

Bachelorarbeit

Modellierung und Simulation des Wasserstoff-Energiesystems eines Quarzglasherstellers in Modelica zur Identifikation effizienter Systemkonzepte

Modelling and simulation of the hydrogen-energysystem of a fused quartz producer in
Modelica to identify efficient systemconcepts

Aachen, Mai 2021

Tobias Jonathan Boschmann

Matrikelnummer: 379947

Betreuer:

Hannah Krütfeldt, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Diese Arbeit wurde vorgelegt am:

E.ON Energy Research Center | ERC

Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate | EBC

(Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik)

Mathieustraße 10, 52074 Aachen

Zusammenfassung

Bei der Quarzglasveredelung wird in fluktuierenden Mengen Wasserstoff sowie Sauerstoff benötigt. Diese werden von dem Kunden intern mithilfe eines Elektrolyseurs erzeugt. Elektrolyseure produzieren Wasserstoff und Sauerstoff in einem festen Stoffmengenverhältnis, allerdings wird in einigen Verfahrensschritten des Kunden ein anderes Stoffmengenverhältnis benötigt. Daher werden für den Betrieb nicht benötigte Mengen Wasserstoff erzeugt, welche im aktuellen System ungenutzt in die Atmosphäre entweichen. In dieser Arbeit wird anhand einer Simulationsstudie untersucht, ob eine Nutzung der überschüssigen Gase sinnvoll in das Energiesystem des Herstellers eingebunden werden kann. Als Erweiterung des aktuellen Wasserstoff-Energiesystems wird eine Brennstoffzelle, eine Photovoltaik-Anlage und ein Zwischenspeicher für die Prozessgase in Betracht gezogen.

In vorangehenden Arbeiten wurde an dem Institut bereits die Modelica-Bibliothek AixLib entwickelt, welche unter anderem Modelle der relevanten Elektronik-Komponenten, wie beispielsweise der PV-Anlage, enthält. Im ersten Schritt werden für die benötigten Wasserstoffkomponenten - insbesondere Elektrolyseur und Brennstoffzelle - Modelle in Modelica erstellt. Dabei wird ein Aufbau gewählt, der es ermöglicht, verschiedene Anlagen anhand von Kennwerten aus Datenblättern zu modellieren.

Aus einer Validierung der Komponentenmodelle geht hervor, dass diese für die in dieser Arbeit angestrebten Untersuchungen geeignet sind: In den gewählten Betriebspunkten ergeben sich für den Elektrolyseur und die Brennstoffzelle Abweichungen von durchschnittlich 2,0 % und 5,3 % der relevanten Ausgangsgrößen zu Messwerten aus der Literatur.

Im zweiten Schritt werden mögliche Konzepte des Energiesystems herausgearbeitet. Dabei wird insbesondere die Verwendung einer Brennstoffzelle zur Kraft-Wärme-Kopplung betrachtet. Zudem wird die Einbindung einer Photovoltaik-Anlage zur Deckung des Energiebedarfs sowie deren Ergänzung um einen Gasspeicher untersucht.

Daraufhin werden die Konzepte in Modelica simuliert und abschließend wird eine Interpretation der Simulationsergebnisse durchgeführt. Zur Bewertung werden die Kapitalwerte sowie die CO₂-Einsparungen der Systemkonzepte verglichen.

Die Investition in eine Brennstoffzelle stellt sich als tendenziell unwirtschaftlich heraus, wobei die ökologische Bewertung positiv ausfällt. Eine Optimierung des Brennstoffzellen-Konzepts verspricht deutliche Verbesserungen des Kapitalwerts, ohne die CO₂-Einsparungen signifikant

zu vermindern. Die PV-Anlage stellt sowohl nach der ökonomischer, als auch nach der ökologischer Bewertung die sinnvollste Erweiterung des aktuellen Systems dar. Die Ergänzung der PV-Anlage um einen Gasspeicher hat auf die Ausgangsgrößen der Simulation keinen Einfluss und wird daher als nicht sinnvoll bewertet.

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Modellierung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen	3
2.1.1 Stand der Technik der Modellierung von Elektrolyseuren	4
2.1.2 Stand der Technik der Modellierung von Brennstoffzellen	5
2.2 Grundlagen der Wasserelektrolyse	6
2.2.1 Elektrochemische Betrachtung	7
2.2.2 Thermisches Verhalten	10
2.2.3 Polarisationskurve und Betriebsbereiche von Elektrolyseuren	11
2.2.4 Technologien der Wasserelektrolyse	12
2.2.5 Grundlagen von Brennstoffzellen	14
2.2.6 Benötigte Systemkomponenten	16
3 Modellierung des Wasserstoff-Energiesystems	19
3.1 Implementierung der Wasserstoffkomponenten in Modelica	19
3.1.1 Modellierung der Zelle	19
3.2 Entwicklung von Energiesystem-Konzepten	21
3.2.1 Identifikation sinnvoller Bewertungskriterien	22
3.2.2 Entwicklung von Systemkonzepten	22
3.3 Parametrierung der Komponenten	24
4 Simulation der Systemkomponenten und Diskussion der Ergebnisse	29
4.1 Validierung der Komponentenmodelle	29
4.1.1 Komponenten der Systemkonzepte	29
4.1.2 PEM-Elektrolyseur	32
4.2 Ergebnisse der Simulationen der Systemkonzepte	34

5	Fazit und Ausblick	41
	Literaturverzeichnis	43
A	Parametrierung der Modelle	53
B	Systemkonzepte	55
C	Parameter zur Berechnung des Kapitalwerts	57
D	Parameter zur Berechnung der CO2-Einsparungen	59

Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
C	Kapitalwert	€
C_{Zelle}	Wärmekapazität der Zelle	J/K
C_{th}	Wärmeverlustfaktor	W/K
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/(kgK)
F	Faraday Konstante	A/m ²
$\Delta_R G$	freie Reaktionsenthalpie	A/m ²
H	Enthalpie	J
$\Delta_f H_i$	Bildungsenthalpie	J/mol
$\Delta_R H$	Reaktionsenthalpie	J/mol
H_u	unterer Heizwert	J/mol
I	Stromstärke	A
I_0	Anfangsinvestition	€
i	Stromdichte	A/m ²
i_0	Austauschstromdichte	A/m ²
m	molare Konzentration	mol/l
Δm_{CO_2}	CO ₂ -Einsparungen	kg
n	Kalkulationszeitraum	a
\dot{n}	Stoffmengenstrom	mol/s
P	Leistung	W
ΔP_{el}	Stromeinsparungen	kWh
p	Druck	Pa
\dot{Q}	Wärmestrom	W
ΔQ	Gaseinsparungen	kWh
R	molare Gaskonstante	J K/mol
r	Kalkulatorischer Zinssatz	—
R_{el}	elektrischer Widerstand	Ω

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
S_i	Bildungsentropie	J K/mol
$\Delta_R S$	Reaktionsentropie	J K/mol
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
U	Spannung	V
V	Volumen	m ³
z	Elektronenzahl	—
Z	Jährliche Zahlungsströme	€

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Durchtrittsfaktor	—
δ	Elektrodenabstand	m
η	Wirkungsgrad	—
ν_i	stöchiometrische Koeffizienten	—
λ	Feuchtegehalt	—
σ	Leitfähigkeit	§/m

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
0	Referenzzustand (<i>ambient dead state</i>)
Akt	Aktivierung
Alk	alkalisch
aus	Ausgangszustand
ein	Eingangszustand
einsp.	Einsparungen
el	elektrisch

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Indizes und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
Em.	Emissionen
exp	Exponentialfunktion
GR	Gleichrichter
PEM	Protonen-Austausch-Membran (<i>proton exchange membran</i>)
PV	Photovoltaik
Prod.	Produktion
R	Reaktion
rev	reversibel
SO	Festoxid (<i>solid oxide</i>)
tn	thermoneutral
WR	Wechselrichter

Abbildungsverzeichnis

2.1	Überdeckung der Eigenschaften von System und Modell nach Tabeling [52]. .	3
2.2	Ladungsträger bei der Wasserelektrolyse nach Tjarks [53].	7
2.3	Abhängigkeit der Reaktionsenthalpie und der freien Enthalpie von der Temperatur nach Tremel [54].	9
2.4	Mögliche Bereiche der Polarisationskurven der in 2.2.4 erläuterten technischen Verfahren nach Tremel [54].	11
2.5	Übersicht der benötigten Systemkomponenten zum Betrieb eines Elektrolyseurs [53].	17
2.6	Übersicht der benötigten Systemkomponenten zum Betrieb einer Brennstoffzelle.	17
3.1	Struktur des entwickelten Modells.	20
3.2	Aktuelles System sowie betrachtete Erweiterungen (1.Netzanschluss 2.Elektrolyseur 3.Gasheizung 4.Strombedarf 5.Wasserstoffbedarf 6.Sauerstoffbedarf 7.Heizwärmebedarf - Erweiterungen: 8.Brennstoffzelle 9.PV-Anlage 10.Gasspeicher).	23
3.3	An 2018 angelehnter, exemplarischer Verlauf des Wasserstoff und Sauerstoffbedarfs über einen Arbeitstag.	26
3.4	An 2019 angelehnter, exemplarischer Verlauf des Wasserstoff und Sauerstoffbedarfs über einen Arbeitstag.	27
4.1	Vergleich des Elektrolyseur-Modells mit Messwerten von Hammoudi et al. [24].	30
4.2	Vergleich des Brennstoffzellen-Modells mit Messwerten von Chugh et al. [10].	31
4.3	Vergleich des Elektrolyseur-Modells mit Messwerten von Tjarks [53].	33
4.4	Vergleich der Simulationsergebnisse für den Jahresstromverbrauch des aktuellen Systems und der Konzepte samt Angabe der Stromeinsparungen im Vergleich zum aktuellen System.	36
4.5	Kapitalwerte der Systemkonzepte.	38
4.6	CO ₂ -Einsparungen der Systemkonzepte.	39

Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften verschiedener Modellstrukturen.	4
2.2	Standardbildungsenthalpien und Standardentropien für 25 °C [29] sowie stöchiometrische Koeffizienten aus Gleichung 2.1.	8
2.3	Vergleich der gängigen Technologien zur Wasserelektrolyse nach Milanzi et al. [32], Tremel [54] und Rashid et al. [41].	15
2.4	Vergleich der gängigen Technologien Wasserstoff-basierter Brennstoffzellen nach Mekhilef et al. [31].	16
3.1	Zur Simulation des alkalischen Elektrolyseurs verwendete Parameter.	24
3.2	Zur Simulation der PEM-Brennstoffzelle verwendete Parameter.	25
4.1	Vergleich der Stromeinsparungen, Einspeisung und Gaseinsparung der Systemkonzepte (Im erste Block sind die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2018 und im zweite die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2019 angegeben).	36
4.2	Kapitalwerte der Konzepte sowie Kosten, die in die Berechnung einfließen (Im erste Block sind die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2018 und im zweite die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2019 angegeben).	38
4.3	CO ₂ -Einsparungen der Systemkonzepte sowie Einsparungen elektrischer Energie, Gaseinsparungen und bei der Produktion der Komponenten entstehende CO ₂ -Emissionen (Im erste Block sind die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2018 und im zweite die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2019 angegeben).	40

1 Einleitung

Die deutsche Bundesregierung hat durch den Beschluss vom 12.05.2021 die Zielvorgaben der CO₂ Einsparungen weiter verschärft. Waren anfangs 55 % Einsparungen im Jahr 2030 im Vergleich zum CO₂-Ausstoß von 1990 geplant, wurde dieser Wert auf 65 % angehoben [12]. Auch die Industrie ist gefordert, Maßnahmen zur CO₂-Einsparung zu entwickeln und umzusetzen: In den nächsten 10 Jahren sollten die jährlichen Emissionen der deutschen Industriebranche nach dem alten Plan um 21 % gesenkt werden [15], was sich durch den aktuellen Beschluss weiter verschärft.

In der vorliegenden Arbeit wird das Wasserstoff-Energiesystem eines Quarzglasherstellers betrachtet, um sinnvolle Konzepte zur effizienteren Gestaltung des Systems zu identifizieren: Bei der Herstellung und Nachbehandlung von Quarzglas wird in fluktuierenden Mengen Wasserstoff sowie Sauerstoff benötigt. Diese werden von dem Kunden intern mithilfe eines Elektrolyseurs erzeugt. Elektrolyseure spalten Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff und produzieren die beiden Gase damit in dem festen Stoffmengenverhältnis von 2 : 1. Allerdings werden die Gase in den Verfahrensschritten des Kunden in einem niedrigeren Stoffmengenverhältnis - ungefähr 1,3 : 1 - benötigt. Daher wird ein Wasserstoffüberschuss erzeugt, welcher im aktuellen System ungenutzt in die Atmosphäre entweicht.

In dieser Arbeit wird daher anhand einer Simulationsstudie untersucht, ob eine Nutzung der überschüssigen Gase sinnvoll in das Energiesystem des Herstellers eingebunden werden kann. Dabei wird insbesondere die Verwendung einer Brennstoffzelle zur Kraft-Wärme-Kopplung betrachtet. Diese bietet die Möglichkeit, den Wasserstoff mit Umgebungsluft unter Freisetzung von Wärme und elektrischem Strom zu Wasser zu rekombinieren.

Zudem wird untersucht, welchen Nutzen die Einbindung einer Photovoltaik-Anlage in das Energiesystem für die Deckung des Energiebedarfs hat.

In vorangehenden Arbeiten wurde an dem Institut bereits die Bibliothek AixLib in der Modellierungssprache *Modelica* entwickelt. Die AixLib enthält unter anderem Modelle der relevanten Elektronik-Komponenten, wie beispielsweise der PV-Anlage. In dieser Arbeit werden darauf aufbauend Modelle der benötigten Wasserstoffkomponenten - insbesondere Elektrolyseur und Brennstoffzelle - erstellt. Das Ziel ist dabei ein Aufbau, der es ermöglicht, verschiedene Anlagen anhand von Kennwerten aus Datenblättern zu modellieren. Daraufhin werden mögliche Szenarien des Energiesystems sowie relevante Bewertungsgrößen herausgearbeitet. Im folgen-

den Schritt werden die Modelle der Wasserstoffkomponenten validiert und anschließend die Szenarien in Modelica simuliert. Abschließend wird eine Interpretation der Simulationsergebnisse und darauf aufbauend eine Bewertung der Szenarien anhand der gewählten Kriterien durchgeführt.

Ergebnis der Arbeit sind somit einerseits Modelle der Wasserstoffkomponenten, welche auf der bestehenden AixLib-Bibliothek aufbauen und für folgende Arbeiten genutzt werden können. Andererseits wird eine auf Simulationsergebnissen gestützte Bewertung verschiedener Wasserstoff-Energie Systeme anhand von definierten Kriterien durchgeführt. Dazu ist die vorliegende Arbeit wie folgt aufgebaut:

- In Kapitel 2 werden die allgemeine Grundlagen vorgestellt, auf denen die Modellierung der Wasserstoffkomponenten aufbaut. Anfangs werden dazu allgemeine Grundlagen der Modellierung sowie der Stand der Modellierung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen vorgestellt. Weiterhin wird die Funktionsweise von Elektrolyse- und Brennstoffzellen, deren thermodynamische und elektrochemische Grundlagen sowie gängige technische Lösungen erläutert.
- Kapitel 3 dokumentiert die Entwicklung des zur Simulation des Wasserstoff-Energiesystems verwendeten Modells. Anfangs wird die Modellierung des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle vorgestellt. Weiterhin werden Bewertungskriterien für Konzepte des Wasserstoff-Energiesystems ausgearbeitet und anschließend alternative Systemkonzepte präsentiert. Im letzten Abschnitt werden die für die Simulation der Konzepte gewählte Parameter und Randbedingungen hergeleitet.
- In Kapitel 4 wird einerseits eine Validierung der Komponentenmodelle anhand von in der Literatur dokumentierten Messwerten von Elektrolyse- und Brennstoffzellen vorgenommen. Weiterhin werden die Simulationsergebnisse präsentiert und darauf aufbauend eine Bewertung der Systemkonzepte nach den herausgearbeiteten Kriterien vorgenommen.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen vorgestellt, auf denen die Modellierung der Wasserstoffkomponenten aufbaut.

Im ersten Abschnitt wird dazu auf die Eigenschaften verschiedener Modellstrukturen eingegangen. Weiterhin wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Modellierung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen geliefert.

Im zweiten Abschnitt wird die Funktionsweise von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen erläutert. Darauf aufbauend wird auf die zur Modellierung genutzten physikalischen Grundlagen eingegangen.

2.1 Modellierung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen

Nach Tabeling [52, S. 32] ist ein Systemmodell eine Abstraktion zu einem System (im Sinne des Systemgebildes) welche nur eine Menge ausgewählter, gerade interessierender Sachverhalte des betrachteten Systems aufweist. Das Ziel der Modellierung ist daher nicht alle Eigenschaften des realen Systems möglichst exakt wiederzugeben sondern ausgewählte Eigenschaften ausreichend genau zu beschreiben.

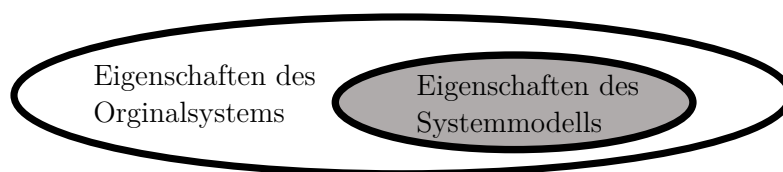


Abbildung 2.1: Überdeckung der Eigenschaften von System und Modell nach Tabeling [52].

Nach Sjöberg et al. [50] liegt die Schwierigkeit in der Modellierung in erster Linie in der Identifikation einer zur Anwendung geeigneten Modell Struktur. Üblicherweise werden dabei drei Gruppen unterschieden: White-, Grey- und Black-Box-Modelle. White-Box-Modelle erfordern ein umfassendes Verständnis des realen Systems und bauen vollständig auf physikalischem Vorwissen auf. Ziel ist eine exakte, auf physikalischen Gesetzen basierende Modellierung. Black-Box-Modelle hingegen nutzen kein Vorwissen, sondern verwenden aus Experimenten gewonnene Daten. Dabei schätzen sie das Systemverhalten als eine Kombination mehrerer

Eingangs- und dazu gehöriger Ausgangsgrößen ab [25]. Häufig liegen verwendete Modelle zwischen den beiden genannten Fällen, es handelt sich also meist um Grey-Box-Modelle. Dies lassen sich wiederum in zwei Untergruppen unterteilen: Bei physikalischen Grey-Box-Modellen wird physikalisches Vorwissen genutzt und mit experimentell gewonnenen Parametern ergänzt. Bei semiphysikalischen Grey-Box-Modellen wird Vorwissen über das Systemverhalten genutzt, um eine Modellstruktur für ein Modell mit Black-Box Charakter zu entwickeln. Sjöberg et al. [50] geben als Basisregel an, dass vorhandenes Wissen über das Systemverhalten bei der Modellierung genutzt werden sollte. Dies lässt sich darin begründen, dass experimentell gewonnene Datensätze nur Teilbereiche eines komplexen Systems beschreiben können und daher in ihrer Allgemeingültigkeit eingeschränkt sind. Als Nachteil der physikalischen Modellierung ist zu benennen, dass mit steigender Systemkomplexität die Entwicklungs- und Rechenzeit erheblich zunimmt [25]. In Tabelle 2.1 sind grundlegende Eigenschaften von White- und Black-Box-Modellen zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Eigenschaften verschiedener Modellstrukturen.

