuge zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus bietet ein lokal in der Nähe gelegenes BHKW die Möglichkeit zur Rückverstromung. Im Zuge einer Methanisierung des Wasserstoffs kann dieses synthetische Methan in Erdgasleitungen eingespeist werden und unterliegt dabei den Kriterien des DVGW-Regelwerks.

### 2) Elektrolyseure zur Belieferung von Wasserstofftankstellen

Im Rahmen des „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP) unterstützt das Bundesverkehrsministerium neben der Elektrifizierung des Verkehrssektors durch batteriebetriebene Elektroautos seit 2007 auch die Elektromobilität mit Brennstoffzellen als Antriebstechnologie [20]. Im Zeitraum 2016-2026 wird mit NIP II die Marktvorbereitung entsprechender Technologien angestrebt [20]. Der Vorteil gegenüber der batteriebetriebenen Elektromobilität liegt in kürzeren Tankzeiten bei hoher Reichweite [21]. Im Januar 2020 waren in der Bundesrepublik bereits 87 Wasserstofftankstellen installiert [21].

Grundsätzlich kann der Wasserstoff an Tankstellen flüssig oder gasförmig vorliegen. Gasförmiger Wasserstoff wird entweder bei 20 °C und 350 bar oder bei -40 °C und 700 bar bereitgestellt. Die Bereitstellung von gasförmigem Wasserstoff weist gegenüber der Verflüssigung wesentliche energetische Vorteile auf. Die Belieferung von Wasserstofftankstellen wird z. T. durch lokale Wasserstoffnetze realisiert, die von z. B. an Windparks angeschlossenen Elektrolyseuren gespeist werden [21]. Größere Wasserstoffinfrastrukturen würden die Anschlüsse weiterer Tankstellen ermöglichen.

## III. NETZINTEGRATION VON BRENNSTOFFZELLEN

### A. Elektrische Netzanbindung

Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Brennstoffzellen ergibt sich die Notwendigkeit zur Implementierung einer Vielzahl an Topologien für die elektrische Netzanbindung mit unterschiedlich ausgeprägter Komplexität. In den folgenden Abschnitten werden grund-

legende Prinzipien zur Netzintegration von Brennstoffzellen vorgestellt.

### 1) Gleichspannungsnetz

Die Integration von Brennstoffzellen in Gleichspannungsnetze weist den geringsten Komplexitätsgrad auf, da Brennstoffzellen direkt Gleichstrom erzeugen. Mögliche Anwendungsfälle für diesen Fall sind z. B. die Energieversorgung der Hilfsaggregate in Flugzeugen [22] oder eines mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugs bei Nutzung eines Gleichstrommotors [23].

Eine prinzipielle Netzanbindung an ein Gleichspannungsnetz mitsamt den aufzunehmenden Betriebsparametern zur Regelung ist in **ABBILDUNG 3** dargestellt. Durch eine Diode wird der unerwünschte Stromfluss in Richtung Brennstoffzelle verhindert. Anschließend wird die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle über einen DC/DC Wandler an das Spannungsniveau des Netzes bzw. der Last angepasst. Je nach Auslegung des Systems ist hier ein Tiefsetzsteller, ein Hochsetzsteller oder eine Kombination notwendig [24], [25]. Ein zusätzlicher Kurzzeitenergiespeicher, wie eine Batterie oder ein Superkondensator, tragen unterstützend zur Energieversorgung im Falle von schnellen Lastwechseln oder bei Spitzenlasten bei, falls das Brennstoffzellensystem hierfür nicht ausgelegt ist [24], [25]. Weitere, mit Gleichstrom betriebene Hilfsaggregate können hier ebenfalls versorgt werden. Für die Regelung werden u. a. die Parameter Massenströme  $\dot{m}$ , Gasdrücke  $p$ , Gasfeuchten  $\varphi$  und Zelltemperatur  $T$  aufgenommen. Zudem werden die Spannungen  $U$  und Ströme  $I$  hinter der Brennstoffzelle und hinter dem DC/DC Wandler gemessen. Mithilfe dieser Eingabegrößen erfolgt die Regelung der Gasversorgung und des DC/DC Wandlers, um die benötigte Leistung bei geforderter Spannung bereitzustellen [24].

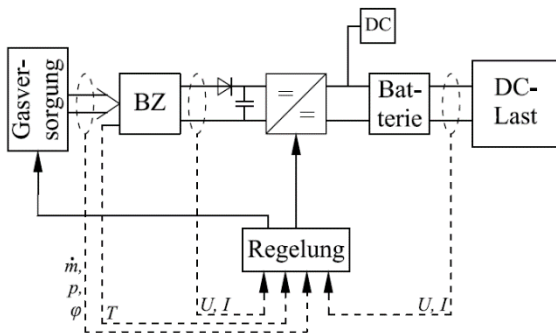


ABBILDUNG 3: NETZINTEGRATION EINER BRENNSTOFFZELLE (BZ) AN DAS GLEICHSPANNUNGSNETZ, EIGENE DARSTELLUNG NACH [24].

