

Gas-to-Power: Technologien und Potentiale

Daniela Vorwerk^{*‡}, Marc Schumann[‡], Detlef Schulz

Elektrische Energiesysteme

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Hamburg, Deutschland

*daniela.vorwerk@hsu-hh.de

[‡]Diese Autoren haben in gleichem Maße an dem Beitrag mitgewirkt

Kurzfassung – Die Transformation „Gas-to-Power“ als Kopplung der Sektoren Strom und Gas bietet vielfältige Potentiale für die Energiewende. Bisher sind Gasturbinen und kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke mit konventionellem Erdgas aus der Gasinfrastruktur zur zentralen Spitzenlastversorgung oder zur kombinierten Kraft-Wärme-Kopplung zur Speisung von Fernwärmenetzen in Betrieb. Brennstoffzellentechnologien hingegen arbeiten mit Wasserstoff bzw. Erdgas und können durch Abwärmenutzung insbesondere dezentral zur Kraft- und Wärme-gekoppelten Bedarfsdeckung dienen. Eine verstärkte Beimischung von Wasserstoff in die Gasinfrastruktur oder eine grundsätzliche Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff ermöglicht die Nutzung regenerativ erzeugten Wasserstoffs ohne weitere Wirkungsgradverluste durch die Umwandlung zu Methan. Hierfür müssen die bekannten Technologien noch gerüstet werden, z. B. durch den Einsatz neuer Materialien, um den sich daraus ergebenden technischen Anforderungen gerecht zu werden. Im Rahmen dieses Beitrags werden zunächst die Technologien Brennstoffzelle, Gasturbinen-, Gas- und Dampfturbinenkraftwerk und Gasmotorenkraftwerke vorgestellt und anschließend deren Potentiale im Kontext der Energiewende und Dekarbonisierung der Energieversorgung aufgeführt.

Stichworte – Brennstoffzelle, Gaskraftwerk, Sektorkopplung, Erdgas, Wasserstoff, Energiewende

NOMENKLATUR

AFC	Alkalische Brennstoffzelle (engl.: Alkaline Fuel Cell)
AHDE	Abhitze-Dampferzeuger
BZ	Brennstoffzelle
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle (engl.: Direct Methanol Fuel Cell)
DT	Dampfturbine
GT	Gasturbine
GuD	Gas- und Dampfturbine
HKW	Heizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (engl.: Molten Carbonate Fuel Cell)
O.T.	Oberer Totpunkt
PAFC	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (engl.: Phosphoric Acid Fuel Cell)

PEM-FC	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (engl.: Proton Exchange Membrane)
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle (engl.: Solid Oxide Fuel Cell)
U.T.	Unterer Totpunkt

I. EINLEITUNG

„Gas-to-Power“ beschreibt die Umwandlung von Gas als stoffgebundenen Energieträger zu elektrischer Energie. Die Verbrennung von Gas erzeugt Wärme, welche wiederum in Wärmekraftwerken seit Anfang des 20. Jahrhunderts in elektrische Energie umgewandelt und in die öffentliche Stromversorgung eingespeist wird [1]. Seitdem konnten durch Kombination mit Dampfturbinen in sog. Gas- und Dampfkraftwerken (GuD-Kraftwerken) und durch zahlreiche technische Maßnahmen wie Zwischenüberhitzung oder Wärmerückgewinnung Effizienzsteigerungen erzielt und durch Nachbehandlung der Rauchgase Schadstoffemissionen verringert werden [1]. Dennoch bedingt die chemische Beschaffenheit von Erdgas beim Verbrennungsprozess die Emission des Treibhausgases CO₂. Diese gilt es im Rahmen des Pariser Abkommens und der Klimaschutzziele zur Senkung des Anstiegs der Globaltemperatur und somit zur Begrenzung der Erderwärmung zu minimieren [2]. Der Einsatz von Wasserstoff stellt dabei eine emissionsfreie Alternative zum Erdgas dar. Dieser kommt insbesondere in der Brennstoffzelle (BZ), einer seit der ersten Hälfte des 19. Jh. bekannten Technologie zum Einsatz. Dabei wird die Redoxreaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zur Erzeugung von Strom und Wärme nutzbar gemacht. Im Zuge der künftigen Energieversorgung mit vermehrt erneuerbaren Energiequellen, welche langfristig den Einsatz fossiler Ressourcen ersetzen sollen, bietet regenerativ erzeugter Wasserstoff als sog. „Grünes Gas“ hohe Potentiale [3]. Durch „Power-to-Gas“-Prozesse kann überschüssig erzeugte regenerative Energie in Wasserstoff umgewandelt werden, welcher im Gegensatz zur elektrischen Leistung stoffgebunden und daher langfristig speicherbar ist. Der in diesem Beitrag fokussierte Begriff „Gas-to-Power“ definiert den umgekehrten Prozess: Die „Verstromung“ von Gas. Dazu werden zunächst zwei etablierte Technologien, Brennstoffzellen und Gaskraftwerke, thematisiert und deren Funktionsweise sowie derzeitige Anwendungsbereiche beleuchtet. Anschließend werden aktuelle Forschungsfelder, sowie bestehende Potentiale der Technologien und deren Rolle im Zuge der Energiewende und Minderung der

Treibhausgasemissionen in der Energieversorgung aufgezeigt.

II. BRENNSTOFFZELLEN

Brennstoffzellen wandeln die chemische Energie eines Brennstoffs direkt in elektrische Energie um. Sie wirken dabei nach dem Prinzip der „kalten Verbrennung“, es wird keine Zwischenstufe über einen Prozesskreislauf benötigt, um z. B. eine Turbine anzutreiben. Brennstoffzellen bestehen aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode. An der Anode wird der Brennstoff, z.B. Wasserstoff (H_2) oder Methan (CH_4), zugeführt. Die Kathode wird mit Sauerstoff bzw. Luft versorgt. Die beiden stromleitenden Elektroden werden durch einen isolierenden Elektrolyten voneinander getrennt, durch den keine Elektronen, aber bestimmte Ionen passieren können. Auch die Reaktionsgase werden hierdurch voneinander getrennt [4].

Brennstoffzellen lassen sich z. B. über den verwendeten Elektrolyten klassifizieren. In TABELLE I werden Eigenschaften verschiedener Typen zusammengefasst.

TABELLE I: EIGENSCHAFTEN VON BRENNSTOFFZELLEN [5], [6].