White-Box-Modell	hohes Maß an implementierter Systemkenntnis + großer Gültigkeitsbereich – lange Rechendauer und Entwicklungsdauer bei komplexen Systemen
Black-Box-Modell	große Menge an Eingangsdaten + geringer Entwicklungs- und Rechenaufwand bei komplexen Systemen – eingeschränkter Gültigkeitsbereich

2.1.1 Stand der Technik der Modellierung von Elektrolyseuren

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Aktuelle Forschungsergebnisse zur Modellierung von Elektrolyseuren geliefert:

Ulleberg [56] präsentiert ein semi-physikalisches Modell einer alkalischen Elektrolyse-Zelle zur Bestimmung der Polarisationskurve. Dabei wurden als Einflussparameter die Betriebstemperatur und der Druck berücksichtigt. Der Zusammenhang von elektrischer Leistung und produzierter Stoffmenge wird durch eine Kombination aus physikalischen Gesetzen und aus Messwerten gefolgerten Approximationen bestimmt. Amores et al. [3] ergänzen dieses Modell um weitere Einflussparameter um den Gültigkeitsbereich des Modells zu vergrößern. Die Parameter wurden dabei mithilfe eines Matlab Fitting-Codes aus experimentell gewonnenen Messwerten bestimmt.

Tjarks [53] stellt ein physikalisches Modell eines PEM-Elektrolyseurs für die Untersuchung von Power-to-Gas Anwendungen vor. Dabei werden physikalische Gesetze verwendet, um Verlustmechanismen zu beschreiben. Weiterhin wird das Zellverhalten mit Fitting Parametern den Messwerten einer Versuchsreihe angenähert. Eine Besonderheit des Modells ist die Berücksichtigung des Thermomanagements des Elektrolyseurs zur Berechnung der benötigten Heiz- beziehungsweise Kühlleistung. Zudem werden zum Betrieb des Elektrolyseurs benötigte Systemkomponenten in der Modellierung berücksichtigt.

Rodríguez und Amores [45] modellieren neben den elektrochemischen Vorgängen in einem Elektrolyseur auch die Strömungsvorgänge, die den Stofftransport beschreibenden. Dabei werden die Vorgänge der Blasenbildung und Strömung von Gasen mithilfe einer CFD-Simulation berücksichtigt. Die Abweichungen der Simulationsergebnisse von Messwerten einer Einzelzelle liegt unter 1%, wobei zu bedenken ist, dass die Methode eine genaue Kenntnis der Zellgeometrie, der Eigenschaften der verwendeten Materialien und weiterer Parameter erfordert.

Nach aktuellem Stand wird somit eine Anzahl verschiedener Modellierungsansätze genutzt, um das Verhalten von Elektrolysezellen vorherzusagen. Häufig werden physikalische Modelle verwendet, da diese einen Mittelweg zwischen der benötigten Datenmenge und dem Entwicklungsaufwand darstellen. Der Detaillierungsgrad variiert dabei abhängig vom Untersuchungsfokus. Nachteile aktueller Modelle sind die Beschränkung auf eine Elektrolyse-Technologie.

2.1.2 Stand der Technik der Modellierung von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen weisen hinsichtlich der Modellierung große Ähnlichkeiten zu Elektrolysezellen auf. Beispielsweise implementieren Motapon et al. [36] oder Chugh et al. [10] die gleichen physikalischen Gesetze in einem Modelle für Brennstoffzellen die von Tjarks [53] in dem Elektrolyseur-Modell implementiert sind.

Barragan et al. [4] präsentieren ein Black-Box Modell zur Echtzeitregelung von Brennstoffzellen. Das Modell basiert auf der Fuzzy Methode, welche aus Paaren von Eingangs- und Ausgangsdaten Merkmale ableitet. Abhängig davon, in welchem Maß die Eingangswerte die Merkmale erfüllen, werden Ausgangsdaten der Versuchsreihen überlagert, um die Ausgangswerte abzuschätzen. Kombiniert wird die Fuzzy Methode mit einem Kalman Filter. Dieser rekursive Filter, schätzt das Datenrauschen auf Grundlage von Messwerten ab und ermöglicht es, die Ausgabe iterativ zu bestimmen. Das Modell ist besonders vorteilhaft für die Langzeit-Regelung von Brennstoffzellen, weil laufend Input-Output Daten in die Modellierung einfließen.

Jiao und Ni [27] untersuchen den aktuellen Stand der physikalischen PEM-Brennstoffzellen Modellierung und arbeitet Schwächen der aktuellen Modellierungsansätze aus. Das Wassermanagement der Zelle wird als wichtiges Forschungsfeld angeführt, da die Membran zur höheren Leitfähigkeit ausreichend befeuchtet sein muss. Es werden numerische Modelle vorgestellt, die entwickelt wurden, um Verdampfungsvorgänge sowie die Mehr-Phasen-Strömung in den Kanalstrukturen zu beschreiben. Als Nachteil stellt sich dabei die hohe benötigte Rechenleistung heraus. Weiterhin bleibt die Eisbildung, welche besonders im Falle eines Kaltstarts auftritt und die Katalysator-Flächen bedecken kann, in den Verfahren unberücksichtigt.

Wie auch bei der Modellierung von Elektrolysezellen, existieren somit nach aktuellem Stand eine Anzahl verschiedener Modellierungsansätze für Brennstoffzellen. Meist beschränken sich die Modelle auf die Modellierung der elektrischen Ausgangsleistung zur Nutzung in für mobilen Anwendungen. Ein weiterer Nachteil aktueller Modelle ist die Beachtung von nur einer Elektrolyse-Technologie.

2.2 Grundlagen der Wasserelektrolyse

Im folgenden Abschnitt werden anfangs die elektrochemischen Grundlagen der Elektrolyse von Wasser vorgestellt sowie deren thermodynamische Zusammenhänge geschildert. Zudem wird die ideale Zellspannung hergeleitet und wesentliche Verlustmechanismen sowie deren Einfluss auf den Betriebsbereich von Elektrolyseuren beschrieben. Weiterhin werden drei technische Lösungen der Wasserelektrolyse vorgestellt, sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen aufgezeigt. Abschließend wird auf Komponenten eingegangen, die zum Betrieb von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen benötigt werden.

Als Elektrolyse bezeichnet man einen chemischen Prozess, bei dem eine Redoxreaktion durch elektrische Spannung erzwungen wird. Um eine kontrollierbare Durchführung der Reaktion sicherzustellen, ist eine räumliche und elektrische Trennung der Oxidation und Reduktion nötig [53]. Allerdings muss der Ionenaustausch zwischen Anode und Kathode möglich sein und dies wird durch ein Elektrolyt erreicht.

Bei der Wasserelektrolyse wird dieses Prinzip angewendet, um aus Wassermolekülen elementaren Wasserstoff und Sauerstoff zu gewinnen. Dabei liegt die folgende allgemeine Reaktionsgleichung vor:



Die allgemeine Reaktionsgleichung ist dabei unabhängig vom Elektrolyt, wohingegen sich die Oxidations- und Reduktions Gleichungen unterscheiden. Die Oxidation findet an der Anode statt und hat Sauerstoff als Produkt. An der Kathode wird durch die Reduktion Wasserstoff gebildet. Es gibt drei mögliche Ladungsträger bei der Wasserelektrolyse, welche in Abbildung 2.2 gezeigt werden: Hydroxidionen, Protonen oder Oxidionen [53]. Zu den verschiedenen Ladungsträgern werden im Unterkapitel 2.2.4 technische Verfahren erläutert.

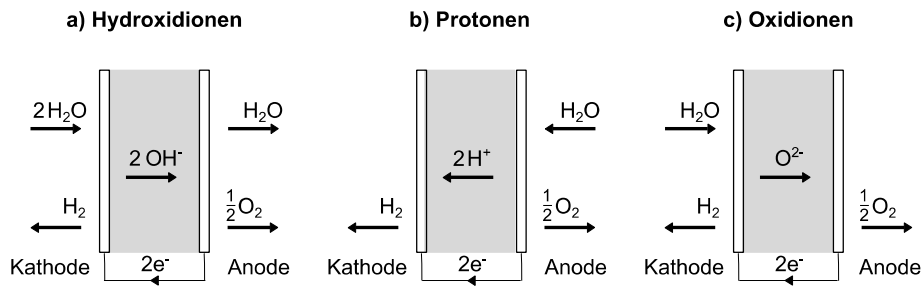


Abbildung 2.2: Ladungsträger bei der Wasserelektrolyse nach Tjarks [53].

2.2.1 Elektrochemische Betrachtung

Die benötigte Energie bei einer Redoxreaktion entspricht der Reaktionsenthalpie $\Delta_R H$ und lässt sich aus den Bildungsenthalpien ($\Delta_f H_i$) und stöchiometrischen Koeffizienten (ν_i) der Edukte und Produkte bestimmen [19, 8]:

$$\Delta_R H = \sum \nu_i \cdot \Delta_f H_i \quad (2.2)$$

Unter der Annahme, dass die nötige thermische Energie vorliegt, entspricht die zur Reaktion benötigte elektrische Energie der freien Reaktionsenthalpie $\Delta_R G$, welche sich über die Reaktionsentropie $\Delta_R S$ errechnen lässt [19, 8].

$$\Delta_R G = \Delta_R H - T \cdot \Delta_R S \quad (2.3)$$

$$\Delta_R S = \sum \nu_i S_i \quad (2.4)$$

Für die Wasserelektrolyse (2.1) bei Standardbedingungen ($T_0 = 25^\circ\text{C}$ und $p_0 = 101,325\text{ kPa}$) ergibt sich mit den Daten aus Tabelle 2.2 die Reaktionsenthalpie zu $\Delta_R H^0 = 285,25\text{ kJ/mol}$ und die freie Enthalpie zu $\Delta_R G^0 = 236,59\text{ kJ/mol}$. Es liegt dabei eine starke Temperaturabhängigkeit vor, was in Abbildung 2.3 deutlich wird.

Tabelle 2.2: Standardbildungsenthalpien und Standardentropien für 25 °C [29] sowie stöchiometrische Koeffizienten aus Gleichung 2.1.

Komponenten i	$\Delta_f H_i^0$ [kJ/mol]	S_i^0 [J/(molK)]	ν_i [—]
H ₂ O	-285,25	-216.35	-1
O ₂	0	21,78	1/2
H ₂	0	19,88	1

Reversible Zellspannung Mit der Faraday Konstante ($F = 96\,485,3\text{ C/mol}$) und der Anzahl der pro Reaktion transferierten Elektronen ($z = 2$) lässt sich die thermoneutrale Spannung bei Standardbedingungen U_{tn}^0 sowie die reversible Zellspannung bei Standardbedingungen U_{rev}^0 errechnen [19].

$$U_{tn}^0 = \frac{\Delta H_R^0}{zF} = 1,478\text{ V} \quad (2.5)$$

$$U_{rev}^0 = \frac{\Delta G_R^0}{zF} = 1,226\text{ V} \quad (2.6)$$

Der im vorherigen Abschnitt erläuterte Temperatureinfluss auf die Reaktionsbedingungen wirkt sich auch auf die reversible und thermoneutrale Spannungen aus (Abbildung 2.3). Häufig wird dieser Zusammenhang durch Gleichung 2.8 abgebildet [38]. Weiterhin liegt für die Zellspannung eine Abhängigkeit von den Produkt- und Edukt Aktivitäten vor, welche durch die Nernst Gleichung beschrieben werden kann. Drückt man die Aktivität der Produktgase über das Verhältnis des Partialdrucks zum Standarddruck p_0 aus, ergibt sich der in Gleichung 2.9 angeführte Zusammenhang.

$$U_{rev} = U_{rev}^0 + \Delta U_{rev}(p) + \Delta U_{rev}(T) \quad (2.7)$$

$$\Delta U_{rev}(T) = -8,5 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 298) \quad (2.8)$$

$$\Delta U_{rev}(p) = \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{p_{H_2}/p_0 \sqrt{p_{O_2}/p_0}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.9)$$

Überspannungen

Die reale Zellspannung U_{real} ist im Betrieb aufgrund von Verlusten immer größer als die reversiblen Zellspannung. Ist die reale Zellspannung niedriger, als die thermoneutrale Span-

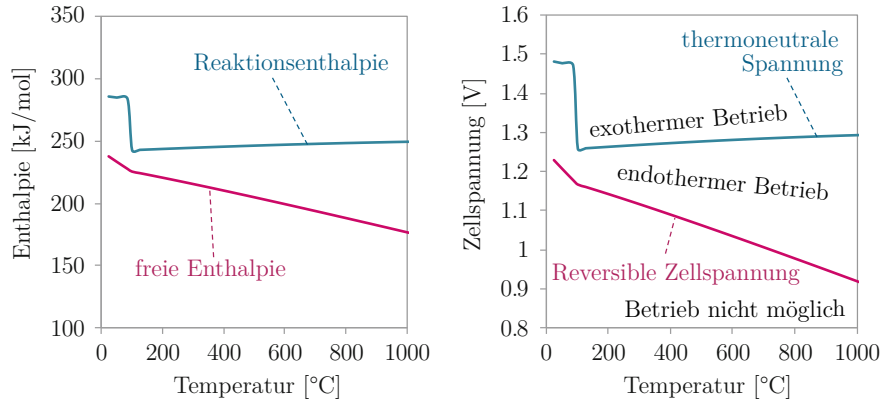


Abbildung 2.3: Abhängigkeit der Reaktionsenthalpie und der freien Enthalpie von der Temperatur nach Tremel [54].

nung, läuft das System endotherm ab. In dem Fall muss dem System Wärmeenergie zugeführt werden.

Als maßgeblichen Verluste, auch Überspannungen genannt, werden üblicherweise drei Phänomene betrachtet: Aktivierungsverluste (U_{Akt}), Ohmsche Verluste (U_{Ohm}) und Konzentrationsüberspannung [19]. In dieser Arbeit werden die Konzentrationsüberspannungen als vernachlässigbar klein angenommen, da sie erst außerhalb der üblichen Betriebsgrenzen von signifikanter Größenordnung sind. Ein weiteres Phänomen sind Diffusionsströme von Wasserstoff auf die Anodenseite und von Sauerstoff auf die Kathodenseite, allerdings sind diese aus Sicherheitsaspekten gering zu halten, was in 2.2.3 näher erläutert wird. Daher werden Diffusionsströme in dieser Arbeit vernachlässigt. Somit wird die reale Zellspannung wie folgt berechnet:

$$U_{real} = U_{rev} + U_{Akt} + U_{Ohm} \quad (2.10)$$

Aktivierungsverluste kommen durch die elektrochemischen Vorgänge an den Oberflächen der Elektroden und ihrer Kinetik zustande. Dabei treten zwei Phänomene auf: Einerseits chemische (wegen des chemischen Gleichgewichtszustands der Ionen an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt) und andererseits elektrische (aufgrund des Ladungstransports durch das elektrische Feld an der Grenzfläche) [51]. Aktivierungsverluste lassen sich mithilfe der Butler-Volmer-Gleichung beschreiben [38, 51]. Zur Modellierung kann für ausreichend hohe Stromdichten vereinfachend die Tafel-Gleichung angewendet werden, Abdin et al. [2] nutzen sie in der folgenden Form:

$$U_{Akt} = \frac{RT}{2 \cdot \alpha \cdot F} \cdot \ln(i/i_0) \quad (2.11)$$

Der Durchtrittsfaktor α und die Austauschstromdichte i_0 sind dabei experimentell zu ermitteln und unterscheiden sich je nach Bauart.

Ohmsche Verluste werden durch elektrische sowie ionische Widerstände und Kontaktwiderständen zwischen den Komponenten verursacht. Ionischen Widerstände, welche sich in dem Elektrolyt und an den Elektrodenoberflächen lokalisieren lassen, dominieren üblicherweise die Ohmschen Verluste [51, 33]. Elektrische Widerstände treten in den Elektroden und an den Kontakten der Zelle auf und lassen sich somit durch einen günstigen Aufbau der Zelle vermindern [53]. Die ohmschen Verluste können mithilfe des Ohmschen-Gesetzes (Gleichung 2.12) bestimmt werden, für welches neben dem Elektrodenabstand auch die Leitfähigkeit des Elektrolyts benötigt wird.

Olivier et al. [38] geben eine Gleichung zur Berechnung der Leitfähigkeit alkalischer Zellen an, dabei sind die Einflussfaktoren die Betriebstemperatur (T) sowie die Stoffmengenkonzentration (m) der Lauge des Elektrolyts. Die Berechnung der Leitfähigkeit für Festoxid (SO) Zellen ist Hajimolana et al. [23] entnommen. Der Ansatz für PEM-Zellen wird in der Literatur häufig verwendet [19, 38] und beachtet neben der Betriebstemperatur (T) auch den Feuchtegehalt der Membran (λ). Tjarks [53] erweitert die Berechnung des ohmschen Widerstandes nach Gleichung 2.13 um einen Parameter zur Berücksichtigung elektrischer Widerstände R_{el} .

$$U_{Ohm} = i \cdot (\delta/\sigma) \quad (2.12)$$

$$U_{Ohm,PEM} = i \cdot (\delta/\sigma + R_{el}) \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Alk} = & -2.04m - 0.0028m^2 + 0.005332mT \\ & + 207.2m/T + 0.001043m^3 - 3 \cdot 10^{-3}m^2T^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{SO} = 3.34 \cdot 10^4 + \exp(-10300/T) \quad (2.15)$$

$$\sigma_{PEM} = (0.005139 \cdot \lambda - 0.00326) \cdot \exp(1268 \cdot (1/303 - 1/T)) \quad (2.16)$$

2.2.2 Thermisches Verhalten

Zur Bestimmung des Wärmeflusses wird nach Webster und Bode [58] die Energiebilanz einer Elektrolysezelle betrachtet:

$$C_{Zelle} \frac{dT}{dt} = \dot{n}(h_{ein} - h_{aus}) + P_{el} - \dot{Q} \quad (2.17)$$

Die Enthalpiedifferenz ergibt sich aus der Reaktionsenthalpie und der Temperaturdifferenz zwischen Eingang und Ausgang. Die benötigte Reaktionsenthalpie und die elektrische Leistung drückt Webster und Bode [58] über die Thermoneutrale Spannung und die Zellspannung aus. Unter der Annahme, dass die Ausgangstemperatur der Gase gleich der Betriebstemperatur ist, ergibt sich für die Energiebilanz damit:

$$\begin{aligned} C_{Zelle} \frac{dT}{dt} = & -(\dot{n}_{H_2,ein} \cdot c_{p,H_2} + \dot{n}_{H_2,ein} \cdot c_{p,O_2}) \cdot (T_{ein} - T) \\ & - I \cdot (U_{Zell} - U_{tn}) - \dot{Q} \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.2.3 Polarisationskurve und Betriebsbereiche von Elektrolyseuren

Die Polarisationskurve gibt die Abhängigkeit der realen Zellspannung U_{real} eines Elektrolyseurs von der Stromdichte graphisch wieder. Diese wird von vielen Faktoren, wie beispielsweise den Elektrodenmaterialien, der Geometrie der einzelnen Bauteile oder den Betriebsbedingungen wie Druck und Temperatur, beeinflusst. Grundlage für die Berechnung der Polarisationskurve ist die in 2.2.1 hergeleitete reversible Zellspannung und Gleichung 2.10. In Abbildung 2.4 werden die Polarisationskurven der in 2.2.4 erläuterten technischen Verfahren verglichen.