In **ABBILDUNG 4** wird eine mögliche Optimierung der Netzintegration von Brennstoffzellen z. B. für Bordnetz-anwendungen in Flugzeugen oder Kraftfahrzeugen präsentiert. Hierbei führt die Nutzung eines Bypass-Wandlers zu einer gewichts- und kostenoptimierten Auslegung des nachfolgenden DC/DC-Wandlers, ausgeführt als Tiefsetzsteller [22]. Ermöglicht wird dies, indem aufgrund der Auslegung des Systems ein Großteil des lieferbaren Spannungsbandes mit dem Spannungsband des Bordnetzes übereinstimmt. Dadurch kann die Leistung über den Bypass-Wandler übertragen werden. Der DC/DC-Wandler wird nur noch für die Leistung dimensioniert, die bei einer Verletzung des Spannungsbandes übertragen werden muss. Hier eignet sich die Kombination aus Brennstoffzellensystem mit einem DC/DC-Wandler als Tiefsetzsteller-Topologie, da die

Brennstoffzelle bei höheren Spannungen geringere Leistungen bereitstellt [22].

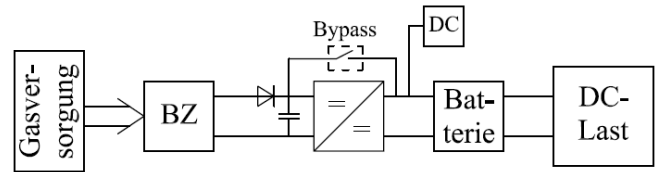


ABBILDUNG 4: OPTIMIERTE INTEGRATION EINER PEM BRENNSTOFFZELLE MITTELS BYPASS-WANDLER Z.B. IN EINEM FLUGZEUG-BORDNETZ, EIGENE DARSTELLUNG NACH [22], [24].

### 2) Wechselspannungsnetz

Zum Anschluss von Brennstoffzellen an ein Wechselspannungsnetz wird die bisher gezeigte Topologie zur Anbindung an das Gleichspannungsnetz um einen 1-phasigen oder 3-phasigen Wechselrichter erweitert [24], [25]. **ABBILDUNG 5** zeigt eine mögliche Topologie und die Regelung für die Integration in das Wechselspannungsnetz.

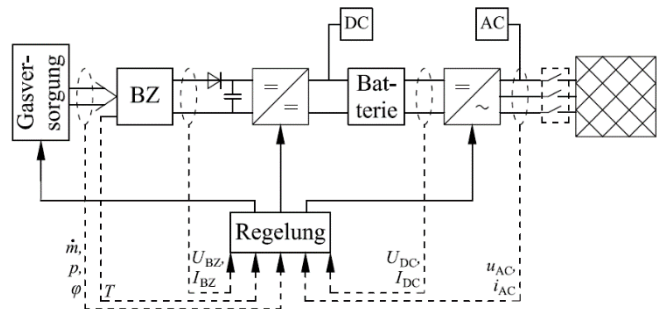


ABBILDUNG 5: NETZINTEGRATION EINER BRENNSTOFFZELLE AN DAS WECHSELSPANNUNGSNETZ, EIGENE DARSTELLUNG NACH [24].

Die Wechselrichtung des Stroms ermöglicht ebenfalls die Versorgung entsprechender Hilfsaggregate. Anschließend kann die Brennstoffzelle über Schalter und einen Transformator (hier nicht eingezeichnet) dem Netz zugeschaltet werden [24], [25]. Bei der Zuschaltung muss u. a. beachtet werden, dass Netzspannung, -frequenz und Phasenlage übereinstimmen und Inselnetzbildung bei Trennung vom Netz vermieden wird [24]. Die Regelung bei der Integration an das Gleichspannungsnetz, wie in **ABBILDUNG 3** dargestellt, wird um die Messungen der Wechselspannung  $u_{AC}$  und des Wechselstroms  $i_{AC}$ , mit deren Hilfe der Wechselrichter geregelt werden kann, erweitert [24].

Die derzeit an der Professur für Elektrische Energiesysteme der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg stattfindende Entwicklung elektrisch steuerbarer Membranen speziell für Brennstoffzellen mit einer Polymer-elektrolytmembran könnte weitere Vorteile für die Netzintegration bieten. Hierbei wird der Aufbau der Brennstoffzelle um einen „Electric Field Modifier“ (EFM) erweitert, der es ermöglicht, mithilfe eines zusätzlichen elektrischen Feldes die Dynamik der Brennstoffzelle zu beeinflussen [26], [27]. In **ABBILDUNG 7** wird die bisher gezeigte Netzintegration um diesen zusätzlichen Regelungsparameter erweitert dargestellt. Auf Basis der gemessenen Betriebsparameter wird eine Steuerspannung  $u_{EFM}$  an den EFM angelegt, um das Betriebsverhalten der Brennstoffzelle entsprechend zu steuern. Vorteile verspricht diese Neuentwicklung bei der Auslegung des DC/DC Wandlers und des Kurzzeitenergiespeichers. Zudem könnte die Dimensionierung des Brennstoffzellensystems bei gleichbleibender Dynamik kleiner ausfallen. Sich gegebenenfalls ergebene

Gewichts- und Kostenvorteile sind insbesondere bei mobilen Anwendungen entscheidend, da hier derartige Faktoren eine wichtige Rolle spielen.