Eigenschaft	AFC	PAFC	PEM-FC	DMFC	MCFC	SOFC
Temperaturbereich in °C	< 90	160 – 220	60 – 80	90 – 130	600 – 650	800 – 1000
Brenngas	H_2	H_2	H_2	CH_3OH	$H_2, CH_4,$ Kohlegas	$H_2, CH_4,$ Kohlegas
Elektrolyt	KOH	H_3PO_4	Polymermembran	Polymermembran	Alkali-karbonat-schmelze	Oxidkeramischer Elektrolyt
Ladungsträger	OH^-	H_3O^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
El. Wirkungsgrad in %	60 – 70	38	35 – 45	40	48	47

Darüber hinaus können BZ entsprechend ihres Temperaturbereichs untergliedert werden, in welchem sie typischerweise arbeiten. Zu den Niedertemperatur-BZ gehören die alkalische (AFC) und die Protonenaustauschmembran-BZ (PEM-FC). Dem mittleren Temperaturbereich werden die Direktmethanol- (DMFC) und die Phosphorsäure-BZ (PAFC) zugeordnet, aber auch die Hochtemperatur-Protonenaustauschmembran-BZ arbeitet in einem ähnlichen Temperaturbereich. Zu den Hochtemperatur-BZ gehören die Schmelzkarbonat- (MCFC) und die Festoxid-BZ (SOFC). BZ bieten die Möglichkeit eines modularen Aufbaus, wodurch Leistungsklassen von einigen Watt bis zu mehreren Megawatt umgesetzt werden können [1].

Im aktuellen Fokus von Politik und Forschung stehen insbesondere die Protonenaustauschmembran- und die Festoxid-BZ, da sie sehr vielversprechend im Hinblick auf verschiedene Einsatzszenarien sind [4], [7]. Im Folgenden wird daher im Speziellen auf diese beiden Typen eingegangen, deren Aufbau und Funktionsprinzip erläutert und der jeweilige Anwendungsbereich, mit Vor- und Nachteilen, aufgezeigt.

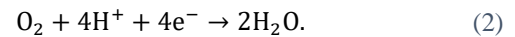
A. Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen

1) Aufbau und Funktionsprinzip

PEM-FC nutzen eine Polymermembran als Elektrolyten zur Gas- und Stromisolierung der beiden Kohlenstoffelektroden. Durch diese können nur Protonen (H^+) transportiert werden. ABBILDUNG 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer PEM-FC. Auf der Anodenseite wird Wasserstoff als Brenngas hinzugegeben. Dieses oxidiert an der Elektrode mithilfe eines Platinkatalysators gemäß



Die hierbei entstehenden Protonen werden über den Elektrolyten zur Kathode transportiert, wohingegen die Elektronen über einen externen Stromkreis mit elektrischen Verbrauchern zur Kathode gelangen. An der Kathode reagieren die Protonen und die Elektronen nach (2) mit Sauerstoff zu Wasser:



Insgesamt ergibt sich damit für die PEM-FC die folgende Reaktionsgleichung:



Das Produktwasser an der Kathode wird mit überschüssiger Luft aus der BZ abgeführt.

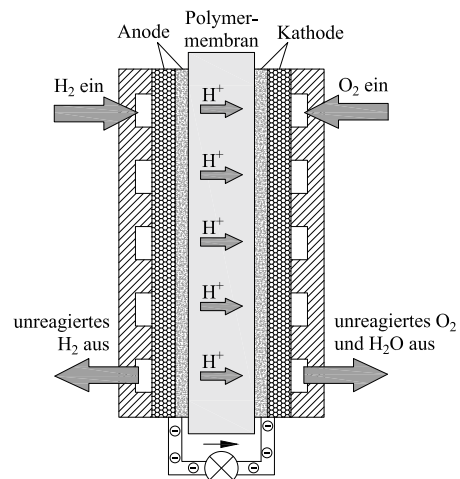


ABBILDUNG 1: AUFBAU EINER PROTONAUSTAUSCHMEMBRAN-BRENNSTOFFZELLE.

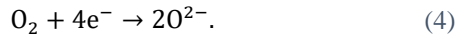
2) Anwendungsbereich

PEM-FC werden heute vielfältig eingesetzt. Im Transportsektor spielen sie die dominante Rolle, aber auch in stationären Heizsystemen finden sich PEM-FC wieder [4]. Vorteilhaft ist die Ausnutzung des gesamten Teillastbereichs insbesondere bei dynamischen Laständerungen, da sie dann einen noch höheren Wirkungsgrad aufweisen [1], [7]. Die geringen Arbeitstemperaturen ermöglichen zudem eine gute Kaltstartfähigkeit [1]. Andererseits ist die Reaktionskinetik aufgrund der geringen Temperaturen gehemmt, weshalb Platin als Katalysator eingesetzt wird. Da dieser bei Kontakt mit Kohlenmonoxid „vergiftet“ wird, kann bei PEM-FC kein Erdgas als Brenngas verwendet werden. Hierfür ist eine vorherige Reformierung des Erdgases zu Wasserstoff notwendig [1].

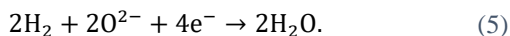
B. Festoxid-Brennstoffzellen

1) Aufbau und Funktionsprinzip

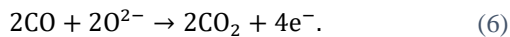
In SOFC trennt eine, häufig mit Yttriumoxid dotierte, Zirkonoxid-Keramik als Elektrolyt die beiden Elektroden voneinander [1]. Ab einer Temperatur von etwa 700 °C wird die Keramik leitend für Sauerstoff-Ionen (O²⁻). Der allgemeine Aufbau dieses Typs ist in ABBILDUNG 2 dargestellt. Zunächst wird der zugeführte Sauerstoff an der Kathode durch die Aufnahme von Elektronen nach der folgenden Gleichung reduziert:



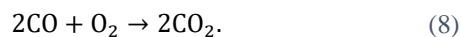
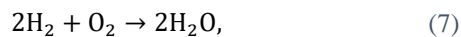
Die Sauerstoff-Ionen werden über den Elektrolyten zur Anode transportiert. Hier reagieren diese mit dem Wasserstoffhaltigen Brenngas:



Ebenfalls ist es möglich, anstelle von Wasserstoff Kohlenmonoxid für die Teilreaktion an der Anode zu verwenden:



Die dabei freiwerdenden Elektronen werden über den externen Stromkreis zur Kathode geleitet. Insgesamt ergeben sich folgende mögliche Gleichungen für die Festoxid-Brennstoffzelle:



Das entstehende Produkt Wasserdampf beziehungsweise Kohlendioxid wird auf der Anodenseite abgeführt.

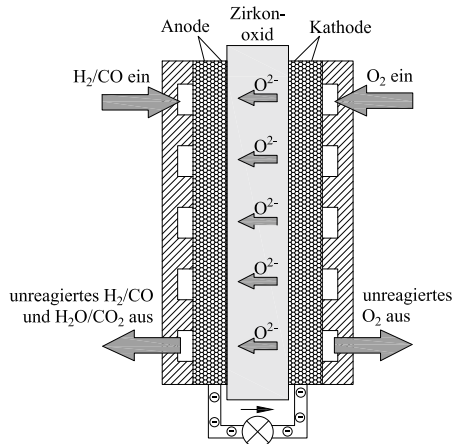


ABBILDUNG 2: AUFBAU EINER FESTOXID-BRENNSTOFFZELLE.