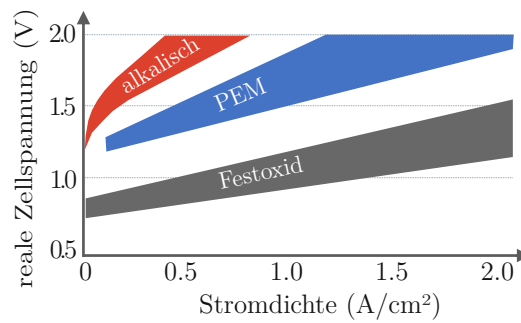


Abbildung 2.4: Mögliche Bereiche der Polarisationskurven der in 2.2.4 erläuterten technischen Verfahren nach Tremel [54].

Des weiteren lässt sich die Polarisationskurve auch zur Identifikation sinnvoller Betriebsbereiche nutzen:

Die elektrische Leistung einer Zelle (P_{el}) lässt sich aus der Stromdichte (i), der aktiven Fläche

(A_{zelle}) und der realen Zellspannung errechnen. Das Faradaysche Gesetz liefert einen direkten Zusammenhang zwischen dem Elektronenfluss und dem Stoffmengenstrom des produzierten Wasserstoffs (\dot{n}_{H_2O}).

$$P_{el}(i) = U_{real}(i) \cdot i A_{zelle} \quad (2.19)$$

$$\dot{n}_{H_2O} = \frac{i A_{zelle}}{zF} \quad (2.20)$$

Der Wirkungsgrad (η) einer Zelle, bezogen auf den unteren Heizwert (H_u) von Wasserstoff wird damit durch folgenden Ausdruck beschrieben:

$$\eta = \frac{H_u \cdot \dot{n}_{H_2O}}{P_{el}} = \frac{H_u}{U_{real}(i) \cdot zF} \quad (2.21)$$

Somit zeigt sich, dass es zur Steigerung der Effizienz erstrebenswert ist, den Elektrolyseur bei einer niedrigen Spannungen zu betreiben [5]. Aus Abbildung 2.4 wird ersichtlich, dass dies bei einer niedrigen Stromdichte der Fall ist. Allerdings bleibt zu bedenken, dass dadurch auch der Produktgas Strom verringert wird. Daher ist bei der Auslegung ein Kompromiss zwischen Wirkungsgrad und einer größeren aktive Zellfläche - und damit verbunden höheren Investitionskosten und größerem Bauraum - zu finden.

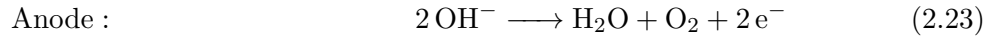
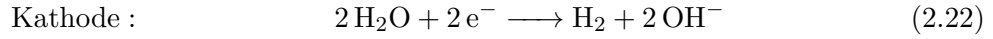
Weiterhin stellt die Gasreinheit der Produktströme eine untere Betriebsgrenze für die Stromdichte dar. Aufgrund der Diffusion der Produktgase zur gegenüberliegenden Elektrode kommt es zu einer Mischung von Sauerstoff und Wasserstoff. Um die Zerstörung des Systems durch Explosionen zu verhindern, geben Brauns und Turek [8] an, dass meist bei einer Verunreinigung über 2 Volumen-% ein Notstopp des gesamten Elektrolyseur-Systems eingeleitet wird. Daher werden Grenzwerte für den maximalen Betriebsdruck und die minimale Stromdichte empfohlen, weil diese beiden Größen die Gasreinheit signifikant beeinflussen.

2.2.4 Technologien der Wasserelektrolyse

Im Folgenden werden die drei maßgeblichen Verfahren zur Wasserelektrolyse näher erläutert und verglichen.

Alkalischer Elektrolyseur Die alkalische Elektrolyse ist eine ausgereifte Technik und der derzeitige Standard für groß dimensionierte Elektrolyseure [54]. Anlagen mit einer Eingangsleistung von bis zu 130 MW sind derzeit im Betrieb und die minimale Teillast liegt nach Guandalini et al. [22] bei ungefähr 20 %. Als Elektrolyt dient üblicherweise zwischen 25 und 30 prozentige Natron- (NaOH) oder Kalilauge (KOH) [54]. Die Konzentration beeinflusst dabei maßgeblich die Leitfähigkeit der Lösung. Als Ladungsträger in der Lösung fungie-

ren Hydroxidionen. Es werden metallische Elektroden verwendet, welche zur Steigerung der Aktivität mit Edelmetallen beschichtet werden können. Folgende Reaktionen laufen an der Kathode und Anode ab:

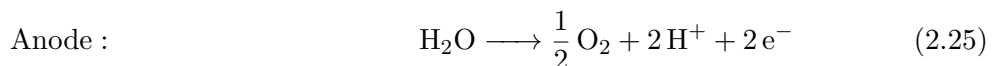
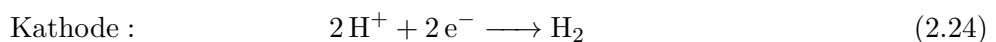


Um die produzierten Gase voneinander getrennt zu halten, wird zwischen Anode und Kathode ein Diaphragma positioniert. Dies hat neben Performance- auch Sicherheitsgründe, da elementarer Wasserstoff hochentzündlich ist. Aus diesem Grund sind Elektrolyseure auch in ihrer Dynamik eingeschränkt: Bevor das System abgeschaltet werden kann, müssen die Gasleitungen mit Inertgas gefüllt werden, um die Bildung einer explosiven Wasserstoff-Sauerstoff Mischung zu verhindern. Dies hat auch einen Einfluss auf den Anlaufvorgang des Systems, da die Gasqualität durch die anfangs vorliegenden Inertgase vermindert wird. Nach Milanzi et al. [32] kann das dynamische Verhalten von Elektrolyseuren erheblich verbessert werden, wenn sie während Standzeiten im Standby betrieben werden.

Ein weiterer Nachteil aktueller technischer Anlagen der alkalischen Elektrolyse ist, dass die maximale Stromdichte verglichen mit anderen Elektrolyseuren niedrig ausfällt (Tremel [54] gibt Stromdichten von $0,2 - 0,5 \text{ A/cm}^2$ an).

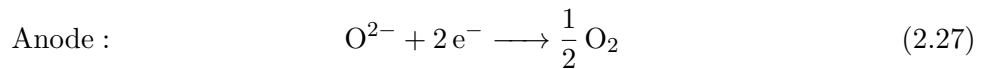
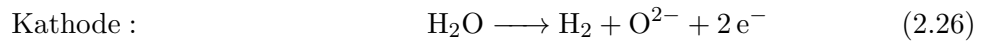
Protonen Austausch Membran (PEM) Elektrolyseur PEM-Elektrolyseure werden seit 1950 entwickelt und derzeit im 1 MW Bereich vertrieben. Ein Vorteil der Technologie sind die hohen erreichbaren Stromdichten von bis zu 2 A/cm^2 . Zudem können PEM-Elektrolyseure sehr dynamisch betrieben werden und ein Betrieb bei bis zu 10% minimaler Teillast ist möglich [54].

Als Ladungsträger fungieren Protonen und als Elektrolyt dient eine in destilliertem Wasser positionierte Protonen-Austausch-Membran (**P**roton **E**xchange **M**embran). Die Protonenleitfähigkeit der Polymer-Membran wird durch Sulfonsäure-bindende Seitengruppen, sogenannte Idomere, erreicht [53]. Für die Dicke der Membran muss dabei ein Kompromiss zwischen Langlebigkeit und Durchlässigkeit gefunden werden [19]. Der Säuregehalt des Elektrolyts und die damit verbundene Anforderung an die Korrosionsbeständigkeit, so wie das Erstreben hoher Reaktionsgeschwindigkeiten führt zu hohen Kosten bei den Elektrodenmaterialien: Die Kathode besteht meist aus mit Platin beschichtetem Kohlenstoff, als Anode werden häufig als Oxid vorliegendes Iridium oder Ruthenium verwendet. Folgende Reaktionen laufen an der Kathode und Anode ab:



Festoxid-Elektrolyseur Feststoffoxid(SO) Elektrolyseure sind seit 1980 in Entwicklung [54]. Sie haben den Vorteil, dass sie bei Temperaturen von 700–1000 °C betrieben werden, wodurch dampfförmiges Wasser zerlegt wird, wohingegen bei alkalischen und PEM-Elektrolyseuren flüssiges Wasser vorliegt. Daraus resultiert, dass Reaktionsenthalpie und dadurch auch die reale Zellspannung niedriger ausfällt. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass bei hohen Temperaturen die ohmschen Verluste sinken, wodurch niedrigere Überspannungen entstehen [54]. Zudem steigt mit der Temperatur auch die Reaktionsgeschwindigkeit, weshalb keine teuren Katalysator-Materialien verwendet werden müssen [60].

Ein Nachteil der gesteigerten Betriebstemperatur sind die höheren Ansprüche an die Temperaturbeständigkeit der Elektroden und des Elektrolyts. Als Elektrolyt wird meist Zirkoniumdioxid (ZrO_2) verwendet, welches zur Steigerung der Leitfähigkeit mit Yttriumoxid (Y_2O_3) stabilisiert wird [9]. Das Elektrolyt wird zwischen zwei porösen Elektroden (Beispielsweise eine Nickeloxid Anode und eine LSCF-Kathode [49]) positioniert, was den Austausch der Oxidionen ermöglicht. Es existieren SO-Elektrolyseure, welche auf dem Transport von Protonen basieren, allerdings wird aufgrund ihrer geringen Bedeutung in dieser Arbeit nicht weiter darauf eingegangen [51]. Folgende Reaktionsgleichungen liegen bei den betrachteten Festoxid-Elektrolyseuren vor:



Eine Herausforderung ist das Bereitstellen der benötigten Wärme zur Wasserdampferzeugung und zum Aufrechterhalten der Betriebstemperatur. Dazu werden verschiedene Möglichkeiten, wie beispielsweise die Kopplung mit Wärmepumpen oder Sonnenkollektoren in Betracht gezogen [51]. Weiterhin bleibt ein zu lösendes Problem der Leistungsverlust und der Abbau der Elektrodenmaterialien, was die Lebensdauer der Zellen signifikant einschränkt [60].

Abschließend sind in Tabelle 2.3 wichtige Kennwerte der drei Technologien sowie ihre Vor- und Nachteile aufgeführt.

2.2.5 Grundlagen von Brennstoffzellen

In Brennstoffzellen wird der Umkehrprozess der Elektrolyse betrieben. Die chemische Reaktionsenergie eines Kraftstoffes wird in elektrische Energie umgewandelt. Bei Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen läuft die Reaktion 2.1 rückwärts ab, es wird aus Wasserstoff und Sauerstoff Wasser gebildet. Der Aufbau von Brennstoffzellen gleicht dem von Elektrolyseuren: Es werden zwei Elektroden, ein Elektrolyt sowie gegebenenfalls ein Diaphragma zur Gastrennung verwendet. Daher werden einige Zellen sowohl als Brennstoffzelle als auch

Tabelle 2.3: Vergleich der gängigen Technologien zur Wasserelektrolyse nach Milanzi et al. [32], Tremel [54] und Rashid et al. [41].

	alkalisch	PEM	Festoxid
Temperatur	40 – 90 °C	20 – 100 °C	700 – 1000 °C
min. Teillast	20%	10%	30%
max. Stromdichte	0,2 – 0,5 A/cm ²	2 A/cm ²	1 A/cm ²
max. Lastgradient	33 %/s	100 %/s	
Vorteile	geringer Preis Technologiereife Lebensdauer	Kompaktheit Betriebsbereich Lastgradient Gasreinheit	Wirkungsgrad günstiger Katalysator hoher Betriebsdruck
Nachteile	geringe Gasreinheit korrosives Elektrolyt geringer Betriebsdruck	hohe Kosten saures Elektrolyt lange Anfahrzeit	Technologiereife Lebensdauer

als Elektrolyseur eingesetzt [60]. Ein Vorteil der Brennstoffzelle ist dabei, dass sowohl reiner Sauerstoff als auch Umgebungsluft zur Kombination mit Wasserstoff verwendet werden kann [37, 27].

Die in 2.2.1 genannten elektrochemischen Grundlagen lassen sich auf die Brennstoffzelle übertragen: Die reversible Zellspannung U_{rev} entspricht der maximalen Ausgangsspannung der Brennstoffzelle. Weil $U_{rev} < U_{th}$ wird stets weniger elektrische Energie abgeführt, als chemische Energie zugeführt wird, es liegt also eine exotherme Reaktion vor. Da die in 2.2.1 beschriebenen Verlustmechanismen durch Diffusionsvorgänge und ohmsche Widerstände hervorgerufen werden, treten sie auch bei Brennstoffzellen auf [10]. Allerdings werden die Verlustterme von der reversiblen Zellspannung subtrahiert:

$$U_{real} = U_{rev} - U_{Akt} - U_{Ohm} - U_{Diff} \quad (2.28)$$

Wie auch bei Elektrolyseuren existieren für die Umsetzung von reinem Wasserstoff alkalische, PEM und Festoxid Brennstoffzellen [30]. Auf weitere Technologien, welche Methan, Erdgas oder vergaste Kohle als Energieträger verwenden wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Während die elektrochemischen Grundlagen der Brennstoffzelle bereits im 19. Jahrhundert entdeckt wurden, entwickelte die NASA gegen Ende der 1950er die ersten alkalischen und PEM Brennstoffzellen für Raumfahrtanwendungen. Auffällig ist, dass im Gegensatz zur Elektrolyse, bei der heutzutage bei großen Anlagen alkalische Elektrolyseure der Stand der Technik sind (2.2.4), bei den Brennstoffzellen die PEM-Technologie deutlich verbreiteter ist. So

gibt Lucia [30] an, dass 2010 der Marktanteil der PEM-Technologie bei Brennstoffzellen bei 97% lag. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass Brennstoffzellen vorwiegend bei mobilen Anwendungen eingesetzt werden - nach Lucia [30] ist dies bei 95% aller verkauften Brennstoffzellen der Fall. Die Vorteile von Brennstoffzellen sind dabei die geringen Geräusch- und Schadstoffemissionen [37]. Für mobile Anwendungen eignen sich insbesondere PEM-Brennstoffzellen, da diese bei einer höheren maximalen Stromdichte betrieben werden können als alkalische und Festoxid-Zellen. Das wiederum bringt Vorteile im Bezug auf den benötigten Bauraum und das Gewicht mit sich.

Eine weiteres Anwendungsgebiet von Brennstoffzellen ist aufgrund des exothermen Betriebs die Kraft-Wärme-Kopplung. Olabi et al. [37] geben an, dass Brennstoffzellen höhere Gesamt-Wirkungsgrade erreichen als andere klein-skalierte Systeme zur Kraft-Wärme-Kopplung. Dabei ist zu beachten, dass die Qualität der Abwärme insbesondere von der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle abhängt, was nach Tabelle 2.4 für den Einsatz von Festoxid-Brennstoffzellen spricht.

In Tabelle 2.4 werden wichtige Kennwerte der drei Technologien sowie ihre Vor- und Nachteile angegeben.

Tabelle 2.4: Vergleich der gängigen Technologien Wasserstoff-basierter Brennstoffzellen nach Mekhilef et al. [31].

	alkalisch	PEM	Festoxid
Temperatur	90 – 100 °C	50 – 100 °C	600 – 1000 °C
el. Wirkungsgrad	60%	53-58%	35-43%
ges. Wirkungsgrad	80%	70-90%	80%
Vorteile	Preis Technologiereife	Kompaktheit Lebensdauer kurze Anfahrzeit	günstiger Katalysator Effizienz
Nachteile	Empfindlich bei CO ₂ korrosives Elektrolyt geringer Betriebsdruck	saures Elektrolyt	Technologiereife Lebensdauer lange Anfahrzeit

2.2.6 Benötigte Systemkomponenten

Die zum Betrieb von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen benötigt Komponenten werden in dem folgenden Abschnitt erläutert, da sie einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems haben. Abbildungen 2.5 sowie 2.6 liefern dazu einen Überblick.

Im Falle der Elektrolyse wird die Leistungselektronik benötigt, um zwei Aufgaben zu erfüllen: Erstens die Anpassung der Versorgungsleistung auf die elektrischen Anforderungen

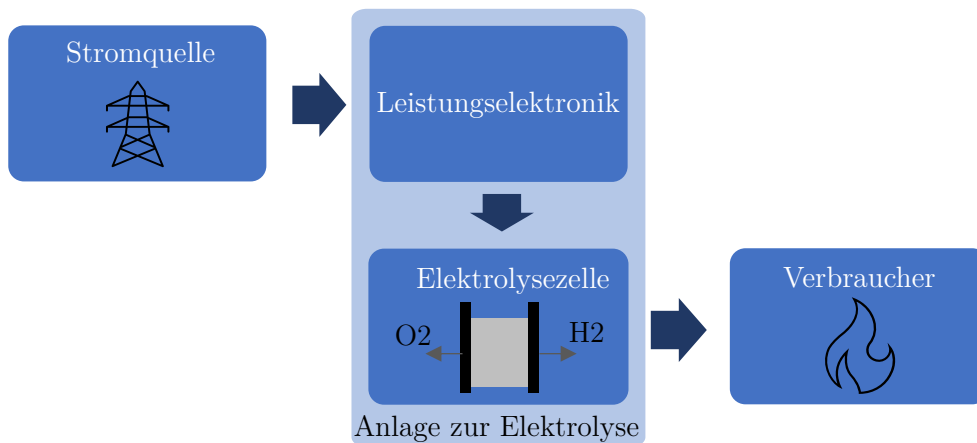


Abbildung 2.5: Übersicht der benötigten Systemkomponenten zum Betrieb eines Elektrolyseurs [53].