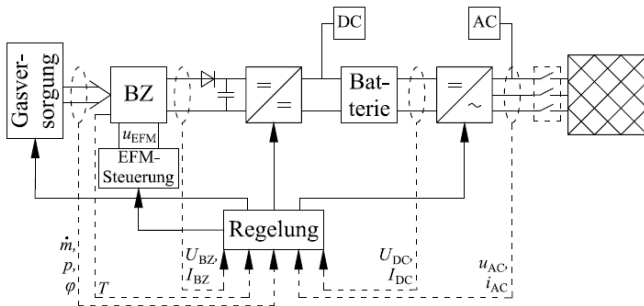


ABBILDUNG 6: NETZINTEGRATION EINER BRENNSTOFFZELLE AN DAS WECHSELSPANNUNGSNETZ NACH [24], ERWEITERT UM DIE NEUARTIGE STEUERUNG MITTELS ELECTRIC FIELD MODIFIER (EFM) [26].

### B. Netzanbindung an die Gasinfrastruktur

Durch die in der Bundesrepublik Deutschland flächendeckend ausgebaute Erdgasinfrastruktur bietet sich insbesondere Erdgas zur leitungsgebundenen Gasbereitstellung für Gas-to-Power-Anlagen an. Die meisten Brennstoffzellentechnologien benötigen allerdings Wasserstoff als Brenngas [28]. Daher muss neben dem technischen Gasanschluss auch eine geeignete Gas-aufbereitung installiert werden.

#### 1) Technischer Gasanschluss

In der Hausenergieversorgung werden Brennstoffzellenheizgeräte an den herkömmlichen Gashausanschluss angeschlossen. In Hausinnenleitungen herrscht i. d. R. ein Überdruck von höchstens 30 mbar [29]. Volumenströme für Brennstoffzellengeräte in der Hausenergieversorgung betragen bei Vollast ca. 3-4 m<sup>3</sup>/h [11]. Eine Möglichkeit zur Ausgestaltung des Gashausanschlusses mit den Teilkomponenten Absperrvorrichtungen, Gasdruckregelgerät, Strömungswächter und Gaszähler ist in ABBILDUNG 7 ersichtlich.

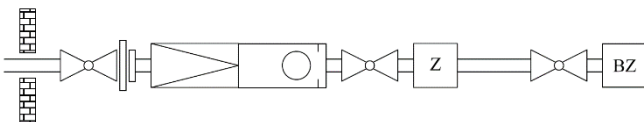


ABBILDUNG 7: MÖGLICHER HAUSGASANSCHLUSS ZUR GASVERSORGUNG VON BRENNSTOFFZELLENHEIZUNGEN, EIGENE DARSTELLUNG NACH [29].

#### 2) Gasaufbereitung

Im Zuge der Brennstoffzellennutzung, insbesondere die PEM-Technologie betreffend, muss das eingesetzte Erdgas, dessen Hauptbestandteil Methan darstellt, entsprechend aufbereitet werden, um die Zelle nicht zu schädigen und ihre Funktionstüchtigkeit langfristig zu gewährleisten. Zu den Schritten der Gasaufbereitung gehören Entschwefelung und Reformierung.

##### Entschwefelung

Da sich Schwefel u. a. auf die Elektrokatalysatoren in Brennstoffzellenheizgeräten schädlich auswirkt, bedarf es zunächst einer Entschwefelung. Zum einen beinhaltet Erdgas natürlich vorkommende Schwefelverbindungen wie Carbonylsulfide, Mercaptane und Schwefelwasserstoff, deren Anteile mit der Herkunft des Erdgases variieren [5], zum anderen wird in der Gasversorgung das eigentlich geruchslose Erdgas mit schwefelhaltigen Odorantien versetzt [5].

Zur Entschwefelung haben sich in der Hausenergieversorgung zwei Verfahren durchgesetzt: Zum einen wird die „Kalte Adsorption“ der Schwefelbegleiter ausgenutzt. Dabei werden in einem Erdgasstrom über dem Adsorptionsmittel die Schwefelkomponenten abgetrennt. Vorteilhaft ist hierbei die einfache und flexible Installation, nachteilig wirkt sich der hohe Wartungsaufwand aus, der durch die geringe Standzeit von ein bis zwei Jahren bedingt ist [5]. Die Verbesserung der Haltbarkeit sowie die Reduktion der Produktionskosten ist Bestandteil aktueller Forschung [5]. Durch das zweite Verfahren, die „Hydrierende Entschwefelung“, wird dem Erdgas eine geringe Menge an Wasserstoff beigefügt, welcher daraufhin mit den schwefelhaltigen Komponenten in einer katalytischen Reaktion zu Schwefelwasserstoff reagiert. Dieser Schwefelwasserstoff wird dann wiederum in einem Adsorber abgetrennt. Hierbei steht dem Vorteil höherer Standzeiten der technische Installationsaufwand in der Gerätebereitstellung entgegen [5].

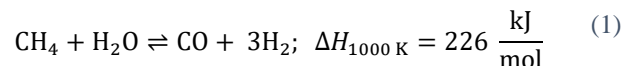
Zur Verringerung des Entschwefelungsaufwands für Erdgas finden mittlerweile auch stickstoffbasierte Odoriermittel Anwendung [5].