2) Anwendungsbereich

Aufgrund der hohen Arbeitstemperaturen werden SOFC, ähnlich wie konventionelle Kohlekraftwerke, hauptsächlich konstant im Grundlastbetrieb gefahren [1]. Dynamische Vorgänge und ein schnelles Herunterfahren und Neustarten dieses Typs sollte vermieden werden, um große Wärmespannungen im Material zu vermeiden [1], [4], die sich mildernd auf die Lebensdauer auswirken. Sie eignen sich hervorragend als Blockheizkraftwerk (BHKW), da neben der Erzeugung elektrischer Energie die hohen Temperaturen für Heizwärme- und Prozessdampferzeugung genutzt werden können. Durch diese kombinierte Nutzung im Sinne der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) steigt der Systemwirkungsgrad [1].

III. GASKRAFTWERKE

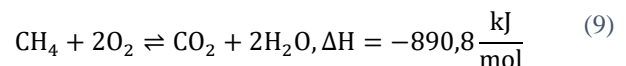
Die Erzeugung von elektrischer Energie aus Erdgas durch Verbrennung und Verstromung in Kraftwerken ist eine bereits lang bekannte und etablierte Technologie. Dabei durchläuft das jeweilige Prozessfluid einen Kreisprozess, in dem es verschiedenen Zustandsänderungen unterliegt [8].

A. Einsatz von Gaskraftwerken

Bei den Gaskraftwerken wird zwischen drei grundlegenden Technologien unterschieden: Reine Gasturbinenkraftwerke (GT), kombinierte Gas- und Dampfturbinen (GuD) Kraftwerke und Gasmotorenkraftwerke [1]. Während in GT- und GuD-Kraftwerken ein kontinuierlicher Kreisprozess stattfindet, funktionieren Gasmotorenkraftwerke getaktet. Gaskraftwerke zur reinen Stromerzeugung werden gemäß der Merit-Order und durch ihre flexible Dynamik vorwiegend als Spitzenlastkraftwerke eingesetzt [1]. Aufgrund innerhalb von Minuten abrufbarer Leistung dienen sie zur Bereitstellung von Regelleistung [9] und werden im Zuge verstärkter erneuerbarer Energiesysteme eine wichtige Rolle spielen, um bestehende Bedarfe schnell und flexibel decken zu können [9]. Neben der Stromerzeugung finden viele Gaskraftwerke Anwendung als Heizkraftwerke (HKW), die darüber hinaus auch Wärmenetze speisen [1]. Der Brennstoffnutzungsgrad modernster kombinierter Kraftwerke kann dabei mehr als 90 % betragen [10]. Stand 2018 waren in der Bundesrepublik Deutschland insgesamt etwa 24 GW an elektrischer Wirkleistung in Erdgaskraftwerken mit und ohne Wärmeauskopplung installiert [11].

B. Erdgas als fossiler Brennstoff

In herkömmlichen Gaskraftwerken dient fossiles Erdgas als Brennstoff, welches in der Brennkammer mit Luft bzw. Sauerstoff verbrannt wird. Das Erdgas wird dabei durch die Leitungsinfrastruktur geliefert. Die Zusammensetzung variiert dabei je nach Vorkommen, allgemein wird zwischen H- (High calorific gas) und L- (Low calorific gas) Gas unterschieden. H-Gas weist mit durchschnittlich 11,1 kWh/m³ einen höheren Brennwert als L-Gas (mittlerer Brennwert 8,8 kWh/m³) auf [2]. Da es sich im natürlichen Zustand um ein geruchsloses Gas handelt, wird es mit schwefelhaltigen Stoffen odorisiert, um ggf. auftretende Gasleckagen unmittelbar erkennbar zu machen [12]. Neben seinem Hauptbestandteil Methan (CH₄) beinhaltet Erdgas auch höhere Kohlenwasserstoffe wie Ethan, Propan, Butan und Ethen und Schwefelwasserstoffe sowie Kohlenstoffdioxid [12], [13]. Die Verbrennungsreaktion von Methan mit Sauerstoff lautet nach [1]:



Dabei entsteht als natürliches Produkt der Verbrennung das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid. Allerdings ist durch die chemische Beschaffenheit von Erdgas, welches anteilig weniger Kohlenstoff als Stein- oder Braunkohle enthält, die Schadstoffemission von Gaskraftwerken gegenüber Kohlekraftwerken reduziert [1].

C. Gasturbinenkraftwerke

1) Gasturbinen-Kreisprozess

In GT-Kraftwerken wird als Prozessfluid Luft bzw. Rauchgas eingesetzt. Dabei wird der gasförmige Zustand des Prozessfluids durchgehend beibehalten. Der Gasturbinenprozess ist nachstehend in ABBILDUNG 3 dargestellt.

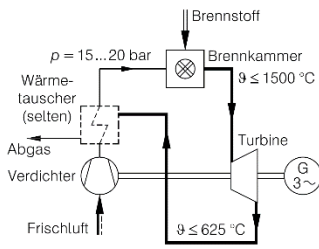


ABBILDUNG 3: SCHALTBILD DES GASTURBINEN-PROZESSES [8].

In einem ersten Schritt wird Umgebungsluft auf atmosphärischem Druckniveau angesaugt und durch einen Verdichter adiabat auf eine höhere Druckstufe komprimiert. Anschließend wird diese verdichtete Luft zur Verbrennung mit Erdgas in eine Brennkammer geleitet. Das Produkt ist das sog. Rauchgas, welches durch die Verbrennung eine hohe Temperatur und Enthalpie besitzt. Der Abbau an Druckenergie des Fluids durch die Turbine wird in kinetische Energie des Rotors umgewandelt. Die Turbine ist i. d. R. mit dem Verdichter auf einer Welle angeordnet, um den Antrieb der Verdichtung zu gewährleisten. Darüber hinaus wird durch die Rotation der Turbine auch ein Generator zur Stromerzeugung angetrieben. Nach der Entspannung des Rauchgases in der Turbine wird dieses oftmals als Abgas auf noch hohem Temperaturniveau in die Atmosphäre abgelassen. Die Abgasverluste können durch Luftvorwärmung in einem Wärmeübertrager verringert werden [1].

Der ideale Vergleichsprozess für den Gasturbinenprozess ist der Joule-Prozess [14], dargestellt in ABBILDUNG 4, mit isentroper Verdichtung (0-1'), isobarer Wärmezufuhr (1-2) und isentroper Entspannung (2-3'). Real treten allerdings in Verdichter und Turbine irreversible Verluste auf, wodurch es sich bei Verdichtung und Entspannung nicht um isentrope, sondern polytrope Zustandsänderungen handelt (0-1 und 2-3) [1]. In der Brennkammer kommt es außerdem zu Druckverlusten, was Abweichungen von der idealen isobaren Zustandsänderung zur Folge hat.