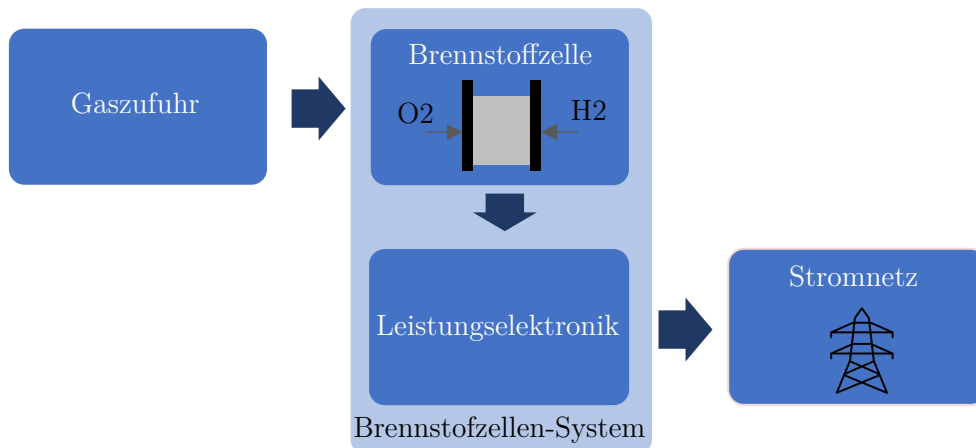


Abbildung 2.6: Übersicht der benötigten Systemkomponenten zum Betrieb einer Brennstoffzelle.

des Elektrolyseurs und zweitens die Wandlung der Wechselspannung zu Gleichspannung [53]. Stand der Technik sind Thyristor-basierte Gleichrichter, welche sich durch geringe Verluste auszeichnen. Als Nachteil dieser Technik ist allerdings zu nennen, dass die Schaltfrequenz an die Netzfrequenz gekoppelt ist, was die Restwelligkeit der Ausgangsgrößen erhöht. Transistor-basierte Gleichrichter versprechen im Bereich der Restwelligkeit wesentliche Verbesserungen und durch aktuelle Entwicklungen konnten die auftretenden Schaltverluste signifikant verringert werden [53].

Im Falle der Brennstoffzelle wird die Leistungselektronik benötigt, um die erzeugte Gleichspannung zu Wechselspannung zu transformieren und den elektrischen Anforderungen des Netzes anzupassen. Nach Engler et al. [18] haben sich im Bereich der Wechselrichter Transistor-

basierte Systeme etabliert. Häufig werden Niederfrequenz Transformatoren verwendet, welche sich durch eine hohe Zuverlässigkeit auszeichnen, allerdings Nachteile bei dem Gewicht und der Baugröße aufweisen. Ein Entwicklungsfeld sind daher Hochfrequenztransformatoren, die ein geringeres Gewicht und einen kleineren Bauraum ermöglichen.

3 Modellierung des Wasserstoff-Energiesystems

Das folgende Kapitel dokumentiert die Entwicklung des zur Simulation des Wasserstoff-Energiesystems verwendeten Modells. Dazu wird Anfangs die Modellierung des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle vorgestellt. Weiterhin werden Bewertungskriterien für Konzepte des Wasserstoff-Energiesystems ausgearbeitet und anschließend alternative Systemkonzepte präsentiert. Im letzten Abschnitt werden die für die Simulation der Konzepte gewählte Parameter und Randbedingungen hergeleitet.

3.1 Implementierung der Wasserstoffkomponenten in Modelica

Ziel dieser Arbeit ist ein Modell, welches in der Lage ist das Verhalten des gesamten Elektrolyse-Systems vorherzusagen. Dazu werden zusätzlich zur Elektrolyse-Zelle die relevanten Systemkomponenten in der Modellierung berücksichtigt. Als Eingangsgrößen werden dabei neben Kennwerten aus Datenblättern Literaturangaben verwendet, um die Modellierung verschiedener Anlagen der vorgestellten Technologien zu erleichtern. Der Fokus liegt dabei auf der Modellierung von alkalischen- und PEM-Zellen, da sie, wie in 2.2.4 sowie 2.2.5, erläutert der aktuelle Standard sind. Der Detaillierungsgrad ist so gewählt, dass die Genauigkeit der Ergebnisse einerseits eine stichhaltige Bewertung der Konzepte des Wasserstoff-Energiesystems ermöglicht und andererseits die Rechendauer in einem akzeptablen Bereich liegt. Weiterhin ist eine Betrachtung des Wärmehaushalts für die Brennstoffzelle zur Modellierung der Kraft-Wärme-Kopplung implementiert.

Modelica ist eine objektorientierte Modellierungssprache, mit deren Hilfe Systeme durch gewöhnliche Differentialgleichungen in Kombination mit diskreten Vorfällen beschrieben werden. Nach Schamai [47] ist Modelica daher ideal für die Modellierung von physikalischen Systemen mit Energieaustausch und weiteren zeitkontinuierlichen Vorgängen geeignet. Das Modell wurde in Modelica 4.0.0 in der Entwicklungsumgebung Dymola 2021x entwickelt.

3.1.1 Modellierung der Zelle

Als Modellarchitektur wird ein Aufbau mit einem partiellen Modell gewählt (Abbildung 3.2), da die Beschreibung der idealen Zellspannung und die Approximationen der Verlustmechanismen für Elektrolyseur und Brennstoffzelle identisch sind. Im partiellen Modell sind daher

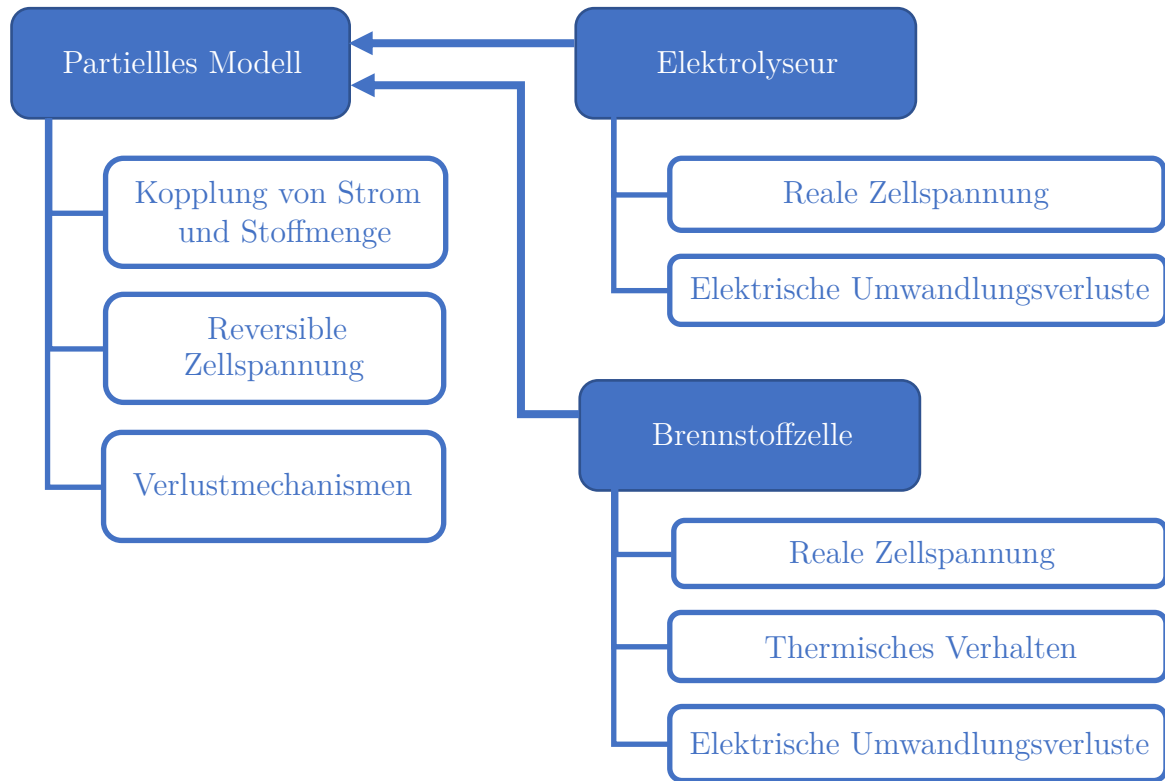


Abbildung 3.1: Struktur des entwickelten Modells.

daher folgende Zusammenhänge implementiert: Erstens der Zusammenhang von Strom und produzierter Stoffmenge (Gleichung 2.20), zweitens die Gleichungen zur Berechnung der idealen Zellspannung (Gleichung 2.7 sowie der Temperatur- und Druckeinfluss) und drittens die Berechnung der Aktivierungsverluste (Gleichung 2.11) und Ohmschen Überspannungen (für PEM-Zellen Gleichung 2.13, sonst 2.12). Die Technologie der Zelle wird im Modell über den ausgewählt, der die Zustände "*alk*" (für die alkalische Bauart), "*pem*" (Bei Verwendung einer Protonen Austausch Membran) oder "*so*" (für Festoxid-Zellen) annehmen kann. Für die Bauarten sind im Modell verschiedene Werte für die Parametern i_0 , α , δ und σ hinterlegt. Abhängig vom "*Bauart*" Parameter werden diese zur Berechnung der Verluste genutzt.

Die Modelle für Elektrolyseur und Brennstoffzelle enthalten die Gleichungen zur Berechnung der realen Zellspannung (Gleichung 2.10 beziehungsweise 2.28) sowie die Approximationen der in 2.2.6 erläuterten Umwandlungsverluste. Diese werden im Modell als über den Be-

triebsbereich konstant angenommen. Das erweist sich unter Beachtung des von Tjarks [53, S. 50] angeführten Verlaufs des Wirkungsgrades eines Gleichrichters insbesondere im oberen Lastbereich als akzeptable Näherung. Auch auf den von Trubitsyn et al. [55] untersuchten Wechselrichter trifft diese Aussage zu.

Das Brennstoffzellenmodell enthält darüber hinaus die Berechnung der zur Verfügung stehenden Abwärme:

Die Anfahrzeit von Elektrolysezellen liegt aus dem Stand-by nach Milanzi et al. [32] bei 10 – 30 s, was im Vergleich zu den für die Simulation verwendeten Zeitschritten (900 s) als vernachlässigbar angenommen wird. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit dynamische Vorgänge, die insbesondere durch die Betriebstemperatur der Zelle beeinflusst werden [20], nicht betrachtet.

Zur Modellierung des thermischen Verhaltens wird somit vereinfachend angenommen, dass die Betriebstemperatur stets konstant ist. Daher wird die Energiebilanz 2.18 wie folgt vereinfacht:

$$0 = (\dot{n}_{H_2} \cdot c_{p,H_2} + \dot{n}_{Luft} \cdot c_{p,Luft}) \cdot (T_{Umgebung} - T) + I \cdot (U_{tn} - U_{Zell}) - \dot{Q} \quad (3.1)$$

Der Wärmestrom \dot{Q} setzt sich aus den Wärmeverlusten $\dot{Q}_{Verlust}$ und der nutzbaren Abwärme \dot{Q}_{Nutz} zusammen. Die Wärmeverluste werden über den Wärmeverlustfaktor C_{th} bestimmt:

$$\dot{Q}_{Verlust} = C_{th} \cdot (T - T_{Umgebung}) \quad (3.2)$$

Die zur Deckung des Heizwärmebedarfs genutzte Abwärme der Brennstoffzelle, wird im Modell in Gaseinsparungen umgerechnet. Angenommen wird dafür, dass der Wirkungsgrad der Gasheizung bei 90 % liegt (Herrmann [26] gibt für Gasheizungen einen Bereich von 80 bis 110 % an).

3.2 Entwicklung von Energiesystem-Konzepten

Im folgenden Abschnitt werden anfangs die zur Bewertung der Systemkonzepte genutzten Parameter erläutert. Zudem werden die betrachteten Konzepte sowie die gewählte Betriebsstrategie erläutert.

3.2.1 Identifikation sinnvoller Bewertungskriterien

In Reich und Reppich [44] werden Kriterien zum Vergleich von Energiesystemen angeführt, die eine umfassende Bewertung ermöglichen. Als für ein Unternehmen relevante Kriterien werden in dieser Arbeit Kennwerte zur ökonomische sowie ökologische Bewertung der Konzepte genutzt.

Zur ökonomischen Bewertung wird der Kapitalwert - eine Kennzahl der Dynamischen Investitionsrechnung [35] - als Kriterium verwendet. Fällt der Kapitalwert einer Investition positiv aus, so wird diese als wirtschaftlich sinnvoll bewertet. Der Kapitalwert C für einen Zeitraum von n Jahren errechnet sich aus den Anfangsinvestitionen I_0 , den jährlichen Einsparungen Z_{ein} und Ausgaben Z_{aus} und dem kalkulatorischen Zinssatz r [35] (Die jährlichen Einsparungen errechnen sich in dieser Arbeit aus den verminderten Strom- und Gaskosten und der Einspeisevergütung und als Ausgaben werden zusätzliche Wartungskosten gewertet):

$$C = -I_0 + \frac{(1+r)^n - 1}{(1+r)^n \cdot r} \cdot (Z_{ein} - Z_{aus}) \quad (3.3)$$

Als ökologisches Bewertungskriterium dient in dieser Arbeit der eingesparte CO_2 -Ausstoß (Δm_{CO_2}). Dieser setzt sich einerseits aus den Stromeinsparung ΔP_{el} in Verbindung mit dem CO_2 -Faktor für den Strommix (m_{Strom}) und andererseits aus den Gaseinsparungen (ΔQ) und dem CO_2 -Faktor des Erdgases (m_{Gas}) zusammen (Als Stromeinsparungen wird in dieser Arbeit neben dem eingesparten Netzverbrauch auch die Einspeisung gewertet). Dabei werden für eine gesamtheitliche Betrachtung auch die CO_2 -Emissionen miteinbezogen, die bei der Produktion der Komponenten entstehen, um die das Wasserstoff-Energiesystem erweitert wird ($\Delta m_{Prod.}$).

$$\Delta m_{\text{CO}_2} = \Delta P_{el} \cdot m_{Strom} + \Delta Q \cdot m_{Gas} - \Delta m_{Prod.} \quad (3.4)$$

3.2.2 Entwicklung von Systemkonzepten

Abbildung 3.2 liefert einen Überblick, über das aktuelle Wasserstoff-Energiesystem, sowie die in dieser Arbeit berücksichtigten Erweiterungen. Folgende Anforderungen werden dabei an die Systemkonzepte gestellt:

Der Strombedarf(4) und Heizwärmebedarf(6) muss gedeckt werden und die zum Betrieb der Veredelungsanlagen benötigte Menge an Sauerstoff(5) und Wasserstoff(6) muss bereitgestellt

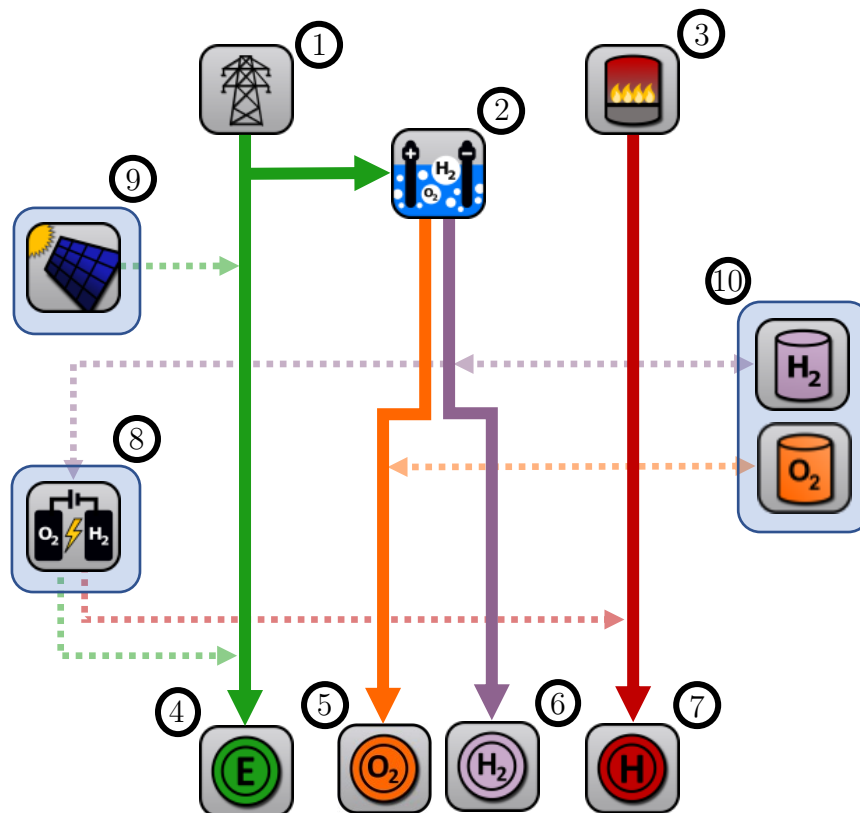


Abbildung 3.2: Aktuelles System sowie betrachtete Erweiterungen (1.Netzanschluss 2.Elektrolyseur 3.Gasheizung 4.Strombedarf 5.Wasserstoffbedarf 6.Sauerstoffbedarf 7.Heizwärmebedarf - Erweiterungen: 8.Brennstoffzelle 9.PV-Anlage 10.Gasspeicher).

werden. Im Jahr 2018 lag das Stoffmengenverhältnis des benötigten Wasserstoffs zum benötigten Sauerstoff bei 1,22 : 1, für 2019 ergab sich ein Verhältnis von 1,40 : 1 (B).

Im aktuellen System wird der Strom aus dem Netz(1) bezogen und der Wärmebedarf von einer Gasheizung(3) gedeckt. Die Prozessgase werden von einem alkalischen Elektrolyseur(2) produziert und das Stoffmengenverhältnis von Wasserstoff zu Sauerstoff beträgt dabei, wie in Gleichung 2.1 beschrieben, 2 : 1.

Bei Konzept 1 wird das bestehende System um eine Brennstoffzelle(8) erweitert, die den Wasserstoffüberschuss zur Kraft-Wärme-Kopplung nutzt. Beim zweiten Konzept wird die Verwendung einer PV-Anlage(9) betrachtet - Konzept 3 enthält sowohl eine PV-Anlage als auch eine Brennstoffzelle. Konzept 4 beinhaltet die Erweiterung mit einer PV-Anlage in Kombination mit einem Gasspeicher(10).

Konzepte 1-3 werden Bedarfs-gesteuert betrieben, was auch der Betriebsstrategie im aktuellen

System entspricht. Bei Konzept 4 wird im Falle von Solarstrom-Überschuss eine Einspeicherung in Form von Prozessgasen vorgenommen. Sobald der Solarstrom nicht ausreicht, um die Produktionsstätte samt Elektrolyseur zu versorgen, werden, falls vorhanden, die im Speicher gelagerten Gase den Anlagen zugeführt.

3.3 Parametrierung der Komponenten

Im folgenden Abschnitt werden die gewählten Parameter zur Simulation der Systemkonzepte vorgestellt. Dies beinhaltet einerseits die Parametrierung der Wasserstoffkomponenten und weiterhin die Verläufe des Strom, Heizwärme und Prozessgasbedarfs.

Alkalischer Elektrolyseur

Im System des Quarzglasherstellers ist ein alkalischer Elektrolyseur vom Hersteller Erre-Due S.p.A. mit der Modellbezeichnung G-32 verbaut. Als voreingestellte Betriebstemperatur ist 60 °C angegeben und der Betriebsdruck liegt standardmäßig bei 4 bar. Für die gesamte Zellfläche liegen keine Angaben vor, daher wird diese anhand der maximal produzierten Stoffmenge und den Literaturangaben zur maximalen Stromdichte von alkalischen Elektrolyseuren abgeschätzt (siehe A). Als Elektrolyt dient 20-prozentige Natronlauge, was einer Stoffmengenkonzentration von 6,095 mol/l entspricht [40].

