
DIPLOMARBEIT

Herr Ing.
Siegfried Puster

Möglichkeiten und Grenzen der Wasserstofftechnologie im Industrie Bereich

Mittweida, 2022

Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen

DIPLOMARBEIT

Möglichkeiten und Grenzen der Wasserstofftechnologie im Industrie Bereich

Autor:
Herr Ing.

Siegfried Puster

Studiengang:
Wirtschaftsingenieurwesen

Seminargruppe:
KW18sGA

Erstprüfer:
Prof. Dr. rer. pol. Andreas Schmalfuß

Zweitprüfer:
Prof. Dr. rer. oec. Johannes N. Stelling

Einreichung:
Mittweida, 14.03.2022

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2022

Faculty Industrial Engineering

DIPLOMTHESIS

Possibilities and Limits of Hydrogen-Technology in the Industrial Sector

author:

Mr. Ing.

Siegfried Puster

course of studies:

Wirtschaftsingenieurwesen

seminar group:

KW18sGA

first examiner:

Prof. Dr. rer. pol. Andreas Schmalfuß

second examiner:

Prof. Dr. rer. oec. Johannes N. Stelling

submission:

Mittweida, 14.03.2022

defence/ evaluation:

Mittweida, 2022

Bibliografische Beschreibung:

Puster, Siegfried:

Möglichkeiten und Grenzen der Wasserstofftechnologie im Industrie Bereich. - 2022. - 9, 62, 5 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen, Diplomarbeit, 2022

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten und Grenzen der Wasserstofftechnologie im Industrie Bereich. In der Einleitung wird die aktuelle globale Lage des Weltklimas erläutert und welche Auswirkung eine erhöhte Temperatur mit sich bringt. Der Hauptfokus dieser Arbeit liegt in der Recherche und Aufarbeitung von jetzigen und möglichen zukünftigen Geschäftsmodellen mit der Anwendung von grünem Wasserstoff. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird in eine Rentabilitätskostenrechnung der Gestehungskosten von grünem Wasserstoff gegen fossile Energieträger gegenübergestellt. Zuletzt werden die kommerziell möglichen Anwendungsbereiche erläutert.

Inhalt

Inhalt

1	Einführende Bemerkungen.....	9
1.1	<i>Einführung in die Problemstellung.....</i>	9
1.2	<i>Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes.....</i>	11
1.3	<i>Gang der Untersuchung.....</i>	12
2	Energiesektoren und mögliche Synergien.....	14
2.1	<i>Zielvorgabe der Politik.....</i>	15
2.2	<i>Einhaltung der Zwei Grad Obergrenze.....</i>	18
2.3	<i>Treibhausgase.....</i>	22
2.4	<i>Begrenztheit und Nachhaltigkeit von fossilen Energieträgern.....</i>	23
2.5	<i>Wasserstoff als grüner Energieträger.....</i>	25
2.5.1	<i>Grüner Wasserstoff.....</i>	26
2.5.2	<i>Grauer Wasserstoff.....</i>	28
2.5.3	<i>Blauer Wasserstoff.....</i>	28
2.5.4	<i>Türkiser Wasserstoff.....</i>	28
3	Geschäftsmodelle in den Wirtschaftswissenschaften.....	29
3.1	<i>Ziele der Geschäftsmodelle.....</i>	30
3.2	<i>Geschäftsmodelltheorie von Osterwalder und Pigneur.....</i>	30
3.2.1	<i>Baustein „Kunde“ im CANVAS Model.....</i>	32
3.2.2	<i>Baustein „Nutzwversprechen“ im CM.....</i>	32
3.2.3	<i>Baustein „Kanäle“ im CM.....</i>	34
3.2.4	<i>Baustein „Kundenbeziehung“ im CM.....</i>	35
3.2.5	<i>Baustein „Einnahmequelle“ im CM.....</i>	35
3.2.6	<i>Baustein „Schlüsselressourcen“ im CM.....</i>	36
3.2.7	<i>Baustein „Schlüsselaktivitäten“ im CM.....</i>	36
3.2.8	<i>Baustein „Schlüsselpartnerschaft“ im CM.....</i>	36
3.2.9	<i>Baustein „Kostenstruktur“ im CM.....</i>	36
4	Ökologische Merkmale von grünem Wasserstoff.....	38
4.1	<i>Umwandlungsmethoden für grünen Wasserstoff.....</i>	38
4.1.1	<i>Elektrolytisches Verfahren zu Wasserstofferzeugung.....</i>	39