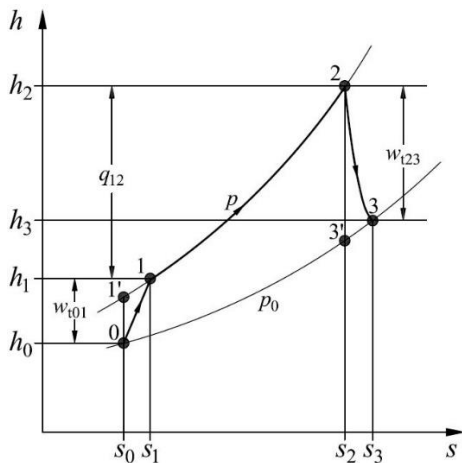


ABBILDUNG 4: JOULE-PROZESS IM H-S-DIAGRAMM, EIGENE DARSTELLUNG NACH [14].

2) Effizienz des Gasturbinenprozesses

Allgemein ist die Effizienz η_{ges} eines Kraftwerksprozesses definiert als nutzbare elektrische Leistung $P_{el,netto}$ bezogen auf die eingesetzte Brennstoffenergie, welche sich aus dem Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{BS} und dem Heizwert $H_{i,BS}$ ergibt:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el,netto}}{\dot{m}_{BS} \cdot H_{i,BS}} \quad (10)$$

Der thermische Wirkungsgrad eines reversiblen und verlustfreien Joule-Prozesses $\eta_{th,Joule}$ ergibt sich zu

$$\eta_{th,Joule} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (11)$$

und ist daher nur vom Druckverhältnis p_1/p_2 [13] und dem Isentropenexponenten κ des Rauchgases abhängig. In Kraftwerken treten weitere Verluste durch endliche Güte der technischen Komponenten wie Turbine, Getriebe und Generator auf. Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich schließlich als Produkt der Komponentenwirkungsgrade von z. B. Turbine, Getriebe und Generator sowie des Kreisprozesses [13].

D. Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke

1) Kombiniertes Gas- und Dampfturbinen-Kreisprozess

Beim Gas- und Dampfturbinenprozess handelt es sich um die zwei kombinierten Kreisprozesse Gasturbinen- und Wasser/Dampf-Prozess. Ein Schaltbild des kombinierten GuD-Prozesses ist in ABBILDUNG 5 ersichtlich.

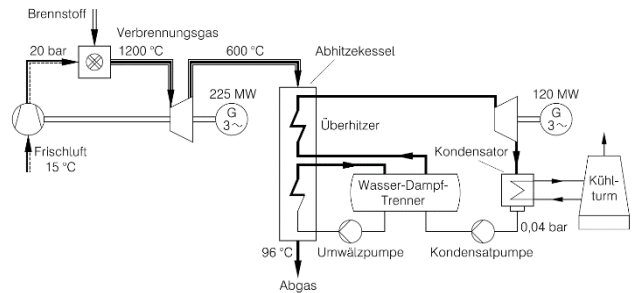


ABBILDUNG 5: SCHALTBILD DES GAS- UND DAMPFTURBINEN-KREISPROZESSES [8].

Der GT-Prozess erfolgt dabei analog zur Erläuterung in Absatz IV.C. Allerdings wird das Abgas nach der Entspannung in der Turbine nicht direkt an die Umgebung abgegeben oder zur Luftvorwärmung genutzt, sondern zur Wärmeübertragung in einen Abhitzedampferzeuger (AHDE) geleitet. Dabei überträgt das Abgas des Gasturbinenprozesses seine Abwärme auf Wasser, welches das Prozessfluid des anschließenden Dampfturbinenprozesses darstellt. Im AHDE wird dieses annähernd isobar verdampft und überhitzt. Der Dampf wird anschließend in einer Dampfturbine entspannt, welche wiederum einen Generator antreibt. Nach der Entspannung wird der Dampf im Kondensator durch Wärmeabfuhr wieder in den flüssigen Zustand kondensiert. Zur Kondensation bedarf es einer Wärmesenke, die in vielen Kraftwerken als Kühlturm realisiert wird [1]. Der Druck des flüssigen Wassers wird dann vor der Dampferzeugung im AHDE mittels Kondensatpumpe erhöht. Bei mehrstufig ausgeführten Dampfturbinen-Prozessen mit mehr als einer Expansionsstufe kann die Wärmezufuhr durch Zwischenüberhitzungen im AHDE realisiert werden. Dadurch wird die mittlere Prozesstemperatur und somit der thermische Wirkungsgrad gesteigert [1]. Der ideale Vergleichsprozess für den einstufigen Wasser/Dampfprozess ist der Clausius-Rankine-Prozess. Dieser ist zusammen mit dem Gasturbinenprozess in ABBILDUNG 6 dargestellt. Der Clausius-Rankine-Prozess besteht aus den Zustandsänderungen isentrope Druckerhöhung des Kondensats (0-1), isobare Erwärmung, Verdampfung und Überhitzung mit

Phasenwechsel des Prozessfluids (1-2), isentrope Entspannung (2-3) und isobarer Kondensation (3-0). Dieser Kreisprozess bietet durch den Phasenwechsel den Vorteil, dass die notwendige Leistungszufuhr der Kondensatpumpe zur Druckerhöhung im flüssigen Medium weitaus niedriger gestaltet werden kann, als zur Verdichtung eines dampf- oder gasförmigen Fluids wie beim GT-Prozess.

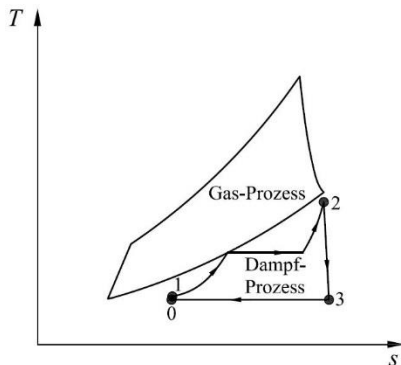


ABBILDUNG 6: T-s DIAGRAMM DES KOMBINIERTEN GAS- UND DAMPFTURBINEN-KREISPROZESSES, EIGENE DARSTELLUNG NACH [13].

In HKW mit KWK wird im Gegensatz zum reinen Kondensationskraftwerk der Dampf nicht vollständig entspannt und somit die Restwärme zur Speisung von Fernwärmeleitungen genutzt [1].