##### Reformierung

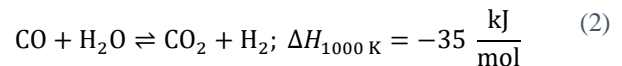
Die eigentliche Umwandlung von Kohlenwasserstoffen zu Wasserstoff wird als „Reformierung“ bezeichnet [30]. Als Nebenprodukte fallen dabei Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) an. Im Falle des Einsatzes von Luft als Oxidationsmittel ist das Produktgas ebenfalls stickstoffhaltig [30]. Insgesamt lassen sich drei verschiedene Reformierungsprozesse benennen:

- Dampfreformierung:

Die Dampfreformierung erfolgt an Nickelkatalysatoren bei 700-900 °C mit Wasserdampf als Oxidationsmittel [28]. Für den Hauptbestandteil Methan (CH<sub>4</sub>) im Erdgas lautet die Reformierungsreaktion mit Wasserdampf



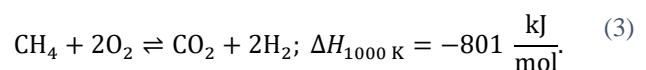
Bei der Reformierung handelt es sich um eine stark endotherme Reaktion [28]. Darüber hinaus tritt die „Konvertierung“ oder „Shift-Reaktion“ auf. Dabei reagiert das bei der Reformierung entstandene Kohlenmonoxid mit überschüssigem Wasserdampf zu Kohlendioxid, wodurch das für den Platinkatalysator giftig wirkende Kohlenmonoxid weiter umgesetzt wird [5]. Außerdem wird so die Ausbeute an Wasserstoff noch erhöht. Die Shift-Reaktion lautet



und ist mit negativer Reaktionsenthalpie leicht exotherm [28].

- Partielle Oxidation

Bei der partiellen Oxidation wird Luft bzw. Sauerstoff als Oxidationsmittel für das Erdgas verwendet. Die Reaktionsgleichung lautet:



Dabei handelt es sich um eine stark exotherme Reaktion [28].

- Autotherme Reformierung

Bei der „autothermen Reformierung“ werden dem autothermen Reformator die Stoffe Erdgas, Luft und

Wasserdampf zugeführt. Dabei können durch geschickte Dosierung der Komponenten die Prozesse so eingestellt werden, dass keine externe Wärmezufuhr notwendig ist [28], [30].

Bei zu hohem CO-Gehalt des Produktgases aus der Reformierung bedarf es, je nach Brennstoffzellentechnologie, eines zusätzlichen „Shift-Reaktors“ [28], [30] und der selektiven Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid [28]. Sehr reiner Wasserstoff wird auch durch Einsatz von Membranen, die nur für Wasserstoff durchlässig sind, gewonnen. Nachteil dieser Membranen sind allerdings hohe Druckverluste [28].

#### IV. NETZINTEGRATION VON ELEKTROLYSESYSTEMEN

Im Gegensatz zu Brennstoffzellen, die als Energiequelle elektrischen Strom „liefern“, benötigen Elektrolyseure diesen, um Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Im Folgenden wird der Anschluss von Elektrolyseuren an das elektrische Netz und die Gasinfrastruktur erläutert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Wasser-Elektrolyseur als Teil eines zukünftigen, auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystems wirkt. In dieser Funktion wird entweder überschüssiger Strom umgewandelt und so chemisch gespeichert oder der Elektrolyseur dient als Regelkraftwerk und gleicht die Schwankungen im elektrischen Netz durch Anpassung der Leistungsaufnahme aus. Geeignete Standorte für netzgebundene Power-to-Gas-Anlagen müssen neben den Randbedingungen der elektrischen Netze auch denen der Gasinfrastruktur gerecht werden [2]. Dabei ist zur Minimierung elektrischer Transmissionsverluste einerseits die lokale Nähe zu erneuerbaren Erzeugern und zur Maximierung der gassetigen Speicherfähigkeit andererseits die örtliche Nähe zu netzgebundenen Gasspeichern sinnvoll [2]. Zudem ist im Hinblick auf die nationale Wasserstoffstrategie und den Netzentwicklungsplan Gas [31] die Errichtung und der Betrieb einer nationalen Wasserstoffinfrastruktur denkbar.

##### A. Elektrische Netzanbindung

Für die Spaltung von Wasser wird im Elektrolyseprozess Gleichstrom benötigt. Im Kontext des gesamten Energiesystems kann der Elektrolyseur als große Anlage am allgemeinen Drehstromnetz angeschlossen sein. In **ABBILDUNG 8** ist die prinzipielle Netzanbindung dargestellt. Nach der Transformation der Spannung auf das benötigte Niveau wird eine Gleichrichtung des Wechselstroms zu Gleichstrom durchgeführt. Die Spaltung des Wassers folgt dem Faraday'schen Gesetz nach (4). Die entstehende Masse an Wasserstoff  $m_{H_2}$  hängt von der Stromstärke  $I$  und der Zeit  $t$  ab:

$$m_{H_2} = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F}. \quad (4)$$

Dabei stellen die molare Masse  $M$ , die Faraday-Konstante  $F$  und die Anzahl an Elektronen  $z$ , die an der Reaktion beteiligt sind, Konstanten dar. Der entstehende Wasserstoff kann direkt gespeichert, in das Erdgasnetz eingespeist oder vor der Einspeisung noch in Methan umgewandelt werden.