4.1.2	Biologische Verfahren zur Wasserstoffgewinnung.....	40
4.2	<i>Konventionelle Kraftwerke zur Elektrizitätsgewinnung.....</i>	<i>40</i>
4.3	<i>Kraftwerk mit erneuerbarer Energie.....</i>	<i>42</i>
4.4	<i>Fallbeispiele zur Herstellung von grünem Wasserstoff.....</i>	<i>43</i>
4.4.1	Erläuterung Wasserstoffgestehungskosten	43
4.4.2	Erläuterung Wasserstoffgestehungskosten unter Berücksichtigung der Kapitalwertmethode.....	43
4.4.3	Fallbeispiel 1: Dezentrale Anlage mit Photovoltaik 20 Jahre.....	44
4.4.4	Fallbeispiel 2: Dezentrale Wasserstoffherstellung Laufzeit 20 Jahre mit Windenergie Onshore.	48
4.5	<i>Ableitung Nutzversprechen aus Fallbeispiel 1 und 2</i>	<i>49</i>
5	Analyse Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff	51
5.1	<i>Marktteilnehmer in einer grünen H₂-Ökonomie</i>	<i>52</i>
5.2	<i>Geschäftsfelder als Basis für Modelle</i>	<i>53</i>
5.2.1	Geschäftsfeld: Herstellung von Wasserstoff	55
5.2.2	Geschäftsfeld: Infrastruktur mit grünem Wasserstoff	56
5.2.3	Geschäftsfeld: Anwendungen von Wasserstoff	57
6	Wasserstoff im Mobilitätssektor	61
6.1.1	Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr	61
6.1.2	Wasserstoff im Schienenverkehr	62
6.1.3	Wasserstoff im PKW Bereich.....	63
6.1.3.1	Brennstoffzellenfahrzeug versus Elektrofahrzeug versus konventionelles betriebenes Fahrzeug	64
6.1.3.2	Anwendung einer SWOT Analyse Im Vergleich ICE vs. FCEV vs. BEV	66
6.1.3.3	Fallbeispiel Energieverbrauch ökologische Betrachtung.....	67
6.1.3.4	Trends bei E – Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen	71
7	Ausblick der aktuellen Marktentwicklung mit grünem Wasserstoff	72
7.1	<i>Zusammenfassung und Fazit</i>	<i>73</i>
7.2	<i>Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....</i>	<i>74</i>
8	Selbstständigkeitserklärung.....	76
9	Literaturverzeichnis	77

Abkürzungsverzeichnis:

A

AEL *Alkalische Elektrolyse*

B

BEV *Battery Electric Vehicle*

BZ *Brennstoff Zellen*

bzw. *beziehungsweise*

C

ca. circa

CH₄ *Methan*

CM *CANVAS Model*

CO₂ *Kohlenstoffdioxid*

F

FCEV *Fuel Cell Electric Vehicle*

FKW *Fluorkohlenwasserstoffe*

G

GA *Geschäftsangebot*

G-M *Geschäftsmodell*

I

ICE *internal combustion engine*

IRENA *International Renewable Energy Agency*

K

KWK *Kraft Wärme Kopplung*

L

LKW *Last Kraft Wagen*

M

MA	<i>Marktangebot</i>
MSFC	<i>MID Size Fuel Cell</i>

N

NF3	<i>Stickstofftrifluorid</i>
-----------	-----------------------------

O

OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
ÖNV	<i>Öffentlicher Nahverkehr</i>
OPEC	<i>Organization of the Petroleum Exporting Countries</i>

P

PEE	<i>Primär Energie Inhalt</i>
PEM	<i>proton exchange membrane</i>
PKW	<i>Personen Kraft Wagen</i>
PtG	<i>Power to Gas</i>
PtL	<i>Power to Liquid</i>

S

SF6	<i>Schwefelhexafluorid</i>
SOEC	<i>solid oxide electrolyzer cell</i>

T

TEI	<i>Total Environmental Impact</i>
-----------	-----------------------------------

U

UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
usw	<i>und so weiter</i>
uvm	<i>und vieles mehr</i>