Für den Elektrodenabstand (δ_{alk}), den Durchtrittsfaktor (α) und die Austauschstromdichte (i_0) werden die von Milewski et al. [33] angegebenen Werte übernommen (siehe A).

Der Wirkungsgrad des von Tjarks [53, S. 50] verwendeten Gleichrichters liegt bei einer Leistung von 20 – 100 % in einem Bereich von 94 – 96 %, daher wird in dieser Arbeit ein Wirkungsgrad von 95 % angenommen.

Tabelle 3.1: Zur Simulation des alkalischen Elektrolyseurs verwendete Parameter.

Betriebstemperatur	T	60 °C
Betriebsdruck	p	4 bar
Gesamtfläche	A_{ges}	10,2 m ²
Elektrolytkonzentration	m	6,095 mol/l
Austauschstromdichte	i_0	3,15 A/m ²
Durchtrittsfaktor	α	0,17
Elektrodenabstand	δ_{alk}	0,66 cm
Effizienz des Gleichrichters	η_{GR}	95 %

PEM-Brennstoffzelle

Für die Simulation wird eine PEM-Brennstoffzelle verwendet, da dies, wie in 2.2.5 angeführt, die meist verwendete Bauart bei Brennstoffzellen ist. Für die Betriebstemperatur werden

80 °C angenommen und für den Betriebsdruck wird der Wert des Elektrolyseurs verwendet. Die Zellfläche ist so gewählt, dass die maximal produzierte Stoffmenge des Elektrolyseurs der maximal verwendeten Stoffmenge der Brennstoffzelle gleicht (siehe A). Rashid et al. [41] nennen 100 – 200 µm als übliche Membrandicke, daher ist diese im Modell mit 150 µm abgeschätzt. Die Werte der Parameter i_0 , α und C_{th} sind aus der Arbeit von Webster und Bode [58] entnommen, der Wärmeverlustfaktor C_{th} wird anhand der Zellfläche skaliert, um den Einfluss der Baugröße auf die Konvektionsfläche zu berücksichtigen (siehe A). Als Wirkungsgrad des Wechselrichters wird auf Grundlage der von Trubitsyn et al. [55] vorgestellten Daten 96 % als Näherung angenommen.

Tabelle 3.2: Zur Simulation der PEM-Brennstoffzelle verwendete Parameter.

Betriebstemperatur	T	80 °C
Betriebsdruck	p	4 bar
Gesamtfläche	A_{ges}	2,55 m ²
Membrandicke	δ_{pem}	150 µm
Austauschstromdichte	i_0	$2,16 \times 10^{-4}$ A/m ²
Durchtrittsfaktor	α	0,7353
Elektrischer Widerstand	R_{ele}	0,096 Ω/cm ² [53]
Wärmeverlustfaktor	C_{th}	21,939 W/K
Effizienz des Wechselrichters	η_{WR}	96 %

PV-Anlage

Als PV-Anlage wird das Modell SE6M60-Series des Herstellers Symphony Energy in der Ausführung SE-M215 verwendet [11]. Ein Simulationsmodell dafür ist in der Aixlib bereits implementiert. Die Peakleistung eines Moduls ist mit 215 W und die Fläche beträgt 1,44 m². Auf der verfügbare Dachfläche des Kunden (537 m²) könne somit maximal 372 Module platziert werden. Daraus ergibt sich eine Peakleistung der Anlage von 79,98 kW.

Für die Wetterdaten werden Messwerte aus dem Jahr 2020 verwendet. Der Temperaturverlauf ist der Datenbank des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen [13] und für die Einstrahlzahlen werden Instituts-eigene Messungen verwendet (Aufgrund fehlender Daten in den Aufzeichnungen des Instituts wurden für die Monate Januar und Februar die von der DWD angegebenen Werte für ein mittleres Testreferenzjahr 2015 verwendet [14]).

Bedarfsverläufe

Für den Strombedarf wird in der Simulation der gemessene Verbrauch des Kunden im Jahr 2020 verwendet. Weil der Elektrolyseur im Jahr 2020 in den Monaten März bis September nicht im Betrieb war, wird in diesem Zeitraum der simulierten Bedarf des Elektrolyseurs zu dem gemessene Stromverbrauch addiert.

Der Heizwärmebedarf wird aus dem Gasverbrauch des Kunden im Jahr 2020 abgeschätzt: Neben der Gasheizung verbrauchen weitere Anlagen des Quarzglas Herstellers Erdgas. Der Gasverbrauch der weiteren Verbraucher wird auf Grundlage der Monate Juni bis August überschlagen, für welche angenommen wird, dass kein Heizbedarf vorliegt (Siehe B).

Für den Wasserstoff- und Sauerstoffbedarf werden zwei Datensätze genutzt, welche aus den Einkaufsmengen der Gase vor Anschaffung des Elektrolyseurs bestimmt wurden (siehe auch B): Im Datensatz für 2018 wird Werktags für 4 h, 30 min Wasserstoff und für 7 h, 15 min Sauerstoff benötigt. Der Stoffmengenstrom liegt bei durchschnittlich 75 % der Maximalleistung des Elektrolyseurs. Die Daten sind zur Steigerung der Realitätsnähe mit einem Rauschen behaftet, wodurch der Bedarf bei Betrieb zwischen 50 und 100 % schwankt. Es ergibt sich im Vergleich zum realen Jahresverbrauch aus 2018 für den Wasserstoffbedarf eine Abweichung von 1,5 % und für den Sauerstoffbedarf eine Abweichung von 0,2 %.

Bei dem Datensatz für 2019 wird tägliche für 2 h, 45 min Wasserstoff und für 4 h Sauerstoff benötigt. Daraus ergeben sich im Vergleich zum realen Jahresverbrauch von 2019 Abweichungen von 0,7 % beim Sauerstoffbedarf und 0,5 % beim Wasserstoffbedarf. Exemplarische Tagesverläufe der beiden Datensätze sind in Abbildung 3.3 und 3.4 dargestellt.

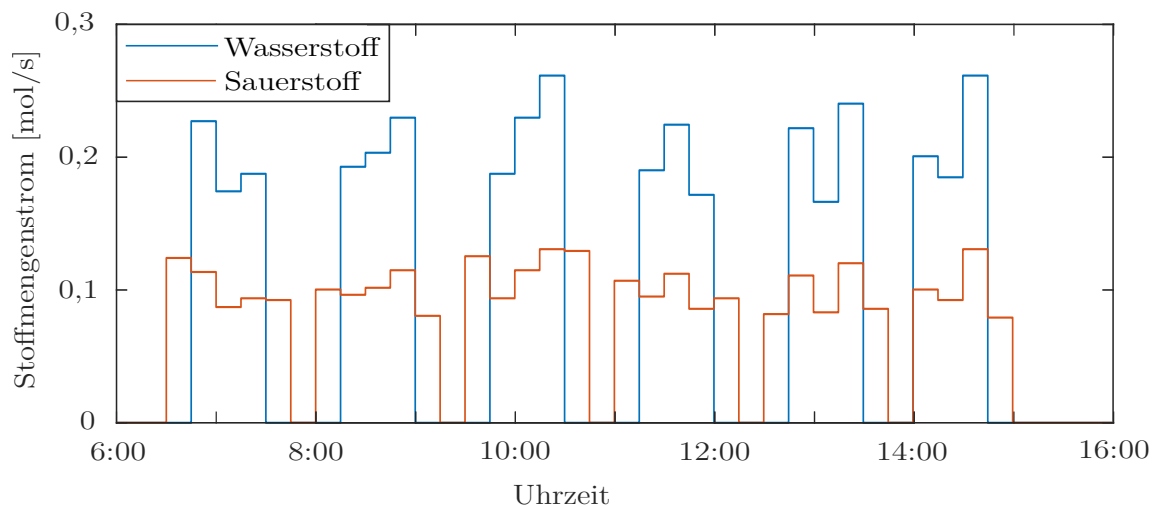


Abbildung 3.3: An 2018 angelehnter, exemplarischer Verlauf des Wasserstoff und Sauerstoffbedarfs über einen Arbeitstag.

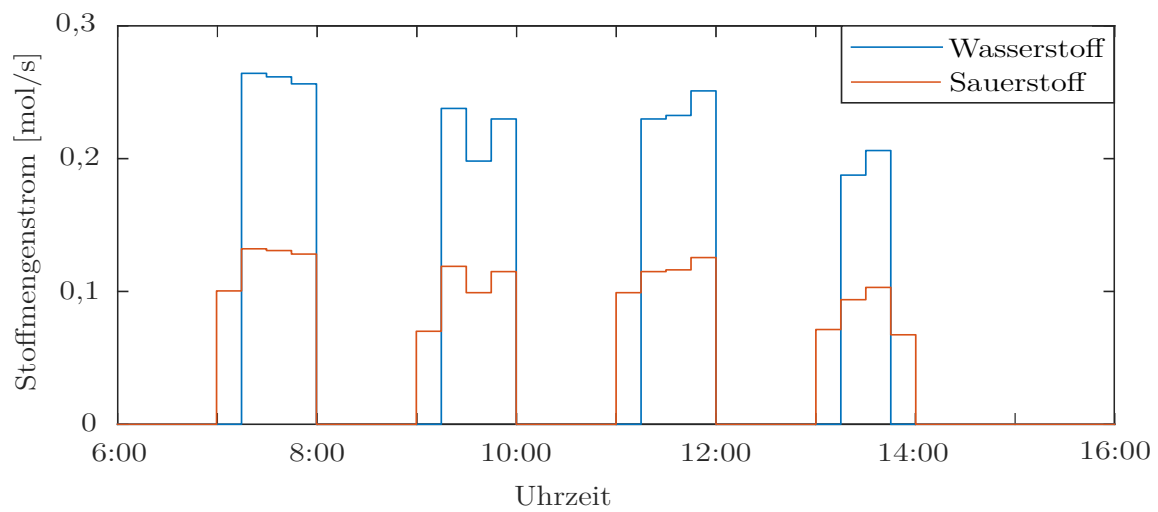


Abbildung 3.4: An 2019 angelehnter, exemplarischer Verlauf des Wasserstoff und Sauerstoffbedarfs über einen Arbeitstag.

4 Simulation der Systemkomponenten und Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse vorgestellt. Zur Plausibilisierung der Daten werden die Modelle der Wasserstoffkomponenten im ersten Schritt mit in der Literatur angegebenen Messwerten abgeglichen. Im zweiten Schritt folgt die Präsentation der Simulationsergebnisse samt Berechnung der zur Bewertung herangezogenen Kennwerte. Dabei erfolgt zudem ein Vergleich der Systemkonzepte anhand der Bewertungskriterien.

4.1 Validierung der Komponentenmodelle

In der folgenden Validierung werden drei Systeme betrachtet: Einerseits ein alkalischer Elektrolyseur und eine PEM-Brennstoffzelle, weil diese beiden Bauarten in den Systemkonzepten genutzt werden. Andererseits ein PEM-Elektrolyseur, da diese Bauart, wie in 2.2.4 angegeben, aufgrund von Vorteilen in der Dynamik der Last und bei der Baugröße aktuell an Relevanz zunehmen.

4.1.1 Komponenten der Systemkonzepte

Zur Validierung des alkalischen Elektrolyseurs werden die von Hammoudi et al. [24] dokumentierten Messwerte genutzt. Betrachtet wird eine Einzelzelle mit einer aktiven Zellfläche von $0,03 \text{ m}^2$ deren Elektrodenabstand mit 5 mm angenommen wird. Als Elektrolyt dient 30-prozentige Kalilauge (daraus folgt $m = 6,85 \text{ mol/l}$ [39]). Betrieben wird die Zelle bei einem Druck von 1 bar und es wird eine Temperatur von 30 sowie $53,5^\circ\text{C}$ betrachtet.

Der von Hammoudi et al. [24] dokumentierte Maximalwert der Stromstärke beträgt 73 A und die minimale Teillast wird, wie in 2.3 angegeben, mit 20 % des Maximalwerts angenommen. Somit kann als minimale Teillast des Elektrolyseurs im realen Betrieb von einer Stromstärke von 14,6 A ausgegangen werden. In diesem Bereich beträgt der Fehler bei einer Temperatur von 35°C maximal 1,6 %. Für eine Temperatur von $53,5^\circ\text{C}$ ergibt sich eine maximale Abweichung von 3,5 % (Im Durchschnitt 2,2 %).

Es zeigt sich also, dass das Modell in der Lage ist, die Polarisationskurven alkalischer Elektrolyseure mit hinreichender Genauigkeit zu modellieren. Somit ist es für die Anwendung im Rahmen dieser Arbeit geeignet. Für folgende Arbeiten wird eine Validierung des Modells bei

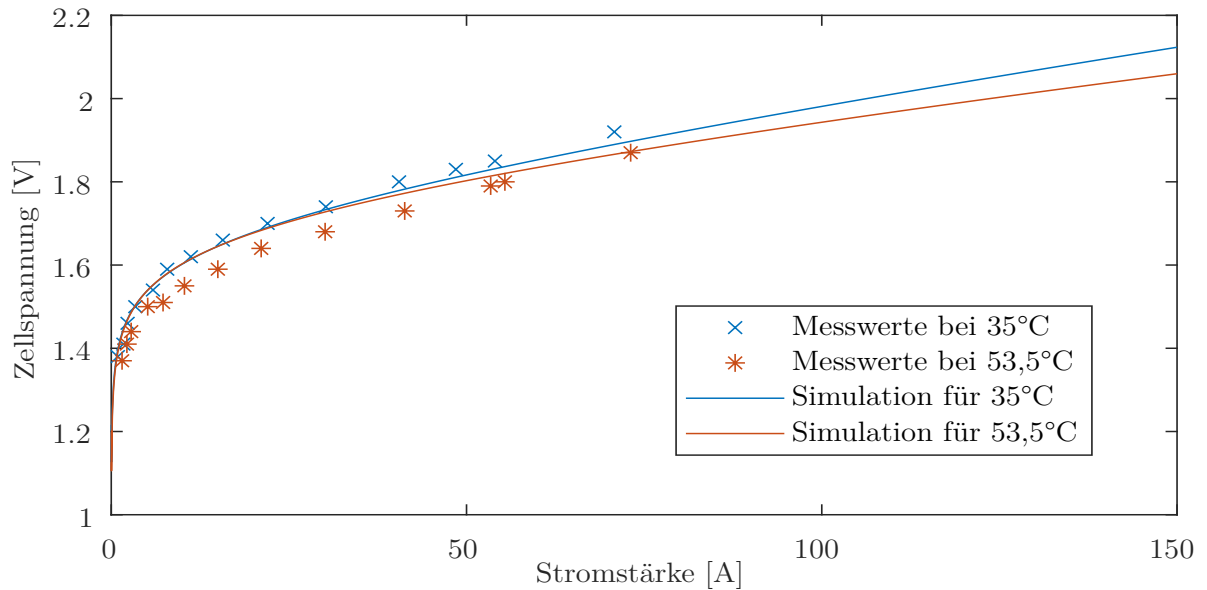


Abbildung 4.1: Vergleich des Elektrolyseur-Modells mit Messwerten von Hammoudi et al. [24].

verschiedenen Druckniveaus empfohlen.

Um die Rechenzeit der Simulation gering zu halten wird in dieser Arbeit auf eine Simulation des thermischen Verhaltens der Elektrolysezelle verzichtet, allerdings kann diese bei Bedarf ohne weiteren Entwicklungsaufwand aus dem Brennstoffzellenmodell übernommen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Ausweitung des Modells sind dynamische Vorgänge, die in dieser Arbeit aufgrund der großen Zeitschritte der Simulation nicht beachtet wurden (Ausführlichere Begründung in 3.1.1). Um diese zu berücksichtigen, kann die in der Energiebilanz (Gleichung 2.18) enthaltene Instationarität der Zelltemperatur in der Modellierung des thermischen Verhaltens übernommen werden.

Zur Validierung der PEM-Brennstoffzelle werden Messwerte von Chugh et al. [10] genutzt. Es handelt sich um einen Brennstoffzellenstack von 30 in Reihe geschalteten Einzelzellen. Die aktive Zellfläche einer Einzelzelle beträgt $0,005 \text{ m}^2$ und die Dicke der Membran ist mit $50,8 \mu\text{m}$ angegeben. Die betrachtete Betriebstemperatur beträgt 50 und 80°C und der Betriebsdruck bei 1 und $2,5 \text{ bar}$.

Chugh et al. [10] dokumentieren einen Stromstärke von bis zu $1,4 \text{ A/cm}^2$ und die minimale Teillast wird, wie in 2.4 angegeben, für PEM-Zellen mit 10% des Maximalwerts angenommen. Daraus ergibt sich eine minimale Teillast von $0,14 \text{ A/cm}^2$ für den realen Betrieb. Oberhalb des genannten Wertes liegt der Fehler bei einer Temperatur von 50°C und einem Druck von 1 bar

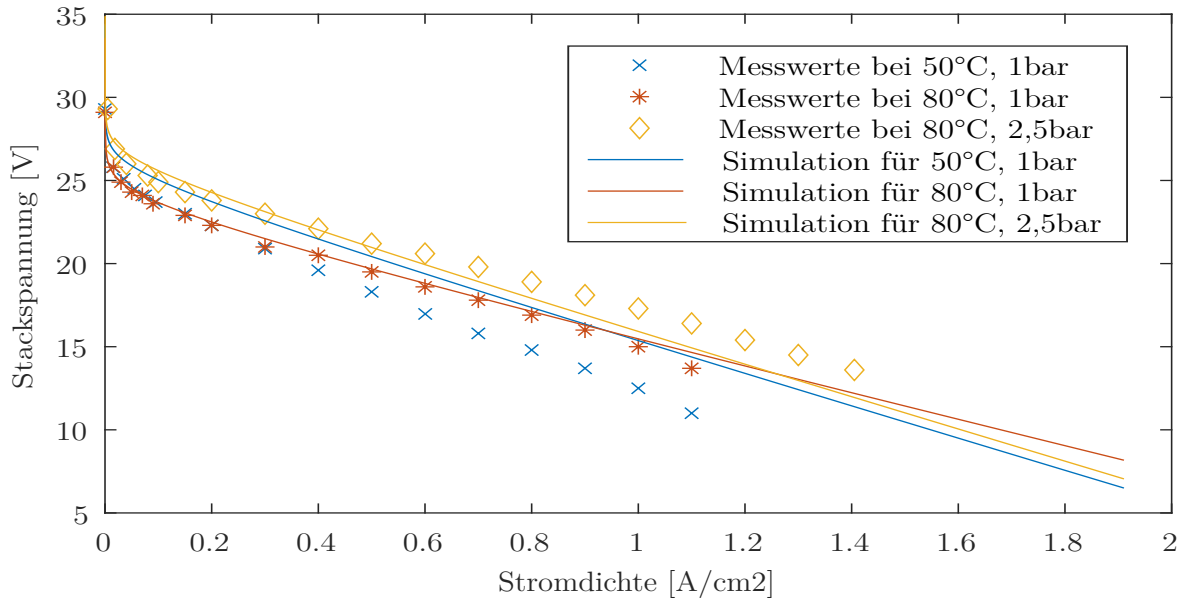


Abbildung 4.2: Vergleich des Brennstoffzellen-Modells mit Messwerten von Chugh et al. [10].

zwischen 6,2 und 30,6 %. Für 80 °C und 1 bar ergeben sich Abweichungen von durchschnittlich 2,1 % (Die maximale Abweichung beträgt 7,6 %). Wird der Druck auf 2,5 bar angehoben, steigt der Fehler auf durchschnittlich 5,3 % (Die maximale Abweichung beträgt in dem Fall 11,1 %).