2) Effizienz des Gas- und Dampfturbinen-Kreisprozesses

Der Vorteil dieses kombinierten Kreisprozesses gegenüber dem reinen GT-Prozess stellt die Abwärmenutzung des Rauchgases im AHDE dar. Durch diese Kombination der beiden Prozesse können elektrische Wirkungsgrade mit mehr als 60 % erzielt werden [13]. Auch hier spielt die Güte der Prozesskomponenten eine Rolle [13].

E. Gasmotorenkraftwerke

In Konkurrenz zu den klassischen Turbinenkraftwerken stehen die Gasmotorenkraftwerke. Diese werden vorwiegend als BHKW mit KWK ausgeführt. Ein Vorteil gegenüber den Turbinenkraftwerken stellt dabei der modulare Aufbau und die dadurch realisierbare flexible Fahrweise dar. Wo bei Gasturbinenkraftwerken im Teillastbereich Verluste auftreten, kann durch die individuelle Regelbarkeit der einzelnen Module im Motorenkraftwerk eine optimale Betriebsweise eingestellt werden [15]. Darüber hinaus weisen Gasmotoren kürzere Anlaufzeiten auf [15]. Im Rahmen der KWK kann die Betriebsweise strom- oder wärmegeführt erfolgen [16]. Gasmotorenkraftwerke arbeiten vorwiegend nach dem Prinzip des Otto-Prozesses [1], dargestellt in ABBILDUNG 7. Zunächst wird das Kraftstoff/Luft-Gemisch im Zylinder isentrop verdichtet, indem der Hubkolben bei geschlossenen Ventilen von seinem unteren Totpunkt (U.T.) durch äußere Arbeitszufuhr zu seinem oberen Totpunkt (O.T.) bewegt wird (1-2). Dort wird das Gemisch durch eine Zündkerze entzündet, was zu einem schlagartigen Druckanstieg führt (2-3). Diese Wärmezufuhr wird idealisiert als isochor betrachtet, daher wird der Ottoprozess auch als Gleichraumprozess bezeichnet [1]. Nach der Zündung wird der Kolben durch den hohen Druck in Richtung des U.T. bewegt und verrichtet dabei Arbeit (3-4). Diese Zustandsänderung wird idealisiert als isentrope Entspannung bezeichnet. Befindet sich der

Kolben nun am U.T., werden die Auslassventile für das Abgas geöffnet. Durch die anschließende Bewegung vom U.T. zum O.T. werden die Restgase vom Kolben herausgeschoben (4-0). Am O.T. wird das Auslassventil geschlossen und das Einlassventil geöffnet, sodass bei Bewegung des Kolbens in Richtung U.T. neues Kraftstoff-/Luftgemisch in den Zylinder gesaugt wird (0-1) [1]. Der Hubkolben durchläuft daher zwei Zyklen für einen gesamten Kreisprozess. Speziell für den Gasmotor bedarf es eines Gasmischers für das Brenngas und die Verbrennungsluft [1].

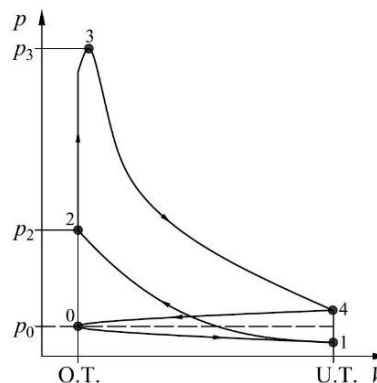


ABBILDUNG 7: p-V-DIAGRAMM DES OTTO-KREISPROZESSES, EIGENE DARSTELLUNG NACH [1].

1) Effizienz des Gasmotors

Der thermische Wirkungsgrad des idealen Ottoprozesses $\eta_{th, Otto}$ unter Annahme von perfektem Gasverhalten ergibt sich aufgrund der Zustandsänderungen zu

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{(V_{U.T.}/V_{O.T.})^{\kappa-1}} \quad [1]. \quad (12)$$

IV. GAS-TO-POWER-TECHNOLOGIEN IN DER ENERGIEWENDE

Gas-to-Power-Technologien stellen eine Schnittstelle zur Kopplung der Energiesektoren Strom und Gas und bei KWK auch Wärme dar. Im Rahmen der Energiewende und Dekarbonisierung der Energieversorgung wird insbesondere die Verwendung erneuerbarer Gase und Wasserstoff zu einem zentralen Thema [3]. Die Gas-to-Power-Technologien Brennstoffzellen und Gaskraftwerke können je nach Leistungsklasse zentral sowie auch dezentral die „Rückverstromung“ generieren. Im Folgenden wird die jeweilige Relevanz dieser Technologien in der Energiewende und aktuelle Forschungsthemen behandelt.

A. Brennstoffzellen in der Energiewende

1) Die Rolle der Brennstoffzelle

Wie bereits erwähnt, können BZ in den verschiedensten Applikationen eingesetzt werden und somit die bisher genutzten, weniger umweltfreundlichen Technologien ablösen. Für einen großen Marktanteil an BZ-betriebenen Fahrzeugen ist eine flächendeckende Tankinfrastruktur erforderlich. Der Ausbau dieser geht stetig voran, jedes Jahr kommen weitere Wasserstofftankstellen in Deutschland dazu [17]. Aber auch die preisgünstige Anschaffung derartiger Fahrzeuge muss möglich sein, um einen schnellen Anteilsanstieg am Markt zu verzeichnen. Die Umstellung des Erdgasnetzes auf Wasserstoff würde eine einfachere Prozesstechnik bei der gasseitigen Integration von BZ, sowie

von Elektrolyseuren, ermöglichen. Dies liegt am Wegfall von der Reformertechnik, da die BZ dann direkt mit Wasserstoff versorgt werden würde. Untersuchungen zur Erhöhung des Wasserstoffanteils im Erdgasnetz [18] und Pläne zur Umstellung auf ein Wasserstoffnetz [3] sind bereits vorhanden. Brennstoffzellen werden derzeit bereits vermehrt in der Hausenergieversorgung als Mikro-BHKW [12] oder als Großkraftwerk mit Leistungen über 1 MW eingesetzt [1].

2) Aktuelle Forschungsthemen

Eine breitere Nutzung der Brennstoffzellentechnologien erfordert noch eine weitere Erforschung insbesondere geeigneter Materialien. Ziel ist es, Materialien zu finden, die unter den gegebenen Betriebszuständen eine hohe Lebensdauer aufweisen, geringe Kosten haben und dabei möglichst noch die Leistung steigern. Das Department of Energy in den USA hat für Brennstoffzellen Zielwerte für den stationären und mobilen Anwendungsfall gesteckt, die heute noch nicht immer erreicht werden [19], [20].