W

WSW	<i>Wuppertaler Stadtwerke</i>
-----------	-------------------------------

Z

z.B.zum Beispiel

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Meilensteine Nachhaltiger Entwicklungen	17
Tabelle 2: Elemente des Geschäftsmodell nach Osterwald/Pigneur	31
Tabelle 3: Nutzversprechen mit grünem H ₂	34
Tabelle 4: Kennzahlen der Elektrolyseverfahren	40
Tabelle 5: Eckdaten konventionelle Kraftwerke	41
Tabelle 6: Eckdaten regenerative Kraftwerke	43
Tabelle 7: Fallstudie Kosten Elektrolyse Laufzeit 20 Jahre	45
Tabelle 8: Fallstudie Kosten Verdichter Laufzeit 20Jahre	46
Tabelle 9: Fallstudie Gesamtkosten in €.....	47
Tabelle 10: Fallstudie Vergleich Herstellkosten H ₂ vs. Benzin	47
Tabelle 11: Energiegestehungskosten für H ₂	47
Tabelle 12: Nutzversprechen H ₂	50
Tabelle 13: H ₂ Unternehmungen	53
Tabelle 14: Geschäftsmodelle für Geschäftsfeld Infrastruktur	56
Tabelle 15: Geschäftsfeld Sektoren Anwendungen von grünen H ₂	58
Tabelle 16 : Geschäftsmodelle Mobilität	59
Tabelle 17: Stationäre GM Anwendungen	60
Tabelle 18: Länge der nicht elektrifizierten Bahnstrecke Staatenvergleich	62

Inhalt	VI
<hr/>	
Tabelle 19: PEE und TEI Berechnung für ein Benzinfahrzeug.....	68
Tabelle 20: PEE und TEI Berechnung für ein BEV fossil Fahrzeug	68
Tabelle 21: PEE und TEI Berechnung für ein BEV EEQ PV	68
Tabelle 22: PEE Und TEI Berechnung FCEV fossil.....	68
Tabelle 23: PEE und TEI Berechnung FVEV EEQ PV.....	69
Tabelle 24: ökologisches Ergebnisse Fallbeispiel.....	69
Tabelle 25: ökonomisches Ergebnis Fallbeispiel	70
Tabelle 26: Vergleich Nutzversprechen ICE/BEV/FCEV.....	70

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Primärenergieverbrauch nach Energieträgerin Joule 2019/2020.....	10
Abbildung 2 :Primärenergieverbrauch nach Energieträgerin Prozent 2019/2020.....	11
Abbildung 3: Gang der Arbeit eigene Darstellung.....	13
Abbildung 4 Die Transformation des Stromsystems schematische Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge.....	15
Abbildung 5: CO2 Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2020.....	19
Abbildung 6 Co2 Ausstoß (in Millionen Tonnen) der EU mit den Zielen der Klimakonferenz Ende 2021 in Paris	19
Abbildung 7 Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren	20
Abbildung 8: Energiebedingte CO2-Emissionen nach Ländern im Jahr 2018 in Millionen Tonnen.....	21
Abbildung 9: Anomalien der durchschnittlichen Kontinental-Temperaturen auf globaler Ebene.....	22

Abbildung 10 : Das Drei-Säulen-Modell, Dreiklang-Modell und integratives Nachhaltigkeitsdreieck	24
Abbildung 11: Schematische Funktionsweise von PtG und PtL.....	26
Abbildung 12: Grüne Herstellungsprozesse für H ₂	27
Abbildung 13: Geschäftsmodell Charakteristika	29
Abbildung 14: Business Model nach Canvas.....	32
Abbildung 15: Schnittmenge Value Proposition	32
Abbildung 16: Kanaltypen und Kanalphasen	35
Abbildung 17 : Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff.....	39
Abbildung 18 Energieflussschema eines Kohlekraftwerks mit Anwendungsbeispiel	42
Abbildung 19: Geschäftsfelder mit grünem H ₂	54
Abbildung 20: Geschäftsfelder der H ₂ Erzeugung.....	55
Abbildung 21: Erklärung der Wertschöpfungskette von H ₂	57
Abbildung 22: Dominanter Brennstoffzellenantrieb	63
Abbildung 23: Range Extender Antrieb.....	64
Abbildung 24: Wirkungsgrad eines elektrischen Fahrzeuges.....	65
Abbildung 25: Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen Fahrzeuges	65
Abbildung 26: Wirkungsgradkette eines ICE (eigene Darstellung).....	66
Abbildung 27: Eigene Darstellung SWOT Analyse	67
 Formelverzeichnis:	
Formel 1: Wasserstoffgestehungskosten.....	43
Formel 2: Stromgestehungskosten.....	44