Es zeigt sich somit, dass das Modell die Polarisationskurve von Brennstoffzellen bei hohen Betriebstemperaturen in einem akzeptablen Maß approximiert. Da die zur Simulation der Systemkonzepte eingesetzte Brennstoffzelle bei einer Betriebstemperatur von 80 °C betrieben wird, ist im Bezug auf die Modellierung der Brennstoffzelle von einer ausreichenden Genauigkeit auszugehen.

Die großen Abweichungen bei niedrigen Temperaturen lassen sich durch die Wahl des Durchtrittsfaktors (α) und der Austauschstromdichte (i_0) begründen. Wie von Falcão und Pinto [19] gezeigt, variieren die in der Literatur angegebenen Werte der beiden Parameter stark. So liegen die Angaben des Durchtrittsfaktors zwischen 2 und 0,5 - die Angaben der Austauschstromdichte schwanken von 10^{-3} bis 10^{-9} A/cm². Dabei werden teilweise getrennte Werte für Anode und Kathode angegeben, was aber auf die Größenordnung des Wertebereichs keinen Einfluss nimmt (Die angegebenen Wertebereiche beziehen sich auf die Anode, da dort höhere Verluste auftreten).

Es wird ersichtlich, dass die experimentell ermittelten Parameter einerseits von dem Aufbau des Modells abhängen, denn die Fitting-Parameter werden sowohl durch die Modellierung der anderen Verluste als auch durch im Modell nicht berücksichtigte weitere Faktoren beein-

flusst. Andererseits spielt der Versuchsaufbau und die untersuchte Zelle eine gewichtige Rolle, da beispielsweise die Betriebstemperatur, der Betriebsdruck oder Materialeigenschaften die resultierenden Fitting-Parameter beeinflussen. Einige Autoren nutzten daher Approximationen, um einen Temperatureinfluss auf den Durchtrittsfaktor oder die Austauschstromdichte im Modell zu berücksichtigen [19, 33]. Für die Modellierung von PEM-Zellen verspricht dies eine Steigerung der Genauigkeit bei niedrigen Temperaturen. Ob diese Maßnahme die Genauigkeit der Modellierung von alkalischen Zellen erhöht ist unklar, da die Validierungsergebnisse des alkalischen Elektrolyseurs keine signifikante Steigerung der Abweichungen bei zu- oder abnehmenden Temperaturen dokumentieren.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Genauigkeit bei der Modellierung der Brennstoffzelle könnte die Beachtung der Konzentrationsüberspannungen sein. Denn diese treten insbesondere im oberen Lastbereich auf, und in diesem sind bei der Validierung zunehmende Abweichungen zu erkennen.

Die Validierung der Systemkomponenten ist somit im Hinblick auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse insgesamt als positiv zu bewerten: Die Elektrolysezelle wird über den abgebildeten Bereich zufriedenstellend modelliert. In dem für die Simulation relevanten Betriebspunkt trifft dies auch auf die Modellierung der PEM-Brennstoffzelle zu. Somit sind die in 4.2 präsentierten Simulationsergebnisse zur vorläufigen Bewertung der Systemkonzepte geeignet. In Zukunft sollte darüber hinaus eine Validierung der Modellierung des thermischen Verhaltens erfolgen.

4.1.2 PEM-Elektrolyseur

Die Daten zur Validierung der PEM-Elektrolysezelle sind Tjarks [53, S. 36] entnommen. Betrachtet wird eine Einzelzelle mit einer aktiven Zellfläche von $0,0025\text{ m}^2$ deren Membran mit einer Dicke von $150\text{ }\mu\text{m}$ abgeschätzt wird (vergleiche Rashid et al. [41]). Es werden Betriebstemperaturen von 30 , 60 und $80\text{ }^\circ\text{C}$ bei einem Druck von 1 bar untersucht.

Die folgenden Angaben beziehen sich auf Stromdichten oberhalb von $0,2\text{ A/cm}^2$, da die minimale Teillast nach Tabelle 2.4 für PEM-Zellen mit 10% der Maximalen Stromdichte angenommen wird. Bei einer Temperatur von $30\text{ }^\circ\text{C}$ ergeben sich Abweichungen von $22,3\%$ bei der minimalen Teillast und $4,4\%$ bei Maximallast. Für eine Temperatur von $60\text{ }^\circ\text{C}$ liegt der Fehler über den gesamten Leistungsbereich unter $2,9\%$, für $80\text{ }^\circ\text{C}$ unterhalb von $0,5\%$.

Es zeigt sich somit auch für den PEM-Elektrolyseur, dass das Modell im oberen Temperaturbereich in der Lage ist, die Polarisationskurve ausreichend genau abzubilden. Wie auch bei

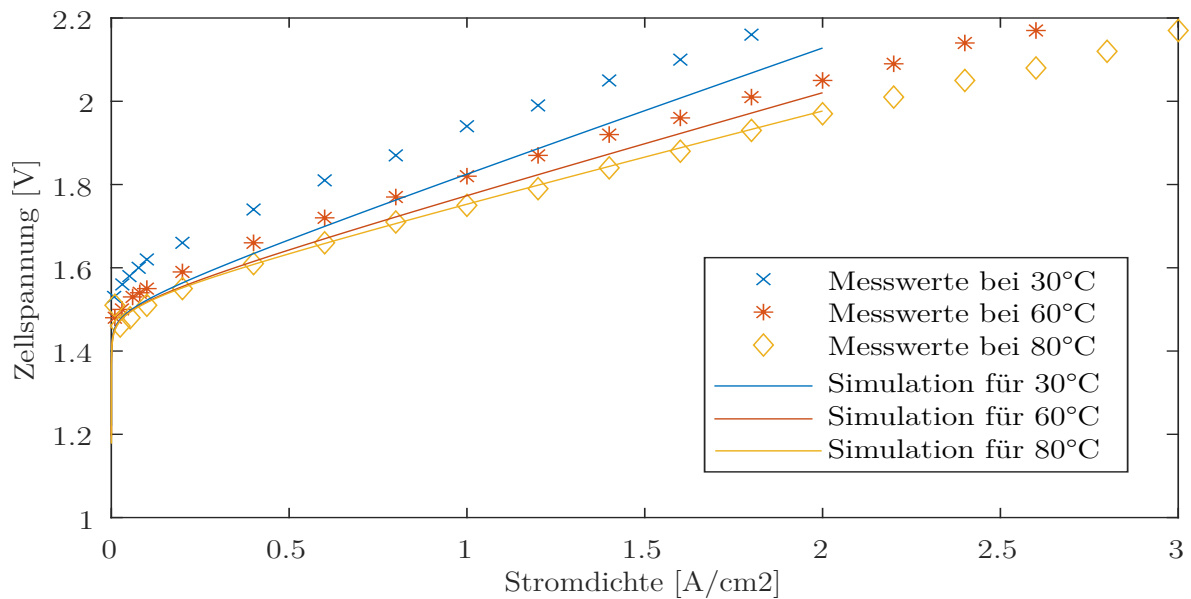


Abbildung 4.3: Vergleich des Elektrolyseur-Modells mit Messwerten von Tjarks [53].

der PEM-Brennstoffzelle liegen bei niedrigen Temperaturen signifikante Abweichungen zu den Messwerten vor. Im Gegensatz zur Brennstoffzelle nehmen diese aber nicht bei hohen, sondern bei niedrigen Lasten zu. Außerdem zeigt ein Vergleich der Messwerte des PEM-Elektrolyseurs und der PEM-Brennstoffzelle, dass sich der Temperatureinfluss auf die Zellspannung in den beiden Fällen deutlich unterscheidet:

Im Falle der Brennstoffzelle (Abbildung 4.2) zeigt sich eine gesteigerte Temperatur erst im oberen Lastbereich, wohingegen sich die Zellspannung bei 0,2 bis 0,3 A/cm² trotz einer Temperaturdifferenz von 30 °C nicht signifikant unterscheidet.

Im Falle des Elektrolyseurs (Abbildung 4.3) ist schon im unteren Lastbereich ein signifikanter Unterschied der Zellspannung für die abgebildeten Temperaturen sichtbar, der mit zunehmender Stromdichte linear ansteigt.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass für den gewählten Elektrolyseur und die Brennstoffzelle eine einheitliche Parametrierung insbesondere über einen größeren Temperaturbereich keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern kann. Ob diese Beobachtung allgemein auf den Vergleich von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen anzuwenden ist, bleibt allerdings unklar. In folgenden Arbeiten sollte daher untersucht werden, ob weitere Messreihen den unterschiedlichen Temperatureinfluss auf die Polarisationskurven bestätigen. Dies würde im Modell gegebenenfalls eine getrennte Parametrierung von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren erfordern.

4.2 Ergebnisse der Simulationen der Systemkonzepte

Die Simulationen wurden mit Zeitschritten von 900 s (= 15 min) durchgeführt. Es wurde der Dymola-Standard-Löser *Dassl* mit einer Toleranz von 10^{-4} verwendet. Als Ergebnisse der Simulation sind drei Kennwerte von Bedeutung: Der jährliche Strombedarf, die Stromeinsparungen und die Gaseinsparungen. Im folgenden werden die Kennwerte des aktuellen Systems sowie der entwickelten Systemkonzepte präsentiert. Die Stromeinsparungen sind in Abbildung 4.4 graphisch wiedergegeben, in Tabelle 4.1 sind die Kennwerte für die 4 Konzepte aufgelistet. Für eine genauere Evaluierung der Konzepte sollten in Zukunft Simulationen mit Messreihen des Prozessgasverbrauchs durchgeführt werden, da der benötigte Stoffmengestrom einen großen Einfluss auf die Effizienz des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle hat und die Ergebnisse somit maßgeblich beeinflusst.

Für das aktuelle System wird ein Jahres-Strombedarf von 959,3 MWh für den an 2018 angelehnten Prozessgasbedarf prognostiziert, mit den Daten für 2019 ergibt sich ein Strombedarf von 915,173 MWh.

Konzept 1

Die Verwendung einer Brennstoffzelle zur Nutzung des Wasserstoffüberschusses führt zu Stromeinsparungen von 12,9 beziehungsweise 5,9 MWh pro Jahr im Vergleich zum aktuellen System. Bei alleiniger Verwendung der Brennstoffzelle wird kein Strom ins Netz eingespeist. Dies entspricht den Erwartungen, weil die Ausgangsleistung der Brennstoffzelle aufgrund der Umwandlungsverluste stets kleiner als die Eingangsleistung des Elektrolyseurs ist. Die Gaseinsparungen betragen 14,1 MWh für den Prozessgasverbrauch nach den 2018er Daten, für die 2019er Daten ergeben sich 6,6 MWh.

Konzept 2

Bei Installation einer PV-Anlage ergeben sich Stromeinsparungen von 66,3 MWh für beide Verläufe des Prozessgasbedarfs. Die berechnete Einspeisung bei Verwendung einer PV-Anlage beträgt unabhängig vom sonstigen Systemaufbau und dem Prozessgasverbrauch 4,3 MWh. Dies lässt darauf schließen, dass die Stromeinspeisung außerhalb der Arbeitszeit, also beispielsweise in den Abendstunden oder am Wochenende, auftritt.

Konzept 3

Wird das System um eine PV-Anlage und eine Brennstoffzelle erweitert ergeben sich jährliche Stromeinsparungen von 84,7 beziehungsweise 75,0 MWh. Die Gaseinsparungen liegen bei 13 beziehungsweise 6,5 MWh.

Ein Vergleich der Konzepte 1 bis 3 zeigt, dass sich die PV-Anlage und die Brennstoffzelle nicht gegenseitig beeinflussen: Die Abweichungen einer Berechnung der Endwerte von Konzept 3 als Addition von Konzept 1 und 2 liegen im Verhältnis zu den Simulationsergebnissen für die Stromeinsparungen unter 0,6 % und für die Gaseinsparung unter 1,4 % (Eine Erklärung für die Abweichungen ist die gewählte Toleranz der Simulation). Dieses Verhalten liegt darin begründet, dass die maximale elektrische Leistung der Brennstoffzelle (24,475 kW) und der PV-Anlage (79,980 kW) in Summe kleiner ist als der Strombedarf während der Arbeitszeit (über 200 kW). Somit kommt es während beide Komponenten im Betrieb sind zu keinem Zeitpunkt zu einem Überangebot von erzeugtem Strom, welches ins Netz eingespeist wird. Aus diesem Grund führt die Verwendung beider Komponenten im Vergleich zur Einzel-Betrachtung nicht zu einer Steigerung der Einspeisung oder einer Verminderung der Einsparungen beim Strombedarf.

Konzept 4

Die Simulationsergebnisse bei einer Verwendung einer PV-Anlage in Kombination mit einem Gasspeicher weisen keine signifikanten Unterschiede zu den Ergebnissen ohne Gasspeicher auf. Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass der Speicher bei der gewählten Betriebsstrategie stets mit weniger als 10^{-14} kg befüllt ist und keine Senkung der Stromeinspeisung ins Netz zu verzeichnen ist. Wie bereits festgestellt besteht der Überschuss von PV-Strom außerhalb der Betriebszeiten. Aus der geringen Beladung des Speichers lässt sich daher schließen, dass die überschüssige Leistung stets geringer ist als die benötigte Leistung bei der minimalen Teillast des Elektrolyseurs und daher keine Einspeicherung des Stromüberschusses in Form von Prozessgasen möglich ist.

Somit bringt die Verwendung des Gasspeichers im Energiesystem keinen Nutzen und findet bei der Berechnung der Kapitalwerte und der CO₂-Emissionen keine Berücksichtigung.

Eine alternative Betriebsstrategie bei Wasserstoffsystemen mit Gasspeichern ist nach Bocklisch [7] die Nutzung des Gasspeichers als Puffer zur Verminderung der dynamischen Beanspruchung des Elektrolyseurs. Als Vorteil gibt er einerseits eine Effizienzsteigerung an, weil im dynamischen Betrieb zusätzliche Verluste auftreten. Andererseits führt er an, dass dynamische Beanspruchung zur Degradation der Zelleistung beiträgt und die Lebensdauer der Zelle senkt.

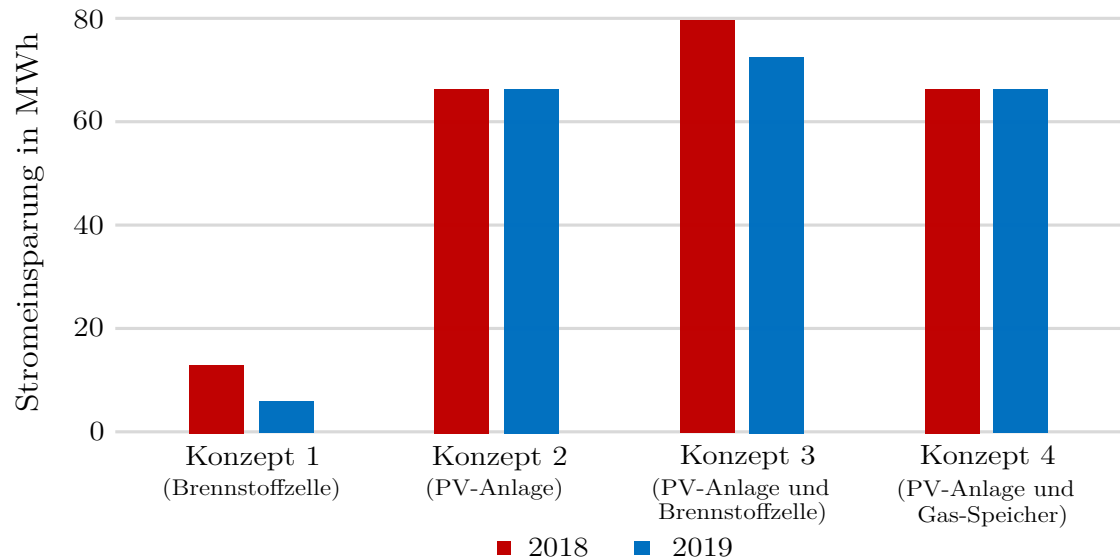


Abbildung 4.4: Vergleich der Simulationsergebnisse für den Jahresstromverbrauch des aktuellen Systems und der Konzepte samt Angabe der Stromeinsparungen im Vergleich zum aktuellen System.

Tabelle 4.1: Vergleich der Stromeinsparungen, Einspeisung und Gaseinsparung der Systemkonzepte (Im erste Block sind die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2018 und im zweite die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2019 angegeben).

	Stromeinsparungen in MWh	Einspeisung in MWh	Gaseinsparung in MWh
Konzept 1	12,857	-	14,083
Konzept 2	66,296	4,313	-
Konzept 3	79,637	4,313	14,032
Konzept 4	66,296	4,313	-
Konzept 1	5,858	-	6,620
Konzept 2	66,295	4,313	-
Konzept 3	72,489	4,313	6,526
Konzept 4	66,295	4,313	-

Kapitalwerte der Systemkonzepte

Die Kapitalwerte werden mithilfe der in C angegebenen Parameter berechnet. In Abbildung 4.5 werden die Kapitalwerte der Systemkonzepte graphisch gegenübergestellt, in Tabelle 4.2 sind die Investitionskosten sowie jährliche Einnahmen und Ausgaben angegeben.

Für die Investition in eine Brennstoffzelle ergibt sich ein Kapitalwert von 5.847 € für den an 2018 angelehnten Prozessgasbedarf, mit den Daten für 2019 ergibt sich ein Kapitalwert von –15.338 €. Die Investition ist somit anhand des Kapitalwerts als tendenziell negativ zu bewerten. Um die Aussagekraft der Bewertung zu erhöhen, ist es sinnvoll, die Wahrscheinlichkeiten der beiden simulierten Szenarien abzuschätzen und dies in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Für den Fall, dass in Zukunft mit steigendem Wasserstoffüberschuss zu rechnen ist, könnte sich die Investition in eine Brennstoffzelle als wirtschaftlich sinnvoll herausstellen.