Ein weiteres Forschungsfeld stellt zurzeit die Möglichkeit zur reversiblen Umschaltbarkeit von PEM-FC dar. Dies bedeutet, dass die PEM-FC durch Stromaufnahme in den Elektrolysebetrieb übergehen kann [21]. Hiermit ergeben sich in einer auf Wasserstoff basierenden Energieversorgung neue Möglichkeiten, am Energiemarkt teilzunehmen. Z. B. ist ein Konzept als Notstromaggregat denkbar, bei dem die Elektrolyse die meiste Zeit am Energiemarkt teilnimmt und die Brennstoffzelle, neben der üblichen Funktionsüberprüfung für Notstromaggregate, insbesondere im Fall eines Netzausfalls einspringt [22]. Analysen zu Umschaltzeiten zwischen den Betriebsmodi und Lebensdaueruntersuchungen stehen hier noch aus.

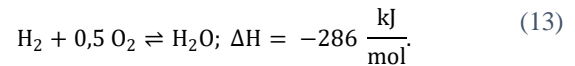
Zudem verspricht der Ansatz einer elektrisch steuerbaren Polymermembran in PEM-FC eine Verbesserung des dynamischen Verhaltens und eine (temporäre) Leistungssteigerung. Hierfür wird der bekannte Aufbau der PEM-FC um einen „Electric Field Modifier“ erweitert, mit dessen Hilfe sich ein zusätzliches elektrisches Feld an der Membran aufbauen und steuern lässt. Das Feld kann zur Manipulation des Widerstandes der Protonbewegung durch die Membran dienen und damit direkt Einfluss auf den BZ Betrieb nehmen. Diese Technologie könnte zukünftig bei speziellen Applikationen zu einer kostengünstigeren und einfacheren Netzintegration führen [23]. Dies bietet insbesondere im mobilen Anwendungsbereich große Vorteile.

B. Gaskraftwerke in der Energiewende

Die Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe ist durch die Emission von Kohlenstoffdioxid nicht klimaneutral. Dennoch bestehen Potentiale für die Nutzung der Kraftwerksinfrastruktur. Diese könnte insbesondere in Hinblick auf die bevorstehenden Ausstiege aus Kern- (spätestens 2022) und Kohleenergie (spätestens 2038) eine Schlüsseltechnologie zur weiteren sicheren und schadstoffarmen Energieversorgung darstellen [24]. Ein Vorteil bestünde dabei durch den bereits bestehenden Kraftwerkspark und der vorhandenen Infrastruktur an Gasleitungen und insbesondere bei Gasmotorenkraftwerken die stark flexible Fahrweise. Im Folgenden werden Potentiale alternativer Brennstoffe wie Wasserstoff, Biogas und synthetisches Methan für Gaskraftwerke, dabei bestehende technische Herausforderungen und aktuelle Forschungsthemen aufgezeigt.

1) Einsatz von Wasserstoff

Als Alternative zum fossilen Erdgas könnte Wasserstoff (H_2) als Brennstoff in Gaskraftwerken eingesetzt werden. Die Verbrennungsreaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff lautet nach [1]



Dabei wird im Gegensatz zu der Verbrennung mit kohlenstoffhaltigen Brenngasen kein Kohlenstoffdioxid freigesetzt, wodurch Wasserstoff als klimaneutraler Brennstoff bewertet wird. Darüber hinaus ist die Gewinnung von „grünem“ Wasserstoff aus Elektrolyseprozessen, die mit überschüssigem, regenerativem Strom betrieben werden, ressourcenschonend. Durch den direkten Einsatz von Wasserstoff gegenüber synthetischem Methan in Gaskraftwerken könnte der Schritt der Methanisierung entfallen und so die Gesamteffizienz erhöht werden [25]. Allerdings kann in erdgasbasierten Kraftwerken nicht einfach eine Substitution des Brennstoffs ohne zusätzlichen technischen Aufwand erfolgen, da sowohl die zuzuführenden Brenngase als auch die aus der Verbrennung entstehenden Heißgase unterschiedliche Stoffeigenschaften aufweisen. Bei gleichbleibendem Volumenstrom durch die Turbine würde sich bei der Verbrennung mit Wasserstoff durch die niedrigere Dichte des Heißgases ein kleinerer Massenstrom einstellen, wodurch wiederum die zu gewinnende Leistung verringert werden würde. Gleichzeitig wird ein niedrigerer Luftmassenstrom benötigt, wodurch sich das Verhältnis von Verdichter- zu Turbinenleistung ändert. Die Komponenten müssen daher entsprechend für den Betrieb mit Wasserstoff in der Auslegung modifiziert werden. Bei der Verbrennung von reinem Wasserstoff treten höhere Temperaturen als bei der Verbrennung von Erdgas auf. Dies stellt insbesondere die Gestaltung, Konstruktion und Werkstoffentwicklung für Brennkammer und Turbine vor große Herausforderungen [26]. Herkömmliche Gasturbinen vertragen nur einen geringen Anteil an Wasserstoff im Erdgas. Es bedarf neuer Materialien, die gegenüber den höheren thermischen und mechanischen Belastungen Bestand haben [26]. Durch neue Ansätze in der Gestaltung der Bauteile kann deren Belastung verringert werden: Z. B. kann die Kühlung der Schaufeln, die bereits in herkömmlichen Gasturbinen essentiell für die Beständigkeit der Werkstoffe ist, durch entsprechende Anpassungen noch effizienter und zielgerichteter verlaufen. Diese komplexen Geometrien können mithilfe von 3D-Druck-Technologien realisiert werden. Bereits bestehende Gasturbinen können so durch Nachrüstung der Schaufeln für wasserstoffreiche Brenngase tauglich gemacht werden [27]. Die im Europäischen Verband „EU-Turbines“ organisierten Gasturbinenhersteller kündigten im Januar 2019 im Rahmen der Kampagne „PowerTheEU“ eine schrittweise Umstellung der Gasturbinenentwicklung auf erneuerbare Brennstoffe bis 2030 an. Im Zehnjahresplan ist dabei die Betriebsfähigkeit neu hergestellter Gasturbinen mit bis zu 20 Vol-% Wasserstoffbestandteil im Erdgas bis 2020 und die Einsatzfähigkeit der Turbinen bei der Verbrennung mit reinem Wasserstoff bis zum Jahre 2030 vorgesehen [26]. Auch soll im Rahmen des „Carbon-Free-Gas-Power-Projektes“ das GuD-Kraftwerk Magnum der Leistungsklasse 440 MW in Eemshaven in den Niederlanden vom bisherigen Erdgasbetrieb für den Wasserstoffbetrieb bis 2023 umgerüstet werden [28].