1 Einführende Bemerkungen

Die Wissenschaft ist sich mittlerweile sicher „Wasserstoff als grüner sekundärer nachhaltiger Energieträger“ hat und muss in Zukunft einen höheren Stellenwert in der Energieinfrastruktur bekommen. Es muss ein Umdenken stattfinden, denn unsere alten zentralen Energielieferanten werden heute noch zu oft mit fossilen Energieträgern befeuert. Die Zeit ist gekommen, um ein Umdenken zu fördern und den Ausbau von erneuerbaren Energie Systemen wie Wind- und Solarkraftwerken (PV Anlagen) einzuleiten. Es ist keine unübliche Situation in Europa, mit windstarken Tagen und gleichzeitiger hoher solarer Einstrahlung, dass mehr Energie erzeugt werden kann als Energieabnehmer am Markt sind. Somit müssen die erneuerbaren Energiehersteller gedrosselt werden, da es zu einem Überangebot sonst kommt. Dies führt dazu, dass die Netzkosten erhöht werden, da dies einen erhöhten Wartungsaufwand mit sich bringt. Es könnte aber in Zukunft mit Hilfe der neuen Technologien (Power to X --> Energieumwandlungsprozesse), neue Speichermethoden und effiziente Energiewandler genutzt werden können. Aus ökonomischer Sicht kann heute schon in gewissen Regionen der Welt erneuerbare Energie kostengünstiger hergestellt werden als mit konventionellen Kraftwerken (fossile Primärenergieträger). Positiv ist zurzeit das exponentielle Wachstum der erneuerbaren Kraftwerke speziell im europäischen Raum. Der ausschlaggebende ökonomische Punkt heißt „Stromgestehungskosten (englisch Levelized Cost of Electricity, LOCE), und genau dieser ist heute schon in vielen Teilen der Welt mit erneuerbaren Energiepotentialen bereits unter den Kosten von konventionellen Kraftwerksanlagen (Öl-, Kohle-, Gas-, Nuklearanlagen). Der Nachteil der erneuerbaren Energie ist, dass diese sehr volatil ist, und genau hier müssen dann Technologien entwickelt werden, welche diese Energiespitzen umwandeln können. Genau mit diesen Eigenschaften kann der grün erzeugte Wasserstoff punkten da er die Energie in ein speicherbares Medium verwandelt und gut transportierbar wäre. Im idealen Fall kann man den Wasserstoff gleich in das Gasnetz einspeisen oder in großen Gastavernen zwischenspeichern. Dies ist ein wichtiger Baustein, wenn H₂ als Bindeglied in die Energieinfrastruktur eingebunden wird und dann einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung beiträgt.¹

1.1 Einführung in die Problemstellung

In der Naturwissenschaft wird Energie mit der Fähigkeit gleichgesetzt, eine Wirkung zu zeigen. Die Fähigkeit von Energie sind externe Effekte zu erzeugen, z.B als mechani-

¹ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 23–26.

sche Arbeit, Wärme oder Licht.² Die Umwandlung einer Form von Energie in eine andere erfolgt in der Regel über thermische und chemische Prozesse. Die dabei wirkenden physikalischen Gesetze werden in den vier Hauptsätzen der Thermodynamik beschrieben.³ Über 85% der heute weltweit genutzten Energie werden unter Verwendung fossiler Energiequellen gewonnen. Der tägliche Verbrauch an Rohöl betrug 2019 99 986 Barrels, das entspricht 15 897 774 t Öl.⁴ Des Weiteren beträgt die jährliche Fördermenge an Kohle ca. 7575 Mt.⁵ Diese bedeutende Menge an fossilen Energieträgern werden für ein breites Spektrum an chemischen Umwandlungsprozessen benötigt. Das Resultat ist eine hohe Schadstoffbelastung der Umwelt speziell durch CO₂ als wesentliches klimarelevantes Treibhausgas.⁶ Der weltweite Jahresprimärenergiebedarf betrug 2019 ca. 600 Exajoule (Exa = 10¹⁸).