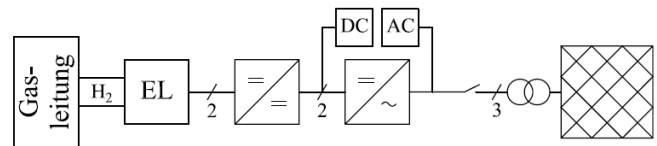


ABBILDUNG 8: NETZINTEGRATION EINES ELEKTROLYSEURS AN DAS WECHSELSPANNUNGSNETZ.

##### B. Netzanbindung an die Gasinfrastruktur

Die Einspeisung regenerativ erzeugter Gase in die Gasinfrastruktur erlaubt die weitere Einbeziehung erneuerbarer Energien, wodurch zusätzliche Nutzungspfade erschlossen werden [4]. Durch die Substitution von fossilem Erdgas durch erneuerbare Gase sollen auch in den Verbrauchersektoren Haushalt, Gewerbe, Industrie und Verkehr die CO<sub>2</sub>-Emissionen langfristig und wirksam gesenkt werden [4]. Somit erhalten Einspeiseanlagen für erneuerbares Gas unter Voraussetzung der technischen Möglichkeiten und Einhaltung der Rahmenbedingungen privilegierten Zugang zur Netzinfrastruktur [4]. Diese Rahmenbedingungen sind entsprechend der DVGW Arbeitsblätter 260 [32] für die Gasbeschaffenheit und 262 [33] für die Biogaseinspeisung weitestgehend auf Power-to-Gas-Anlagen übertragbar [4].

###### 1) Technischer Netzanschluss an Erdgasinfrastruktur

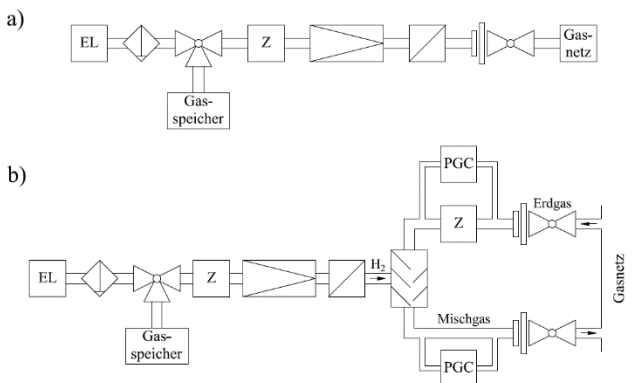
Zur Gaseinspeisetchnik [34] gehören im Allgemeinen die folgenden Komponenten:

- Anschlussleitung zum Transport des einzuspeisenden Gases in die Gasnetzinfrastruktur,
- Gasverdichtung, die z. B. durch Hubkolbenverdichter i. d. R. in redundanter Ausführung realisiert wird,
- Gasspeicherung zum Ausgleich der Erzeugungsschwankungen oder Pufferung von durch die Verdichtung hervorgerufenen Pulsationen,
- Gasdruckregel- und Messanlagen (GDRM) zur Haltung des Ausgangsdrucks und Bestimmung der Durchflussleistung, bestehend aus den Teilkomponenten Isolierstelle, Filter, Abscheider, einem Gaswärmehaube, zwei Sicherheitsabsperrentilen, Druckregelung, Schalldämpfung und Mengenummessung,
- Gasbeschaffenheitsmessanlagen wie Prozessgaschromatographen (PGC) zur Bestimmung der Hauptbestandteile und des Brennwertes, Kalorimeter, Dichtemessgerät, Einzelmessgeräte für verschiedene Gaskomponenten, Taupunktspiegel und Hygroskope zur Bestimmung des Taupunktes,
- Odoriereinrichtung, durch die das einzuspeisende Gas mit deutlich riechbaren Stoffen versetzt wird, welche i. d. R. nur bei Einspeisung in die Verteilnetze realisiert wird und bei Einspeisung in Transportleitungen entfallen kann,
- Konditionierung und Gasmischanlagen, die ggf. zur statischen Mischung des einzuspeisenden Gases mit Erdgas dienen.

Die Auslegung der einzelnen Komponenten erfolgt unter Beachtung der Randbedingungen für Leistungsvermögen und Druckstufen der Power-to-Gas Anlage, sowie der Betriebsparameter der Gasleitung und der geforderten Gasbeschaffenheit [35].