Neben Modifikationen an der eigentlichen Gasturbine besteht auch Handlungsbedarf in der Gestaltung der Brennkammer. Bei der Verbrennung von Wasserstoff stellen lokal auftretende Temperaturspitzen sowie lange Verweilzeiten in der Brennkammer Ursachen für Stickoxidemissionen dar [29]. An der TU Graz wird daher numerisch ein innovatives Verbrennungskonzept mittels Einzeldüsen zur Vermischung von Luft und Brennstoff analysiert. Dies soll zur Verkürzung der Mischstrecke und einer kompakteren Flamme mit kurzer Verweilzeit führen und damit schlussendlich die Minderung von Stickoxiden bewirken [29]. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens „Development of smart community technology by Utilization of Hydrogen CGS (Co-Generation System)“ eine Diffusionsbrennkammer für den flexiblen Einsatz von Wasserstoff, Erdgas oder beliebiger Gemische entwickelt und deren Inbetriebnahme mit einer Wasserstoffturbine 2018 in Kobe umgesetzt [30]. Auch an der TU Berlin wird seit 2015 im Projekt „Blue Step“ die „nasse Verbrennung“, eine Verbrennung von Wasserstoff mit Wasserdampf erprobt [31]. Herausforderungen dabei bestehen bei der Ermittlung des geeigneten Verhältnisses von Wasser- und Sauerstoff [31].

Am DLR wird im Projekt „Hybrid-Kraftwerk“ die Kombination aus Mikro-Gasturbine und Brennstoffzelle erprobt [32]. Bei dieser Technologie wird verdichtete Luft durch Abgase des GT-Prozesses vorgewärmt und anschließend der Hochtemperatur-Brennstoffzelle als Sauerstoffquelle zugeführt. Daraufhin wird die Luft in der Brennkammer durch weitere Brennstoffzufuhr noch weiter erhitzt und anschließend in der Gasturbine mit einem Generator verstromt. Durch die intelligente Verschaltung der Prozesse und die dadurch resultierende Wärmeausnutzung werden Wirkungsgrade von bis zu 70 % denkbar [33].

Bei Gasmotoren, die für den Erdgasbetrieb ausgelegt sind, bedarf es neuer Umrüstungsstrategien um auch bestehende Anlagen tauglich für die Verbrennung von Brenngasen mit hohem Wasserstoffgehalt oder reinem Wasserstoff zu machen [34]. Dabei muss eine Anpassung der konstruktiven Ausgestaltung der Zylinder und Kolben erfolgen. Im Gegensatz zum reinen Erdgasbetrieb bestehen bei der Verbrennung von wasserstoffreichem Brenngas hohe Zündgrenzen, weshalb bei der Einblasung in die Vorkammer keine Betriebssicherheit gewährleistet werden kann. Daher muss ein Konzept mit offenem Brennraum verfolgt werden. Die notwendige Turbulenz kann dabei durch Asymmetrien in der Kolbenmulde und eine drallerzeugende Zylinderform erreicht werden [34]. Eine weitere Herausforderung ist die zuverlässige Gemischbildung und das Verhindern unkontrollierter Selbstentzündungsvorgänge, welche durch die deutlich schnellere Verbrennung ohne erkennbares Klopfen auftreten. Diese irregulären Verbrennungszyklen müssen mithilfe eines zylinderdruckgeführten Regelkonzeptes frühzeitig erkannt und vermieden werden [34].

Eine weitere Herausforderung für die Nutzung von Wasserstoff in Gaskraftwerken stellt außerdem die Bereitstellung des Brenngases dar: Im Gegensatz zur gut ausgebauten leitungsgebundenen Erdgasinfrastruktur, bedarf der Einsatz von Wasserstoff bisher noch großen, separaten Speichern [25]. Mit einer ausgebauten Wasserstoffinfrastruktur, wie sie bereits geplant wird [3], würde die Notwendigkeit von Speichern hinfällig werden. Die Gewinnung des Wasserstoffs könnte in der einfachsten Umsetzung auch lokal durch Elektrolyseure geschehen. Im

österreichischen GuD-Kraftwerk Mellach wird ebenfalls der anteilige Ersatz von fossilem Erdgas durch Wasserstoff geprüft. Hier wird für die Bereitstellung des Wasserstoffs zur Beimischung eine Hochtemperatur-Elektrolyse-Anlage errichtet, deren Betrieb mit überschüssigem Wind und Solarstrom erfolgen soll. Diese ist außerdem reversibel als Brennstoffzelle einsetzbar, um zur Eigen- oder Notstromversorgung elektrische Leistung und Wärme aus Erdgas zu gewinnen [35].

2) Einsatz von Biogas

Biogas wird aus dem Vergärungsprozess von Biomasse jeglicher Art gewonnen. Rohstoffe dafür können neben biomassehaltigen Reststoffen, wie Bioabfall und Klärschlamm, auch anfallende Gülle, Pflanzenreste oder gezielt angebaute Energiepflanzen darstellen [36]. Aufgrund der vielfältigen Herkunft der Rohstoffe kann die Zusammensetzung von Biogas stark variieren. Durch Gasaufbereitung kann aus inhomogenem Biogas Biomethan generiert werden. Dieses kann in die Erdgasinfrastruktur eingespeist werden. Prozessschritte der Aufbereitung von Biogas bis hin zur Einspeisung von Biomethan bestehen im Allgemeinen aus Entschwefelung und Gastrocknung zur Vermeidung von Korrosion durch Schwefelwasserstoffe oder Wasser, Abtrennung von Kohlenstoffdioxid, Konditionierung zur Anpassung des Brennwertes über die Gaszusammensetzung, Odorierung und Verdichtung auf Leitungsdruck [36]. Die Kriterien und Bedingungen zur Gasbeschaffenheit und -qualität sind in den DVGW-Regelwerken G 260 (A) und G 262 (A) festgelegt [37], [38]. Dabei muss eine kontinuierlich homogene Beschaffenheit des Bezugsgases für die Verbraucher sichergestellt sein, was durch messtechnische Überwachung des Brennwertes realisiert wird [36]. Im Zuge einer ordnungsgemäßen Einspeisung von Biomethan in die bestehende Infrastruktur werden alle Erdgasverbraucher erschlossen, daher bedarf es keines zusätzlichen Handlungsbedarfs für Kraftwerksbetreiber als Bezieher.

3) Einsatz von synthetischem Methan

Als synthetisches Methan soll hier methanisierter Wasserstoff, der aus Elektrolyseverfahren gewonnen wurde, bezeichnet werden. Dieses wird auch als erneuerbares Methan bezeichnet, wenn es ausschließlich durch Strom aus erneuerbaren Energien generiert wird und bietet somit eine stoffgebundene Art der Speicherung für überschüssigen Strom. Die entsprechenden Kriterien zur Einspeisung von synthetischem Methan liegen ebenfalls dem DVGW-Regelwerk zu Grunde [37], [38]. Der Kohlenstoff für die Methanisierung kann dabei durch Abscheideprozesse von CO₂ aus Kohlekraftwerken oder Biogasanlagen gewonnen werden. Es besteht ein Patent für ein GuD-Methankraftwerk: Dieses soll mit synthetischem Methan betrieben werden, welches lokal aus regenerativ erzeugtem Wasserstoff mit CO₂ erzeugt wird, das durch den Kraftwerksprozess selbst aus dem Abgas gewonnen worden ist und in unterirdischen Lagerstätten zwischengespeichert wird. Dadurch wird das Treibhausgas dauerhaft im Kreis geführt und somit der Umwelt entzogen [39].