Einen verbesserten Ansatz könnte die Installation einer Brennstoffzelle mit einer kleineren Zellfläche in Kombination mit einem Wasserstoffspeicher darstellen. Dadurch kann bei einer nahezu gleichbleibenden Stromeinsparung eine deutliche Verminderung der Investitionskosten erreicht werden, was durch eine überschlägige Berechnung verdeutlicht werden soll:

Bei den betrachteten Verläufen des Prozessgasbedarfs beträgt der maximal denkbare Überschuss an Wasserstoff ungefähr 5,3 kg (In maximal 2 h, 45 min pro Tag wird überschüssiger Wasserstoff produziert und der maximale Stoffmengenstrom beträgt 0,2643 mol/s). Wird die Umwandlung des Wasserstoffs nicht zeitgleich, sondern über den Tag verteilt vollzogen, reichen $\frac{2\text{h},45\text{ min}}{24\text{h}} = 11,5\%$ der im aktuellen Konzept veranschlagten Maximalleistung aus, um den Wasserstoffüberschuss vollständig zu nutzen. Dadurch sinken die Investitionskosten der Brennstoffzelle auf 5.250 € (siehe C). Investitionskosten in einen Wasserstoffspeicher können, wie in C angegeben, mit 594 €/kg_{H2} abgeschätzt werden. Somit ergeben sich Gesamt-Investitionskosten von 8,400 €, was einem Viertel der Investitionskosten des simulierten Brennstoffzellen-Konzepts entspricht. Da durch den zusätzlichen Betrieb des Speichers mit steigenden Betriebskosten und zusätzlichem Stromverbrauch zu rechnen ist, soll an dieser Stelle auf eine Berechnung des Kapitalwerts verzichtet werden. Allerdings zeigt die Abschätzung, dass durch die Kombination mit einem Gasspeicher mit einer deutliche Verbesserung hinsichtlich des Kapitalwerts zu rechnen ist.

Die Investition in eine PV-Anlage ergibt unabhängig vom verwendeten Bedarfsverlauf einen Kapitalwert von 84.726 €. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Investition anhand des Kapitalwerts fällt also positiv aus.

Dies trifft auch auf die Kombination aus PV-Anlage und Brennstoffzelle zu, für die sich

Kapitalwerte von 91.824 € und 70.220 € ergeben. Es ist aber zu beachten, dass verglichen mit Konzept 2 die Mehrinvestition in eine Brennstoffzelle gemessen am Kapitalwert keinen deutlichen Mehrwert mit sich bringt. So erhöht sich der Kapitalwert für das Szenario 2018 bezogen auf die gesteigerten Investitionskosten nur unwesentlich und im Szenario 2019 sinkt der Kapitalwert durch die Mehrinvestition in eine Brennstoffzelle.

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass nach Aussage des Kapitalwerts die Investition in eine PV-Anlage lohnenswert ist. Die ökonomische Bewertung der Brennstoffzelle hängt von dem prognostizierten Prozessgasverbrauch ab, fällt aber tendenziell negativ aus. Optimierungen des Brennstoffzellen-Konzepts versprechen aber deutliche Verbesserungen im Hinblick auf die ökonomische Bewertung.

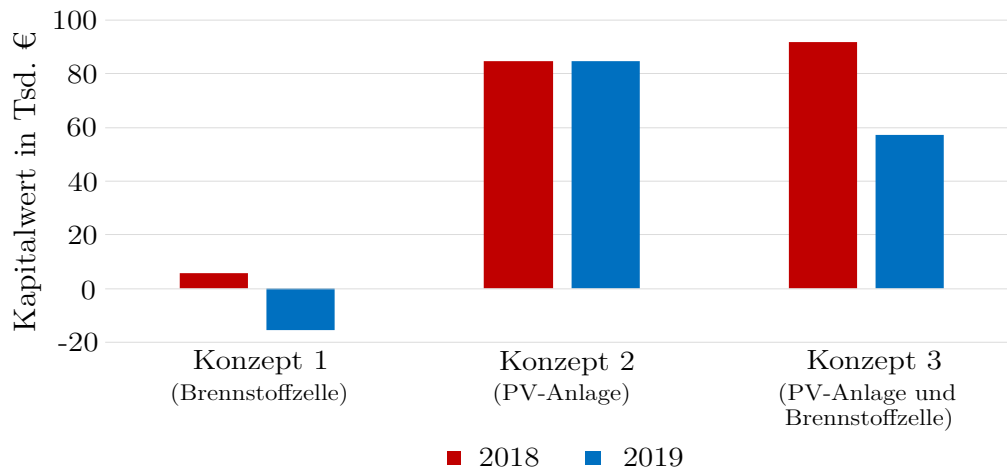


Abbildung 4.5: Kapitalwerte der Systemkonzepte.

Tabelle 4.2: Kapitalwerte der Konzepte sowie Kosten, die in die Berechnung einfließen (Im erste Block sind die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2018 und im zweite die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2019 angegeben).

	Investitionskosten in €	Einnahmen in €	Ausgaben in €	Kapitalwert in €
Formelzeichen	I_0	Z_{ein}	Z_{aus}	C
Konzept 1	33.286	3.550,63	259,71	5.846,72
Konzept 2	80.352	15.087,43	1.205,00	84.725,62
Konzept 3	113.638	18.743,31	1.464,71	91.823,88
Konzept 1	33.286	1.627,71	118,33	-15.337,78
Konzept 2	80.352	15.087,43	1.205,00	84.725,62
Konzept 3	113.638	16.785,12	1.323,33	70.219,98

CO₂-Einsparungen der Systemkonzepte

Die benötigten Parameter zur Berechnung der CO₂-Einsparungen sowie ihre Herleitung sind in D aufgelistet. In Abbildung 4.6 werden die Einsparungen graphisch gegenübergestellt, die Bestandteile der Berechnung sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Für die Verwendung einer Brennstoffzelle ergeben sich CO₂-Einsparungen von 8,0 t für den an 2018 angelehnten Prozessgasbedarf, mit den Daten von 2019 werden 3,6 t CO₂ eingespart. Die Verwendung einer PV-Anlage im Energiesystem führt zu CO₂-Einsparungen von 24,8 t, bei einer Kombination von PV-Anlage und Brennstoffzelle liegen die CO₂-Einsparungen bei 32,9 t beziehungsweise bei 28,5 t.

Alle drei Systemkonzepte versprechen somit eine Senkung der jährlichen CO₂-Emissionen. Die Einsparungen bei Verwendung der PV-Anlage sind dabei je nach Szenario 310 % beziehungsweise 680 % höher als die Einsparungen bei Verwendung einer Brennstoffzelle.

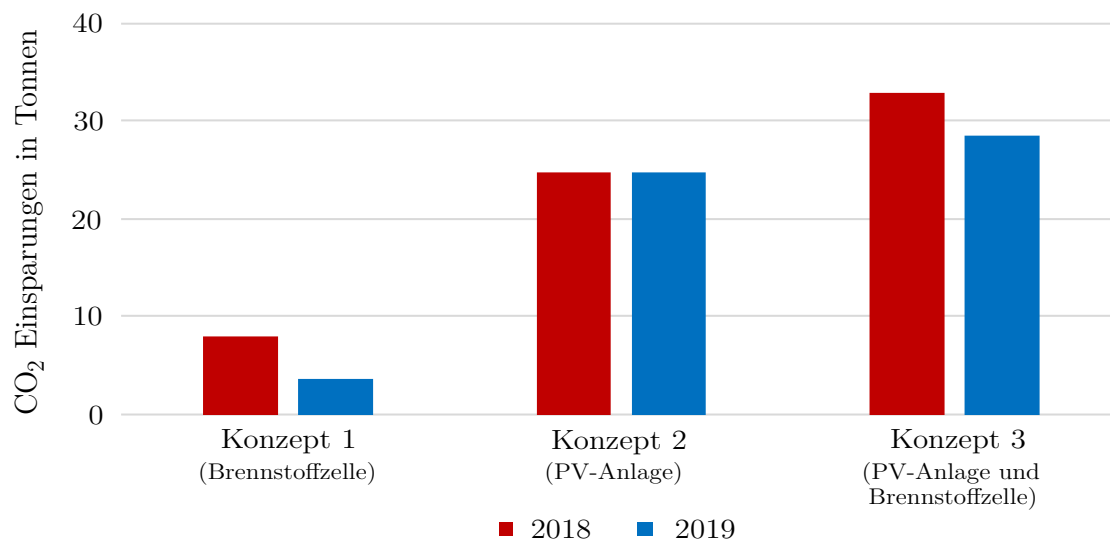


Abbildung 4.6: CO₂-Einsparungen der Systemkonzepte.

Tabelle 4.3: CO₂-Einsparungen der Systemkonzepte sowie Einsparungen elektrischer Energie, Gaseinsparungen und bei der Produktion der Komponenten entstehende CO₂-Emissionen (Im erste Block sind die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2018 und im zweite die Daten für die Bedarfsverläufe aus 2019 angegeben).

Formelzeichen	Eisp. el. Energie in MWh ΔP_{el}	Gaseinsp. in MWh ΔQ	CO ₂ -Em. der Prod. in Tonnen $\Delta m_{Prod.}$	CO ₂ -Einsp. in Tonnen Δm_{CO_2}
Konzept 1	12,957	14,083	0,038	7,992
Konzept 2	70,609	-	3,530	24,784
Konzept 3	83,950	14,032	3,568	32,919
Konzept 1	5,858	6,620	0,756	3,643
Konzept 2	70,609	-	3,530	24,784
Konzept 3	76,802	6,526	3,568	28,542

5 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird das Wasserstoff-Energiesystem eines Quarzglasherstellers betrachtet, um Konzepte zur effizienteren Gestaltung des Systems zu identifizieren:

Im ersten Schritt wird ein physikalisches Modell für Elektrolyseure und Brennstoffzellen in Modelica entwickelt. Das Modell wird anhand von Kennwerten aus Datenblättern parametrisiert und ist darüber hinaus in der Lage, Zellen verschiedener Technologien zu modellieren. Aus der Validierung der Modelle geht hervor, dass sie für die im Rahmen dieser Arbeit angestrebte Untersuchungen ausreichend genaue Ergebnisse liefern: Bei der für die Simulation gewählten Betriebstemperatur liegen die Abweichungen der Polarisationskurve des alkalischen Elektrolyseurs bei unter 3,5 %, für die PEM-Brennstoffzelle ergeben sich Abweichungen von durchschnittlich 5,3 %.

Für einen PEM-Elektrolyseur werden Abweichungen von unter 0,5 % zu Messwerten aus der Literatur verzeichnet.

Bei den beiden PEM-Zellen nimmt die Genauigkeit des Modells unterhalb der gewählten Betriebstemperatur stark ab.

Als Erweiterungen des Wasserstoff-Energiesystems des Quarzglasherstellers werden folgende Komponenten betrachtet: Eine Brennstoffzelle zur Nutzung des Wasserstoffüberschusses durch Kraft-Wärme-Kopplung, eine PV-Anlage und ein Gasspeichers zum Einspeichern von Solarstrom-Überschuss. Zur Bewertung der Systemkonzepte werden der Kapitalwert und die CO₂-Einsparungen berechnet.

Die ökonomische Bewertung der Brennstoffzelle fällt tendenziell negativ aus: Abhängig vom prognostizierten Prozessgasbedarf liegt der Kapitalwert zwischen -15.388 und 5.847 €. Aus ökologischer Sicht stellt die Installation der Brennstoffzelle eine Verbesserung dar - es ergeben sich CO₂-Einsparungen von 3,6 bis 8 t. Die Optimierung des Brennstoffzellen-Konzepts verspricht eine verbesserte ökonomische Bewertung bei nahezu gleichbleibenden CO₂-Emissionen. Die PV-Anlage wird als sinnvoll Investition gewertet, da der Kapitalwert mit 84.726 € klar positiv ausfällt (Der Kapitalwert übersteigt dabei die Anfangsinvestitionen). Auch aus ökologischer Sicht wird die PV-Anlage verglichen mit der Brennstoffzelle positiver eingestuft: Die simulierten CO₂-Einsparungen sind mit 24,8 t um den Faktor 3 bis 6 höher.

Im Bezug auf die Modellierung der Wasserstoffkomponenten ergeben sich aus dieser Arbeit für die Zukunft folgende Arbeitsschritte:

- Um dynamische Vorgänge in dem Modell zu implementieren, kann die Instationarität der Zelltemperatur in der Energiebilanz (Gleichung 2.18) berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist es sinnvoll, die Modellierung des thermischen Verhaltens der Brennstoffzelle auch in das Elektrolyseur-Modell zu implementieren.
- Eine Modellierung des Temperatureinflusses auf die Durchtrittsfaktor oder die Austauschstromdichte verspricht eine höhere Genauigkeit des Modells für PEM-Zellen bei niedrigen Temperaturen. Weiterhin bleibt zu untersuchen, ob für Elektrolyseure und Brennstoffzellen gleicher Bauart die Werte der Fitting-Parameter unverändert bleiben. Gegebenenfalls sollte das Modell um eine getrennte Parametrierung von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren erweitert werden.
- Die Modellierung von Konzentrationsüberspannungen ist zur Verminderung der Abweichungen des Brennstoffzellen-Modells im oberen Lastbereich eine sinnvolle Erweiterung.
- Für folgende Arbeiten wird eine Validierung des Modells bei verschiedenen Druckniveaus empfohlen. Darüber hinaus sollte eine Validierung der Modellierung des thermischen Verhaltens der Brennstoffzelle erfolgen.

Im Hinblick auf die Identifikation sinnvoller Konzepte des Wasserstoff-Energiesystems des Quarzglasherstellers sind in Zukunft folgende Schritte von Bedeutung:

- Aufbauend auf den Simulationsergebnissen dieser Arbeit sollte eine genauere Evaluierung der als sinnvoll bewerteten Systemkonzepte erfolgen. Insbesondere Simulationen mit realen Messreihen des Prozessgasbedarfs steigern dabei die Aussagekraft der Ergebnisse.
- Eine Optimierung des Brennstoffzellen-Konzepts durch die Erweiterung um einen Wasserstoffspeicher verspricht aus ökonomischer Sicht deutliche Verbesserungen. Daher ist in folgenden Arbeiten eine optimierte Auslegung des Brennstoffzellen-Konzepts sowie eine Bewertung desselben auf der Grundlage einer Simulationsstudie durchzuführen.

Literaturverzeichnis

- [1] Bedienungs- und Wartungsanleitung WASSERSTOFF / SAUERSTOFF GENERATOR Line H04 Modell G24 – G32.
- [2] Z. Abdin, C. J. Webb, und E. MacA. Gray. Modelling and simulation of a proton exchange membrane (PEM) electrolyser cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(39):13243–13257, October 2015. ISSN 0360-3199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.129. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915019321>.
- [3] Ernesto Amores, Jesús Rodríguez, und Christian Carreras. Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(25):13063–13078, August 2014. ISSN 0360-3199. doi: 10/f6gzxj. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914019120>.
- [4] Antonio J. Barragan, Juan M. Enrique, Francisca Segura, und Jose M. Andujar. Iterative Fuzzy Modeling of Hydrogen Fuel Cells by the Extended Kalman Filter. *IEEE Access*, 8:180280–180294, 2020. ISSN 2169-3536. doi: 10/gjnk8h. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/9154375/>.
- [5] C. Y. Biaku, N. V. Dale, M. D. Mann, H. Salehfar, A. J. Peters, und T. Han. A semiempirical study of the temperature dependence of the anode charge transfer coefficient of a 6kW PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(16):4247–4254, August 2008. ISSN 0360-3199. doi: 10/fkhj5k. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908007118>.
- [6] BNA. Bundesnetzagentur - Veröffentlichung von EEG-Registerdaten, May 2021. URL https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html.
- [7] Dipl-Ing Thilo Bocklisch. Optimierendes Energiemanagement von Brennstoffzelle-Direktspeicher-Hybridsystemen. April 2010. URL [https://monarch.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf\[id\]=https%3A%2F%2Fmonarch.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A19281%2Fmets](https://monarch.qucosa.de/landing-page/?tx_dlf[id]=https%3A%2F%2Fmonarch.qucosa.de%2Fapi%2Fqucosa%253A19281%2Fmets).
- [8] Jörn Brauns und Thomas Turek. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review. *Processes*, 8(2):248, 2020. doi: 10/gjh7mg. Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- [9] B. Butz, R. Schneider, D. Gerthsen, M. Schowalter, und A. Rosenauer. Decomposition of 8.5mol.% Y2O3-doped zirconia and its contribution to the degradation of ionic conductivity. *Acta Materialia*, 57(18):5480–5490, October 2009. ISSN 1359-6454. doi: 10/b2tc8h. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645409004790>.
- [10] Sachin Chugh, Chinmay Chaudhari, Kapil Sonkar, Alok Sharma, G.S. Kapur, und S.S.V. Ramakumar. Experimental and modelling studies of low temperature PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15):8866–8874, March 2020. ISSN 03603199. doi: 10/gjnx37. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031992030077X>.
- [11] Symphony Energy Co.LTD. SE6M60 Series - Polycrystalline Solar Module by Symphony Energy Co.LTD. URL <https://energy-xprt.com/products/model-se6m60-series-polycrystalline-solar-module-227605>.
- [12] Bundesregierung Deutschland. Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045. URL <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>.
- [13] DWD. Historische Wetterdaten, Deutschland; Wetterstation Aachen-Orsbach (Kennung: 15000), . URL https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/air_temperature/historical/.
- [14] DWD. Klimaberatungsmodul; TRY15 (Bezugskordinaten: 50,7931° N 6,0546° O), . URL <https://kunden.dwd.de/obt/index.jsp>.
- [15] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren. URL <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>.
- [16] E.ON Energie. Gewerbegas vergleichen: Günstig, schnell, 100% sicher, May 2021. URL <https://www.eon.de/de/gk/erdgas/gewerbegas.html>.
- [17] E.ON Energie. Ihr Industriestrom 2021: Preisvergleich für Unternehmen, May 2021. URL <https://www.eon.de/de/gk/strom/industriestrom.html>.
- [18] Ing A. Engler, J. Bard, und M. Viotto. Wechselrichter für die Netzkopplung von Brennstoffzellen.
- [19] D. S. Falcão und AMFR Pinto. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. *Journal of Cleaner Production*, 261:121184, 2020. doi: 10/gg47r5. Publisher: Elsevier.
- [20] R. García-Valverde, N. Espinosa, und A. Urbina. Simple PEM water electrolyser model and experimental validation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2):1927–

- 1938, January 2012. ISSN 03603199. doi: 10/dqz2nr. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319911021380>.
- [21] gpaNRW. Kalkulatorischer Zinssatz 2020 | gpaNRW, May 2021. URL <https://gpanrw.de/aktuelles/aktuelle-meldungen/hinweise-zum-kalkulatorischen-zinssatz-2020>.
- [22] Giulio Guandalini, Stefano Campanari, und Gianluca Valenti. Comparative assessment and safety issues in state-of-the-art hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(42):18901–18920, November 2016. ISSN 0360-3199. doi: 10/f89dfv. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916302592>.
- [23] S. Ahmad Hajimolana, M. Azlan Hussain, W.M. Ashri Wan Daud, M. Soroush, und A. Shamiri. Mathematical modeling of solid oxide fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4):1893–1917, May 2011. ISSN 13640321. doi: 10/fjt73q. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032110004466>.
- [24] M. Hammoudi, C. Henao, K. Agbossou, Y. Dubé, und M.L. Doumbia. New multi-physics approach for modelling and design of alkaline electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(19):13895–13913, October 2012. ISSN 03603199. doi: 10/f4c8jg. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031991201590X>.
- [25] Jan Hauth. Grey-Box Modelling for Nonlinear Systems. 2008. URL <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/2045>.
- [26] J. Herrmann. *Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Potential von klein-Blockheizkraftwerken = Efficiency, Economics and Potential of mini Combined Heat and Power Units*. PhD thesis, Universität Augsburg Augsburg, 2006. URL https://pure.mpg.de/pubman/faces/ViewItemOverviewPage.jsp?itemId=item_2143924.
- [27] K. Jiao und M. Ni. Challenges and opportunities in modelling of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). *International Journal of Energy Research*, 41(13):1793–1797, October 2017. ISSN 0363907X. doi: 10/gjnx9v. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/er.3798>.
- [28] Christian Herbert Jungbluth. *Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen in Wohngebäuden im zukünftigen Energiesystem*. PhD thesis, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, April 2012. URL <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/4240>. ISBN: 9783893364695.
- [29] Matthias Koj. Entwicklung und Charakterisierung von Elektroden für die Sauerstoffentwicklung in der alkalischen Wasserelektrolyse. February 2021. doi: 10.21268/20210202-2. URL https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00001680.