## 2) Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz

Da Wasserstoff sich chemisch und physikalisch wesentlich vom herkömmlichen Erdgas unterscheidet, ist die Einspeisung von reinem Wasserstoff in die Erdgasinfrastruktur nicht netzdienlich [4]. Daher muss eine ausreichende Durchmischung der Gase gewährleistet werden [4], sodass die Funktionstüchtigkeit und Sicherheit der für den Betrieb mit Erdgas ausgelegten Geräte der Gasnetzbetreiber und Endverbraucher nicht durch die Beimischung von Wasserstoff beeinträchtigt wird. Hierbei sind geeignete Standorte mit hohen Durchflussraten an Erdgas zu präferieren [4]. Langfristig sollen die Netzkomponenten allerdings hin zu einer besseren Beständigkeit gegenüber höheren Wasserstoffanteilen im Erdgas entwickelt werden [3]. Der Netzbetreiber muss auch bei fluktuierender Einspeisung jeweils die Aufnahmekapazität gewährleisten, sofern technisch und wirtschaftlich vertretbar [4]. Das entsprechende Regelwerk für Anlagen zur Wasserstoffeinspeisung ist im Merkblatt DVGW 265-3 (M) enthalten [35], [36]. Mögliche technische Ausführungen mit den Komponenten Entfeuchter, Gasspeicher, Gaszähler, Gasdruckregelgerät, Rückschlagarmatur und Absperrinrichtung sind in ABILDUNG 9 dargestellt.



ABILDUNG 9: MÖGLICHER GASNETZANSCHLUSS ZUR EINSPEISUNG VON WASSERSTOFF AUS POWER-TO-GAS-ANLAGEN IN DAS ERDGASNETZ. A) DIREKTEINSPEISUNG, B) EINSPEISUNG MIT STATISCHEM MISCHER UND PGC, EIGENE DARSTELLUNG NACH [35].

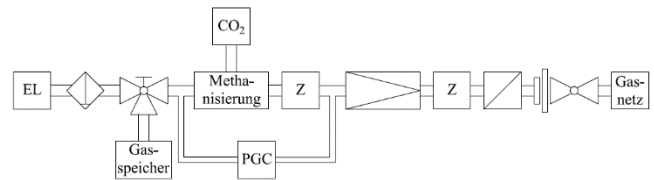
Zur zuverlässigen Einspeisung muss durch eine entsprechende Gasdruckregelvorrichtung in der Gasanschlussleitung das jeweils einzuspeisende Gas auf einen Wert leicht erhöht gegenüber dem Leitungsdruck eingestellt werden. Bei entsprechend hohen Betriebsdrücken einer Power-to-Gas-Anlage kann auf die zusätzliche Verdichtung verzichtet werden [35], wie z. B. in der PEM-Elektrolyse in Ibbenbüren, welche Wasserstoff bei rund 13 bar ohne weitere Verdichtung direkt in die Erdgashochdruckleitung einspeist [37].

Die Materialien und Auslegung für Anschlussleitung und Komponenten der GDRM müssen entsprechend für Wasserstoff ausgelegt werden. Ein zusätzlicher Speicher kann zur Pufferung von ungleichmäßiger Fahrweise dienen [35]. Da der Wasserstoff i. A. als sehr rein angesehen wird, bedarf es keiner zusätzlichen Messanlage zur Bestimmung der Gasbeschaffenheit oder des Brennwertes [35]. Der Wasserstoff kann bei vorliegender turbulenter Strömung direkt in die Gasleitung eingedüst werden, wobei sich erst nach 100 x Normdurchmesser (DN) eine ausreichende Durchmischung einstellt. Mithilfe eines statischen Mixers, durch den der einzuspeisende Wasserstoff mit Erdgas vor der Injektion vermischt wird, kann die Mischstrecke auf

0,5-2 x DN verkürzt werden. Der Einspeisepunkt ohne statischen Mischer kann Konzentrationen von bis zu 100 % Wasserstoff aufweisen, wodurch entsprechende Maßnahmen für die Materialien und technischen Ausführungen an der Einspeisestelle getroffen werden müssen [35].

## 3) Einspeisung von synthetischem Methan

Zur Einspeiseberechtigung von synthetischem Methan in die Gasinfrastruktur bedarf es der Einhaltung von Bedingungen hinsichtlich der geforderten Gasqualität. Das einzuspeisende Gas muss zuvor entsprechend aufbereitet werden. Der Brennwert und der Wobbe-Index, der zur Bewertung der Austauschbarkeit von Gasen dient, muss entsprechend an die zulässigen Werte nach DVGW 260 angepasst werden [32]. Gasbegleitstoffe sind zu minimieren, da keine Komponenten enthalten sein dürfen, die Gasspeicherung oder -transport beeinträchtigen. Dabei bestehen Grenzwerte für Gesamtschwefelgehalt, Schwefelwasserstoffe, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasser [38]. Auch hier muss der geeignete Druck zum Anschluss an die Gasleitung erreicht werden. Im Falle der Einspeisung innerhalb des Gasverteilnetzes muss das synthetische Methan mit äquivalenten Odorantien versehen werden. Einzuhalten sind auch die bei Netzanschluss zwischen Betreiber der Power-to-Gas-Anlage und Netzbetreiber vereinbarten Grenzen der minimalen bzw. maximalen Einspeisemenge und der Grenztemperaturen. Das Netz muss dabei stets kapazitiv und hydraulisch zur Aufnahme des einzuspeisenden Gases in der Lage sein [38]. Sicherheitseinrichtungen zur möglichen Absperrung der Einspeisung sind vorzusehen. Ein prinzipieller Aufbau einer Anschlussleitung zur Einspeisung von synthetischem Methan in erdgasführende Leitungen mit Gastrocknung, -speicher, Methanisierungsstufe, PGC, Gaszählern, Gasdruckregelgerät, Rückschlagarmatur und Absperrventil ist in ABILDUNG 10 visualisiert.