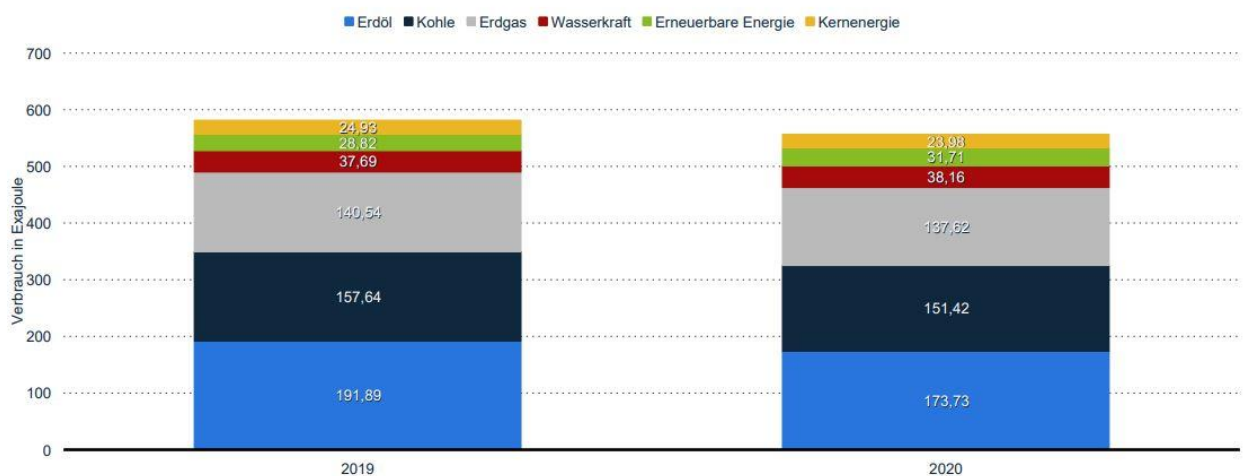


Abbildung 1: Primärenergieverbrauch nach Energieträger in Joule 2019/2020⁷

² Vgl. Osterhage 2019, S. 1–4.

³ Vgl. Baehr 2000, S. 9.

⁴ Vgl. Eni SpA 2021, S. 8.

⁵ Vgl. IEA 2021, S. 16.

⁶ Vgl. Hauck/Leuschner/Homeier 2019, S. 1–8.

⁷ Vgl. Statista, Energieverbrauch weltweit 2021, S. 11.