LITERATUR

- [1] R. Zahoransky, H.-J. Allelein, E. Bollin, H. Oehler und U. Schelling, *Energietechnik, Systeme zur Energieumwandlung*, Kompaktwissen für Studium und Beruf, 5. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, 2010.

- [2] T. Schütte, *Leitungsgebundene Energieversorgung in Mittel- und Osteuropa*, Elektrizität, Erdgas und Fernwärme, T. Schütte, Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [3] Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V., „Netzentwicklungsplan Gas 2020–2030,“ Berlin, 2020.
- [4] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [5] H. Watter, *Energiesysteme: Systemtechnik und Beispiele nachhaltiger Energiesysteme aus der Praxis*, 3 Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [6] V. Quaschnig, *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit*, 2 Hrsg., München: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [7] R. O’Hayre, S.-W. Cha, W. Colella und F. B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals*, New York: John Wiley & Sons, 2016.
- [8] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung, Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*, 9. aktualisierte und korrigierte Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [9] [Online]. Available: <https://www.enbw.com/energieentdecken/energieerzeugung/konventionelle-erzeugung/>. [Zugriff am 6 Oktober 2020].
- [10] [Online]. Available: <https://www.hutter-frei.com/kombi-gud-heizkraftwerke,8.html>. [Zugriff am 23 Oktober 2020].
- [11] „Bundesnetzagentur,“ [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html. [Zugriff am 15 Oktober 2020].
- [12] T. Badenhop und M. Schellen, „Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung,“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*, 2. Auflage, J. Lehmann, Hrsg., Berlin, Springer Vieweg, 2017.
- [13] C. L. u. J. S. (Hrsg.), *Stationäre Gasturbinen*, 3. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [14] H. D. Baehr und S. Kabelac, *Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen*, 16., aktualisierte Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2016.
- [15] [Online]. Available: <https://www.bayern-innovativ.de/seite/gaskraftwerke>.
- [16] [Online]. Available: <https://www.energate-messenger.de/news/183961/kraftwerke-im-bau--teil-2-gasmotorenkraftwerke>.
- [17] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, „H2 tanken - Wasserstoffmobilität beginnt jetzt,“ [Online]. Available: <https://h2.live>. [Zugriff am 22 Oktober 2020].
- [18] T. Lindemann, „Lokale Wärmeversorgung mit bis zu 30% Wasserstoff,“ in *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz: Aktuelle Infrastruktur- und Technologieansätze in den Bereichen Strom- und Gasnetz, Elektromobilität und Wasserstoffwirtschaft*, Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2019, pp. 99-102.
- [19] U.S. Department of Energy, „DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications,“ [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications>. [Zugriff am 14 Oktober 2020].
- [20] U.S. Department of Energy, „DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems for Stationary (Combined Heat and Power) Applications,“ [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-stationary-combined-heat-and-power>. [Zugriff am 14 Oktober 2020].
- [21] B. Paul und J. Andrews, „PEM unitised reversible/regenerative hydrogen fuel cell systems: State of the art and technical challenges,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 585-599, November 2017.
- [22] R. Hankers, S. Best, C. Cosse und D. Schulz, „Nutzung von umschaltbaren Brennstoffzellen- und Elektrolyseanlagen in der Sektorkopplung,“ in *Hamburger Beiträge zum technischen Klimaschutz: Aktuelle Infrastruktur- und Technologieansätze in den Bereichen Strom- und Gasnetz, Elektromobilität und Wasserstoffwirtschaft*, Bd. 1, Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, 2019, pp. 116-121.
- [23] 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.
- [24] [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energie-erzeugen/moderne-kraftwerke-bilden-bruecke-404310>. [Zugriff am 23 Oktober 2020].
- [25] [Online]. Available: https://www.energielexikon.info/gas_und_dampf_kombikraftwerk.html.
- [26] [Online]. Available: <https://www.zfk.de/energie/gas/artikel/europaeische-gasturbinen-industrie-verpflichtet-sich-fuer-das-erneuerbare-zeitalter-2019-01-24/>. [Zugriff am 6. Oktober 2020].
- [27] [Online]. Available: <https://www.nzz.ch/wissenschaft/forscher-machen-gasturbinen-fit-fuer-wasserstoff-und-energiewende-ld.1494462>. [Zugriff am 6 Oktober 2020].
- [28] [Online]. Available: <https://www.hzwei.info/blog/2018/09/13/wasserstoff-statt-methan-im-kraftwerk/>.
- [29] O. Borm und K. Eckerstorfer, „Numerische Untersuchung einer schadstoffarmen Wasserstoffbrennkammer für Kleingasturbinen,“ Technische Universität Graz.
- [30] [Online]. Available: https://www.kawasakigasturbine.de/files/Entwicklungen_zur_Wasserstoff-Gasturbine.pdf. [Zugriff am 23 Oktober 2020].
- [31] [Online]. Available: <https://www.hzwei.info/blog/2016/06/14/tuberlin-erforscht-nasse-verbrennung/Hybrid.> [Zugriff am 6 Oktober 2020].
- [32] DLR, [Online]. Available: https://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6327/11173_read-25485/. [Zugriff am 5. Oktober 2020].
- [33] DLR, [Online]. Available: https://www.dlr.de/next/desktopdefault.aspx/tabid-6748/11089_read-25486/. [Zugriff am 5 Oktober 2020].
- [34] S. Laiminger, M. Url, K. Payrhuber und M. Schneider, „Wasserstoff für Gasmotoren – Kraftstoff der Zukunft,“ *MTZ worldwide*, Bd. 81, Jahrgang, Nr. 05/2020, pp. 66-71, 2020.
- [35] [Online]. Available: https://www.stadt-und-werk.de/meldung_31231_Wasserstoff+im+GuD-Kraftwerk.html. [Zugriff am 1 Oktober 2020].
- [36] M. Kaltschmitt und H. Hartmann, *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, H. Hofbauer, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [37] DVGW, *Technische Regel- Arbeitsblatt DVGW G 260 (A), Gasbeschaffenheit*, Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., 2013.
- [38] 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.
- [39] [Online]. Available: https://www.handelsblatt.com/technik/das-technologie-update/energie/power-to-gas-das-wohl-sauberste-gaskraftwerk-der-welt/v_detail_tab_print/9950478.html.
- [40] J. Zhang und e. al., „High temperature PEM fuel cells,“ *Journal of Power Sources*, pp. 872-891, 6 Oktober 2006.