ABILDUNG 10: MÖGLICHER GASNETZANSCHLUSS ZUR EINSPEISUNG VON SYNTHETISCHEM METHAN AUS EINER POWER-TO-GAS-ANLAGE, EIGENE DARSTELLUNG NACH [39].

## 4) Anschluss an reine Wasserstoffnetze

In Bezug auf den Aufbau einer nationalen Wasserstoffinfrastruktur in einem zukünftigen Energiesystem vereinfacht sich die Einspeisung des von Power-to-Gas-Anlagen erzeugten Wasserstoffs stark. Dabei kann sowohl auf die Durchmischung der Gase als auch auf den Schritt der Methanisierung verzichtet werden, wodurch sich wiederum eine Effizienzerhöhung des Vorgangs einstellt. Hinsichtlich der Einspeisemenge müssen die hydraulischen sowie kapazitiven Fähigkeiten des Wasserstoffnetzes berücksichtigt werden.

## LITERATUR

- [1] T. Hamacher, „Wasserstoff als strategischer Sekundärenergieträger,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*, 2. Auflage, J. Töpfer und J. Lehmann, Hrsg., Berlin, Springer-Vieweg, 2017.
- [2] T. Bründlinger, J. E. König, O. Frank, D. Gründig, C. Jugel, P. Kraft, O. Krieger, S. Mischinger, P. Prein, H. Seidl, S. Siegemund, C. Stolte, M. Teichmann, J. Willke und M. Wolke, „dena-Leitstudie Integrierte