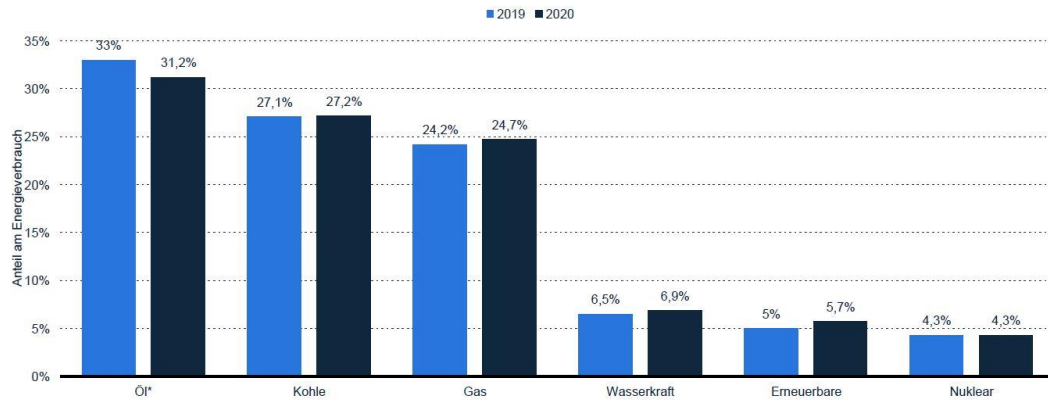


Abbildung 2 :Primärenergieverbrauch nach Energieträger in Prozent 2019/2020⁸

Fossile Energieträger (Kohle, Erdgas) werden oft in Kraftwerken verbrannt genauer gesagt wird chemische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Dieser Vorgang ist zwar sehr effizient, aber auch sehr umweltschädlich. Die Lösung wäre die fossilen Energieträger mit regenerativen Energieträgern zu ersetzen, da diese keine Treibhausgase freisetzen. Damit kommt man zum Schluss, dass in Zukunft die Grundlage der Energieversorgung die innovative und effiziente Energieumwandlung unter Verwendung erneuerbarer Energieträger ist. Die Abbildung 2 zeigt jedoch den Status „jetzt“, wo der Anteil der erneuerbaren Energie bei jeglichen 5,8% liegt. Der Outlook von IRENA befasst sich damit, wie die CO₂-Emissionen über 2050 hinaus auf Netto-Null und möglicherweise sogar auf null reduziert werden können. Synthetische Kraftstoffe und Wasserstoff, direkte Elektrifizierung, fortschrittliche Biokraftstoffe und Kohlenstoffmanagement sind neben innovativen Geschäftsmodellen, strukturellen Veränderungen und entsprechender Verhaltensanpassung von entscheidender Bedeutung.⁹

1.2 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, unterschiedliche Möglichkeiten für die Nutzung von Wasserstoff zu präsentieren und auf ihre Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit hin zu analysieren.

Anfangs wird auf politische Vorgaben in Bezug auf Umweltfaktoren eingegangen und einige wichtige Begriffe für diese Arbeit definiert. Anschließend wird die Theorie der Geschäftsmodelle allgemein beschrieben und im Detail Geschäftsmodelle mit Wasserstoff präsentiert. Deren Vor- und Nachteile werden beschrieben und deren Wirtschaftlichkeit wird jeweils anhand der Kapitalwertmethode verglichen. Diverse andere Energieträger

⁸ Vgl.ebd.

⁹ Vgl.La Francesco 2020, S. 2.

werden anhand der Gestehungskosten verglichen. Es werden die verschiedenen Herstellmethoden für Wasserstoff als Energieträger beschrieben, allerdings wird im weiteren Verlauf der Arbeit nur noch auf grünen Wasserstoff eingegangen. Um die Zielvorgaben der Politik einzuhalten, ist es notwendig sich auf grünen Wasserstoff zu konzentrieren und dessen Potentiale zu nutzen. Abschließend werden Möglichkeiten von Wasserstoff im Mobilitätssektor im Speziellen beleuchtet und ein Ausblick der aktuellen Marktentwicklung gegeben.

Die Arbeit basiert auf dem Wissensstand und den Erkenntnissen der Forschung auf diesem Gebiet bis zum Jahre 2022. Es ist anzunehmen, dass sich in Zukunft weitere oder andere Methoden entwickeln und sich neue Geschäftsfelder ergeben. Nach aktuellem Wissensstand ist eindeutig, dass die Rolle von Wasserstoff kein ultimativer "Gamechanger" ist und andere Primärenergiequellen ersetzen kann, auf dies wird in den nachfolgenden Kapiteln auch nicht eingegangen. Das große Potential ist jedoch im Bereich der Zwischenspeicherung von Strom und seiner Transportfähigkeit angesiedelt und es kann sicher beim Übergang zu einer CO₂ neutralen Energiewirtschaft helfen.

Es werden weder Berechnungen über Total Lifecycle Costs durchgeführt noch wird auf Umwelteinflüsse über den ganzen Lebenszyklus einer Anlage eingegangen. In dieser Arbeit wird außerdem nicht im Detail auf die weiterführenden Anwendungen von Wasserstoff (Power to X) eingegangen. Dies wäre ein mögliches Thema einer weiterführenden Arbeit auf diesem Gebiet.

1.3 Gang der Untersuchung

In dieser Arbeit wird versucht die charakteristischen Eigenschaften und möglichen Grenzen der Wasserstofftechnologie von schon vorhandenen und zukünftigen Geschäftsmodellen mit Fokus auf „grünem H₂“ zu erarbeiten und auf ihre Relevanz zu prüfen. Der Leitfaden, welcher sich durch diese Arbeit zieht, wurde mit folgenden Methoden erarbeitet:

- Statistische und mathematische Methoden werden verwendet, um Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Hier werden die ökonomische Sinnhaftigkeit und die Plausibilität geprüft.
- In weiten Teilen der Arbeit wurde auf Sekundärdaten zurückgegriffen welche die wirtschaftliche Betrachtung der Anwendbarkeit von grünem Wasserstoff beleuchten. Es wird mit Hilfe von Tabellenkalkulationen und Datenbanken auf Korrektheit und Plausibilität geprüft, ob eine Einführung einer H₂ Wirtschaft ökonomisch ist.
- Es werden Fallstudien eingesetzt, um Daten zu bestimmen und Problemstellungen zu beantworten

Ein Hauptfokus dieser Arbeit gilt dem Baustein „Value Proposition/Nutzversprechen“ mit den vier Bereichen (Kunde, Angebot, Ertrag und Infrastruktur), welcher in den Kapiteln 2-6 immer wieder ihre Anwendung findet.