- [30] Umberto Lucia. Overview on fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30: 164–169, February 2014. ISSN 13640321. doi: 10/f5swt6. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113006965>.
- [31] S. Mekhilef, R. Saidur, und A. Safari. Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1):981–989, January 2012. ISSN 1364-0321. doi: 10/d2sbhv. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004709>.
- [32] Sarah Milanzi, Carla Spiller, Benjamin Grosse, Lisa Hermann, und Joachim Müller-Kirchenbauer. Technischer Stand und Flexibilität des Power-to-Gas-Verfahrens. August 2018. doi: 10/gjnmdv. URL <https://zenodo.org/record/2620253>. Publisher: Zenodo Version Number: V01.
- [33] Jaroslaw Milewski, Giulio Guandalini, und Stefano Campanari. Modeling an alkaline electrolysis cell through reduced-order and loss-estimate approaches. *Journal of Power Sources*, 269:203–211, December 2014. ISSN 03787753. doi: 10/gjvnbb. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775314010027>.
- [34] Marco Miotti, Johannes Hofer, und Christian Bauer. Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1):94–110, January 2017. ISSN 0948-3349, 1614-7502. doi: 10/f9kncx. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11367-015-0986-4>.
- [35] Dirk Müller. Vorlesung "Energiewirtschaft", Dynamische Investitionsrechnung, April 2020.
- [36] Souleman Njoya Motapon, Olivier Tremblay, und Louis A. Dessaint. Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation. *International Journal of Power Electronics*, 4(6):505, 2012. ISSN 1756-638X, 1756-6398. doi: 10/gj3fcx. URL <http://www.inderscience.com/link.php?id=52427>.
- [37] A. G. Olabi, Tabbi Wilberforce, Enas Taha Sayed, Khaled Elsaid, und Mohammad Ali Abdelkareem. Prospects of Fuel Cell Combined Heat and Power Systems. *Energies*, 13(16):4104, January 2020. doi: 10/gjnx38. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/16/4104>. Number: 16 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [38] Pierre Olivier, Cyril Bourasseau, und Pr. Belkacem Bouamama. Low-temperature electrolysis system modelling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78:280–300, October 2017. ISSN 1364-0321. doi: 10/gbsxvk. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211730432X>.
- [39] Periodensystem-online. Dichtewerttabelle anzeigen - Das Periodensystem online, . URL <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=lists&form=Dichtewerte&sst=6>.

-
- [40] Periodensystem-online. Dichtewerttabelle anzeigen - Das Periodensystem online, . URL <http://www.periodensystem-online.de/index.php?id=lists&form=Dichtewerte&sst=5>.
- [41] Md Mamoon Rashid, Mohammed K. Al Mesfer, Hamid Naseem, und Mohd Danish. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 4 (3):2249–8958, 2015.
- [42] U. B. A. Redaktionsassistentz 2. *CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*. Umweltbundesamt, September 2016. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-emissionsfaktoren-fuer-fossile-brennstoffe>.
- [43] Regionetz. Gasabrechnung G 685 | Regionetz. URL <https://www.regionetz.de/privatkunden/gasanschluss/gasabrechnung-g-685/>.
- [44] Gerhard Reich und Marcus Reppich. Grundlagen zur Bewertung von Energiesystemen. *Regenerative Energietechnik*, pages 31–60, 2018. doi: 10/gjppqg4. URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-20608-6_2. Publisher: Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [45] Jesús Rodríguez und Ernesto Amores. CFD Modeling and Experimental Validation of an Alkaline Water Electrolysis Cell for Hydrogen Production. *Processes*, 8(12):1634, December 2020. doi: 10/gjnkf8. URL <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/12/1634>. Number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- [46] Elke Örtl. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019*. Umweltbundesamt, April 2020. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-6>.
- [47] Wladimir Schamai. *Modelica Modeling Language (ModelicaML) : A UML Profile for Modelica*. Linköping University Electronic Press, 2009. URL <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-20553>.
- [48] Jacques Schill. *Vergleich verschiedener Methoden zur Speicherung von Wasserstoff*. Thesis, Wien, 2018. URL <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/7649>. Accepted: 2020-06-29T17:24:54Z Journal Abbreviation: Comparison of different methods for hydrogen storage.
- [49] Günter Schiller, Asif Ansar, und Olaf Patz. High Temperature Water Electrolysis Using Metal Supported Solid Oxide Electrolyser Cells (SOEC). *Advances in Science and Technology*, 72:135–143, October 2010. ISSN 1662-0356. doi: 10/dnsghx. URL <https://www.scientific.net/AST.72.135>.

- [50] Jonas Sjöberg, Qinghua Zhang, Lennart Ljung, Albert Benveniste, Bernard Deylon, Pierre-Yves Glorennec, Håkan Hjalmarsson, und Anatoli Juditsky. *Nonlinear Black-Box Modeling in System Identification: a Unified Overview*. Linköping University, 1995. URL <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-55254>.
- [51] J. P. Stempien, Q. Sun, und S. H. Chan. Solid Oxide Electrolyzer Cell Modeling: A Review. *Journal of Power of Technologies*, Vol. 93(nr 4), 2013. ISSN 1425-1353. URL <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-48815965-a9b4-4185-9caa-ffd04b51a12e>.
- [52] Peter Tabeling. *Softwaresysteme und ihre Modellierung: Grundlagen, Methoden und Techniken*. Springer-Verlag, January 2006. ISBN 978-3-540-29276-0. Google-Books-ID: t4ouBAAAQBAJ.
- [53] Geert Hauke Tjarks. *PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen*, volume RWTH Aachen University. RWTH Aachen University, 2017. doi: 10.18154/RWTH-2017-04470. URL <http://publications.rwth-aachen.de/record/689617>. Artwork Size: pages IV, 135 Seiten : Illustrationen, Diagramme ISSN: 1866-1793 Pages: pages IV, 135 Seiten : Illustrationen, Diagramme Publication Title: Dissertation.
- [54] Alexander Tremel. Electrolysis—Fundamental Technologies, Requirements and Current Status. In Alexander Tremel, editor, *Electricity-based Fuels*, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, pages 19–31. Springer International Publishing, Cham, 2018. ISBN 978-3-319-72459-1. doi: 10.1007/978-3-319-72459-1_2. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-72459-1_2.
- [55] Aleksey Trubitsyn, Brandon J. Pierquet, Alexander K. Hayman, Gareth E. Gamache, Charles R. Sullivan, und David J. Perreault. High-efficiency inverter for photovoltaic applications. In *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 2803–2810, Atlanta, GA, September 2010. IEEE. ISBN 978-1-4244-5286-6. doi: 10/b57pmg. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/5618163/>.
- [56] Øystein Ulleberg. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1):21–33, January 2003. ISSN 0360-3199. doi: 10/b8s496. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319902000332>.
- [57] Jan Von Appen, Balthasar Burgenmeister, und Martin Braun. Optimale Dimensionierung von PV-Speicher-Systemen unter Unsicherheit. In *30. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, 2015.
- [58] John Webster und Carsten Bode. Implementation of a Non-Discretized Multiphysics PEM Electrolyzer Model in Modelica. pages 833–840, February 2019. doi:

- 10/gjvtn2. URL https://ep.liu.se/en/conference-article.aspx?series=ecp&issue=157&Article_No=88.
- [59] Dr Harry Wirth. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland - Fraunhofer ISE. URL <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>.
- [60] Yulin Yan, Q. Fang, L. Blum, und W. Lehnert. Performance and degradation of an SOEC stack with different cell components. *Electrochimica acta*, 258:1254–1261, 2017. doi: 10/gcqc6j. Publisher: Elsevier.

Anhang

A Parametrierung der Modelle

Alkalischer Elektrolyseur

Vom Hersteller ist die maximale Wasserstoffproduktion mit 21,33 Nmc/h angegeben [1, S. 50], dies entspricht 0,2643 mol/s. Über den Zusammenhang der von i und \dot{n}_{H_2} (Gleichung 2.20) und der maximalen Stromdichte von 0,5 A/cm² wird daher eine Zellfläche von 10,2 m² angenommen.

Die Elektrolyt-Konzentration ist mit 20 % angegeben [1, S. 36], was bei Natronlauge 6,095 mol/l entspricht [40]

Für den Parameter α wurde der von Milewski et al. [33] für die Kathode angegebene Wert verwendet. Weil Milewski et al. [33] die Aktivierungsverluste mit dem Faktor 2,3026 multipliziert, ist der verwendete Wert für α wie folgt bereinigt:

$$\begin{aligned}\frac{1}{\alpha} &= \frac{2,3026}{\alpha_{milewski}} \\ \alpha &= \frac{\alpha_{milewski}}{2,3026} \\ &= \frac{0,39}{2,3026} = 0,17\end{aligned}$$

PEM-Brennstoffzelle

Die Zellfläche der Brennstoffzelle wurde aus der Zellfläche des Elektrolyseurs und dem Verhältnis der maximalen Stromdichte abgeleitet:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{H_2, Brennstoffzelle} &= \dot{n}_{H_2, Elektrolyseur} \\ A_{Brennstoffzelle} &= A_{Elektrolyseur} \cdot \frac{i_{max, pem}}{i_{max, alk}} \\ &= 10,2 \text{ m}^2 \cdot \frac{2 \text{ A/cm}^2}{0,5 \text{ A/cm}^2} \\ &= 2,55 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Nach den Simulationsergebnisse liegt die maximale elektrische Leistung der Brennstoffzelle bei 24,475 kW.

Der Parameter C_{th} ist Webster und Bode [58] entnommen und wurde über die Zellfläche

skaliert:

$$\begin{aligned}C_{th} &= C_{th,webster} \cdot \frac{A}{A_{webster}} \\&= 14,97 \text{ W/K} \cdot \frac{2,55 \text{ m}^2}{1,74 \text{ m}^2} \\&= 21,94 \text{ W/K}\end{aligned}$$

B Systemkonzepte

Gasbedarf

Für die Monate Juni bis August wird angenommen, dass keine Heizwärme benötigt wird. Der maximale Gasverbrauch eines Tages in diesem Zeitraum liegt bei $18,8 \text{ m}^3 \cdot 11,4 \text{ kWh/m}^3 = 214,32 \text{ kWh/m}^3$ (Brennwert 2020 nach Gasabrechnung G 685 - Regionetz [43]).

Von dem Tagesgasverbrauch wird dieser Wert abgezogen und das Ergebnis als zum Heizen benötigte Gasmenge pro Tag angenommen (Weil der Elektrolyseur und die Brennstoffzelle ausschließlich während der Arbeitszeit (ca. 6.30-16.30) betrieben werden, wird ausschließlich die Gasmenge während der Arbeitszeit in Betracht gezogen).

Prozessgasverbrauchswerte

Wasserstoff und Sauerstoff wurden vom Kunden in Bündeln je 12 Flaschen mit einem Volumen von 50 l und einem Druck von 300 bar gekauft (In Tabelle B.1 sind die Einkaufsmengen für die Jahre 2018 und 2019 angegeben). Nach dem idealen Gas Gesetz ergeben sich daraus die angegebenen Stoffmengen bei der Standardtemperatur von 298,15 K.

Tabelle B.1: Gekaufte Menge an Wasserstoff und Sauerstoff für die Jahre 2018 und 2019.

	Anzahl an Bündeln	Stoffmenge
Wasserstoff 2018	105	775 420 mol
Sauerstoff 2018	86	635 106 mol
Wasserstoff 2019	66	487 407 mol
Sauerstoff 2019	47	347 093 mol

Zur Berechnung des Jahressauerstoffbedarfs der Datensätze wird die tägliche Bedarfszeit mit der Anzahl der Arbeitstage im Jahr (mit 245 angenommen) und der durchschnittlichen Stoffmengenproduktion ($0,2643 \text{ mol/s} \cdot 75 \% / 2 = 0,0991 \text{ mol/s}$ für Sauerstoff und $0,2643 \text{ mol/s} \cdot 75 \% = 0,1982 \text{ mol/s}$ für Wasserstoff) multipliziert.

Tabelle B.2: Berechnung des Jahressauerstoff- und wasserstoffverbrauchs für Datensätze 1 und 2.

	tägliche Bedarfszeit	Jahresverbrauch	Abweichung zum Realwert
Datensatz 2018 H_2	4 h, 30 min	786 775 mol	1,5 %
Datensatz 2018 O_2	7 h, 15 min	633 775 mol	0,2 %
Datensatz 2019 H_2	2 h, 45 min	480 795 mol	0,5 %
Datensatz 2019 O_2	4 h	349 669 mol	0,7 %

C Parameter zur Berechnung des Kapitalwerts

Tabelle C.1: Parameter der Kapitalwertberechnung.

Kalkulationszeitraum	n	20 a [57]
Kalkulatorischer Zinssatz	r	5,56 % [21]
Strompreis	$z_{\text{netzbezug}}$	22,26 ct/kWh [17]
Einspeisevergütung	$z_{\text{einspeisung}}$	7,65 ct/kWh [6]
Gaspreis	z_{gas}	4,89 ct/kWh [16]
Investitionskosten der PV-Anlage	I_{PV}	80.352 € Von Appen et al. [57]
Jährliche Wartungskosten der PV-Anlage	Z_{PV}	1.205 € Von Appen et al. [57]
Investitionskosten der Brennstoffzelle	I_{BZ}	33.286 € [28]
Jährliche Betriebskosten der Brennstoffzelle	z_{BZ}	2,02 ct/kWh [28]
Speicherkosten pro Kilogramm Wasserstoff	z_{Speicher}	891 €/kg [48]

Der Betrachtungszeitraum wird, wie auch bei Von Appen et al. [57] auf 20 Jahren angesetzt. Als kalkulatorische Zinssatz wird der in [21] für das Jahr 2020 als Obergrenze angegebene Wert übernommen. Der Strom- und Gaspreis sind Energie [17] (für einen Jahresbedarf von 866,860 kWh) und Energie [16] (für einen Jahresbedarf von 27,224 kWh) entnommen. Die Einspeisevergütung ergibt sich aus den Angaben der Bundesnetzagentur [6] für Solarstromanlagen mit einer Peakleistung bis zu 40 kWh (Installation ab dem 01.07.2021).

Von Appen et al. [57, S.3] geben als Investitionskosten für PV-Anlagen bezogen auf die installierte Fläche: 150 €/m² an. Mit 372 Module a 1,44 m² ergeben sich Investitionskosten von 150 €/m² · 1,44 m² · 372 = 80,352 €. Die jährliche Wartungskosten liegen nach Von Appen et al. [57] bei 1,5 % der Investitionskosten.

Die Investitionskosten der Brennstoffzelle betragen nach Jungbluth [28, S. 74] 1360 €/kW bei einer elektrischen Peakleistung von 24,475 kW (Maximalwert der Brennstoffzellen-Ausgangsleistung der Simulation). Die Betriebskosten gibt er mit $z_{BZ} = 2,02 \text{ ct/kWh}$ an (Nach den Simulationsergebnissen beträgt die Jahresleistung der Brennstoffzelle 12.857 kWh für 2018 beziehungsweise 5.858 kWh für 2019).

Speicherkosten für Wasserstoff liegen nach Schill [48] zwischen 10 bis 30 €/kWh bezogen auf den Brennwert. Daraus ergeben sich Speicherkosten von $\frac{15 \text{ €/kWh} \cdot \Delta H_R^0}{M_{H_2}} = 594 \text{ €/kg}_{H_2}$.

Da bei Konzept 4 ein Speicher für H₂ und O₂ im Stoffmengenverhältnis 2 : 1 benötigt wird, werden spezifische Speicherkosten von $z_{\text{Speicher}} = 1,5 \cdot \frac{15 \text{ €/kWh} \cdot \Delta H_R^0}{M_{H_2}} = 891 \text{ €/kg}_{H_2}$ angenommen.

Für die Überschlagsrechnung des optimierten Brennstoffzellen-Konzepts wird von einer Maximalleistung von $24,475 \text{ kW} \cdot 11,5 \% = 2,8 \text{ kW}$ gerechnet. Nach Jungbluth [28, S. 74] ergeben sich dafür spezifischen Investitionskosten von 1.875 €.

D Parameter zur Berechnung der CO₂-Einsparungen

Tabelle D.1: Parameter der CO₂-Einsparungen.

CO ₂ Faktor Strommix	m_{Strom}	401 g/kWh [46]
CO ₂ Faktor Erdgas	m_{Gas}	201,24 g/kWh [42]
CO ₂ PV-Strom	m_{PV}	50 g/kWh [59, S. 48]
CO ₂ Brennstoffzelle	m_{BZ}	38,8 kg/a [34]

Für den CO₂ Faktor des Deutschen Strommix wurden Daten aus 2019 verwendet [46]. Die spezifischen CO₂-Emissionen von Erdgas lagen in Deutschland zwischen 2005-2014 bei konstant 55,9 tonne-CO₂/TJ [42] was umgerechnet 201,24 g h/kW ergibt.

Für die Herstellung der PV-Anlage und der Brennstoffzelle wurden Angaben für die Emissionen von CO₂-Äquivalent verwendet. Im Falle der PV-Anlage wurden die durchschnittlichen Emissionen von Deutschem PV-Strom verwendet. Die Emissionen bei der Herstellung von Brennstoffzellen liegen nach Miotti et al. [34] bei 2,47 t bei einer Anlage mit einer elektrischen Leistung von 80 kW. Die spezifischen CO₂-Emissionen betragen demnach 30,9 kg/kW, wonach die in den Systemkonzepten eingesetzt Brennstoffzelle bei der Herstellung 756,3 kg-CO₂-Äquivalent verursacht. Für die Berechnung der CO₂-Einsparungen wird dieser Wert auf die angenommene Lebensdauer (20 a) aufgeteilt.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit in der Lehrstuhlbibliothek und Datenbank aufbewahrt und für den internen Gebrauch kopiert werden darf.

Aachen, 25. Mai 2021

Tobias Jonathan Boschmann