- Energiewende, Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050,“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2018.
- [3] Deutscher Bundestag, „Grenzwerte für Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in der Erdgasinfrastruktur (Sachstand WD 8 - 3000 - 066/19),“ Berlin, 2019.
- [4] Bundesnetzagentur, [Online]. Available: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/NetzzugangUndMesswesen/Gas/Einspeisung\\_Wasserstoff\\_u\\_synth\\_Methan/PosPapier2014.pdf;jsessionid=C7B3A97A8420F628D972EEF8ECE40A8C?\\_\\_blob=publicationFile&v](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzzugangUndMesswesen/Gas/Einspeisung_Wasserstoff_u_synth_Methan/PosPapier2014.pdf;jsessionid=C7B3A97A8420F628D972EEF8ECE40A8C?__blob=publicationFile&v). [Zugriff am 22. Oktober 2020].
- [5] T. Badenhop und M. Schellen, „Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*, J. Lehmann, Hrsg., Berlin, Springer Vieweg, 2017.
- [6] H. Paul und C. Leu, „Ersatzstromversorgung,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*, J. Lehmann, Hrsg., Berlin, Springer Vieweg, 2017.
- [7] [Online]. Available: <https://www.process.vogel.de/europas-erstes-brennstoffzellenkraftwerk-der-megawatt-klasse-a-538051/>. [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [8] fuelcellenergy, [Online]. Available: [https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/05/Sure\\_Source\\_1500\\_DE\\_Web.pdf](https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/05/Sure_Source_1500_DE_Web.pdf). [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [9] Zukunft Altbau, *Stationäre Brennstoffzellen-Anwendung, Erdgas umweltfreundlicher nutzen*, 2018.
- [10] fuelcellenergy, [Online]. Available: [https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2013/11/Product-Spec-SureSource-4000\\_EU\\_DE.pdf](https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2013/11/Product-Spec-SureSource-4000_EU_DE.pdf). [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [11] Viessmann Ges.m.b.H; Viessmann Werke GmbH & Co. KG, *VITOTALOR PT2 Datenblatt*, Steinhaus bei Wels, Allendorf, 2020.
- [12] [Online]. Available: <https://www.smart-production.de/etz/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/erstes-mw-brennstoffzellenkraftwerk-im-industriebereich-2015946/>. [Zugriff am 21. Oktober 2020].
- [13] [Online]. Available: [https://forschungenergiespeicher.info/aktuelles/quickinfo-einzelansicht/Brennstoffzellen\\_Kraftwerke/](https://forschungenergiespeicher.info/aktuelles/quickinfo-einzelansicht/Brennstoffzellen_Kraftwerke/). [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [14] [Online]. Available: [https://www.dresden.de/media/pdf/wirtschaft/ex\\_poreal/ExpoReal2015\\_Energiespeichertechnologie\\_FuelCell\\_BAM.pdf](https://www.dresden.de/media/pdf/wirtschaft/ex_poreal/ExpoReal2015_Energiespeichertechnologie_FuelCell_BAM.pdf). [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [15] [Online]. Available: <https://www.hzwei.info/blog/2016/08/19/14-mw-bz-kraftwerk-fuer-mannheim/>. [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [16] Solutions, FuelCell Energy, [Online]. Available: [https://www.energy-saxony.net/fileadmin/Inhalte/Downloads/Pressemitteilungen/Pressefaecher/FCES/alt/PM\\_FCES\\_E-world\\_2016.pdf](https://www.energy-saxony.net/fileadmin/Inhalte/Downloads/Pressemitteilungen/Pressefaecher/FCES/alt/PM_FCES_E-world_2016.pdf). [Zugriff am 23. Oktober 2020].
- [17] [Online]. Available: <https://www.erneuerbareenergien.de/archiv/brennstoffzellenkraftwerk-mit-14-megawatt-geht-in-betrieb-150-406-98057.html>. [Zugriff am 23. Oktober 2020].
- [18] fuelcellenergy, [Online]. Available: [https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/05/SureSource-Recovery\\_de.pdf](https://www.fuelcellenergy.com/wp-content/uploads/2017/05/SureSource-Recovery_de.pdf). [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [19] [Online]. Available: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/energie-hamburg-will-weltgroesste-wasserstoff-elektrolyse-im-hafen-bauen/24982532.html?ticket=ST-3243935-F6yooex9Maa03EwmY1yV-ap3>. [Zugriff am 22. Oktober 2020].
- [20] BMVI [Online]. Available: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Dossier/Elektromobilitaet/topt\\_hema04-innovationsprogramm-wasserstoff-brennzellentechnologie.html](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Dossier/Elektromobilitaet/topt_hema04-innovationsprogramm-wasserstoff-brennzellentechnologie.html). [Zugriff am 20. Oktober 2020].
- [21] [Online]. Available: <https://h2.live/>. [Zugriff am 19. Oktober 2020].
- [22] A. Lücken, *Integration von Brennstoffzellen in Flugzeugbordnetze*, Hamburg: VDE Verlag, 2014.
- [23] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [24] F. Barbir, *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, Amsterdam/Boston: Elsevier/Academic Press, 2013.
- [25] EG&G Technical Services, Inc., *Fuel Cell Handbook*, 2004.
- [26] M. Schumann, F. Grumm, J. Friedrich und D. Schulz, „Electric Field Modifier Design and Implementation for Transient PEM Fuel Cell Control,“ *WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS*, pp. 55-62, 2019.
- [27] M. Schumann, F. Grumm, J. Friedrich und D. Schulz, „Transient PEM Fuel Cell Control by an Electric Field Modifier,“ in *2nd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS 2018)*, Bern, 2018.
- [28] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., „Stationäre Brennstoffzellen, Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten, Stand der Technik, Perspektiven,“ *Rationeller Erdgaseinsatz*, Kaiserslautern, 2005.
- [29] G. Cerbe und B. Lendt, *Grundlagen der Gastechnik, Gasbeschaffung - Gasverteilung - Gasverwendung*, München: Hanser, 2017.
- [30] T. Aicher, L. Blum und M. Specht, „Wasserstoffgewinnung aus Erdgas - Anlagenentwicklung und Systemtechnik,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzellen - Energieforschung im Verbund*, Berlin, 25.-26.11.2004.
- [31] FNB Gas, die Fernleitungsnetzbetreiber, „Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030, Konsultation,“ 2020.
- [32] DVGW, *Technische Regel- Arbeitsblatt DVGW G 260 (A), Gasbeschaffenheit*, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2013.
- [33] DVGW, *Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW G 262 (A), Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung*, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2011.
- [34] P. Adler, E. Billig, A. Brosowski, J. Daniel-Gromke, I. Falke, E. Fischer, J. Grope, U. Holzhammer, J. Postel, J. Schnutenhaus, K. Stecher, G. Szomszed, M. Trommler und W. Urban, „Leitfäden Biogasaufbereitung und -einspeisung,“ *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)*, 2014.
- [35] F. Graf, M. Götz, M. Henel, T. Schaaf und R. Tichler, „DVGW Abschlussbericht, Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten,“ *DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.*, Bonn, November 2014.
- [36] DVGW, *Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW G 265-3 (M) Anlagen für die Einspeisung von Wasserstoff in Gasversorgungsnetze; Planung, Fertigung, Errichtung, Prüfung, Inbetriebnahme und Betrieb*, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2014.
- [37] [Online]. Available: <https://www.designetz.de/blaupause-und-bausteine/sektorkopplung/ptg-ibbenbueren/>. [Zugriff am 14. Oktober 2020].
- [38] [Online]. Available: [https://we-are-energy.de/gmb/wp-content/uploads/Mindestanforderungen\\_Biogas.pdf](https://we-are-energy.de/gmb/wp-content/uploads/Mindestanforderungen_Biogas.pdf). [Zugriff am 21. Oktober 2020].
- [39] EAM Netz, „Anlage 1: Einspeisekapazität / Beschreibung des Netzanschlusses und technische Anschlussbedingungen,“ [Online]. Available: [https://www.eam-netz.de/fileadmin/user\\_upload/Fuer\\_Einspeiser/PDFs/Einspeisung\\_von\\_Biogas/Technische\\_Mindestanforderungen\\_zur\\_Einspeisung\\_von\\_Biogas.pdf](https://www.eam-netz.de/fileadmin/user_upload/Fuer_Einspeiser/PDFs/Einspeisung_von_Biogas/Technische_Mindestanforderungen_zur_Einspeisung_von_Biogas.pdf). [Zugriff am 3. November 2020].