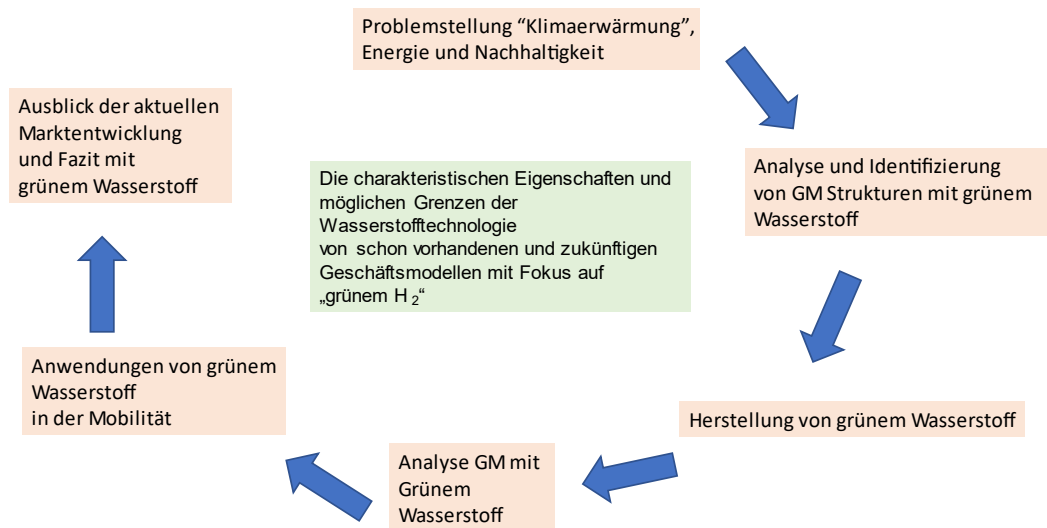


Abbildung 3: Gang der Arbeit nach eigener Darstellung

2 Energiesektoren und mögliche Synergien

Man unterteilt die heutige Energieinfrastruktur in 3 Sektoren. Die elektrische Energieversorgung ist der erste Sektor. Nukleare und fossile Energieträger werden in Elektrizität umgewandelt, diese beruht auf chemischen oder physikalischen Prozessen (Verbrennung, Kernspaltung) wo der Gesamtwirkungsgrad bei ca. 40% liegt.¹⁰

Die Bereitstellung von thermischer Energie in Form von Wärme ist der zweite Energiesektor, die Erzeugung wird durch einen chemischen Prozess vollzogen nämlich durch Verbrennung, beispielweise bei der Gewinnung von Elektrizität aus nicht regenerierbaren Brennstoffen zur Beheizung einer Wohnsiedlung.

Der dritte und letzte Sektor bildet der Bereich der Mobilität und Transport. In Verwendung und weitverbreitet, ist heute die Verbrennungskraftmaschine als Antriebssystem. In diesen ICE's (internal combustion engines) werden gasförmige oder flüssige Energieträger verbrannt (chemische Reaktion), um die freiwerdende Energie in Bewegung umzuwandeln. Die Entwicklung der modernen Antriebe hat im Bestpunkt einen Wirkungsgrad von 40% erreicht. Diese Werte ist man sich in der Wissenschaft einig kann man nur marginal verbessern.¹¹

In der Vergangenheit wurden diese drei Energiesektoren nicht in Verbindung gebracht geschweige gekoppelt. Der fortschreitende Klimawandel hat zu einem Umdenken der Gesellschaft geführt und die Verwendung von erneuerbaren Energieträgern forciert. Der Vorteil dieser Entwicklung ist die Entkopplung der Energieabhängigkeit von fossilen Energieträgern dem gegenüber stehen die erhöhten Kosten. Um die Kosten zu senken, werden heute diese 3 Sektoren in ihrer Gesamtheit betrachtet. Seit Mitte der 90er Jahren wird diese Sektorenkopplung nun erfolgreich angewendet und man ist sich einig, mit Hilfe von erneuerbaren Energien ist es der Schlüssel, um die Dekarbonisierung erfolgreich umzusetzen. In diesen zuvor genannten 3 Sektoren kann man die erneuerbare elektrische Energie. Die heutigen zur Verfügung stehenden Technologien ermöglichen, dass die erneuerbare elektrische Energie nach der Erzeugung direkt gespeichert bzw. umgewandelt werden kann. Hier bietet sich als Energieträger H₂ an, welcher danach zb. als künstlicher Treibstoff verwendet werden kann.

Voraussetzung für die Sektorenkopplung ist ein zielführender Einsatz der unterschiedlichen Energieträger zur Deckung der jeweiligen Energiebedarfsmenge.¹²

¹⁰ Vgl. Wiesche/Joos 2018, S. 82.

¹¹ Vgl. Schreiner 2020, S. 10.

¹² Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 1–4.

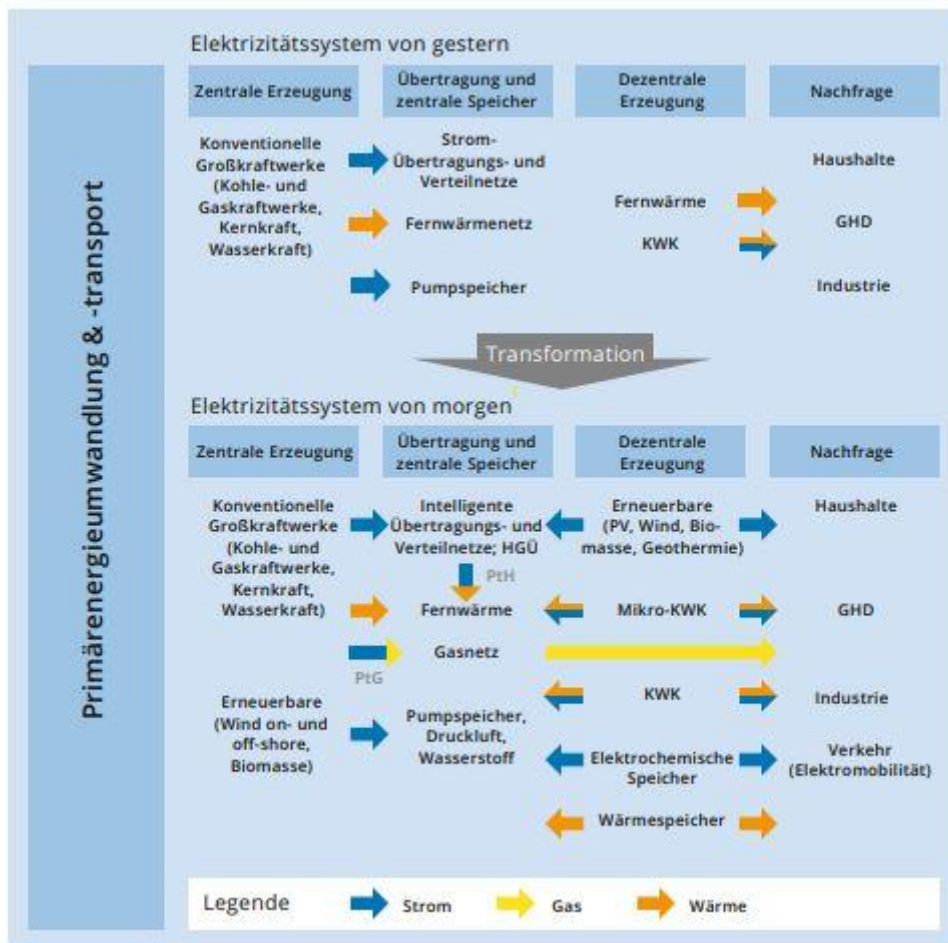


Abbildung 4 Die Transformation des Stromsystems schematische Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge¹³

2.1 Zielvorgabe der Politik

Die weltweiten Ereignisse (Umwelt Katastrophen) untermauern die These, dass der Klimawandel nicht vor nationalen Grenzen Halt macht. Es ist eine globale Herausforderung die Ursachen zu bekämpfen, um die gravierenden Folgen zu minimieren. Die unausweichliche Lösung wird lauten eine internationale Kooperation aller Staaten zu erstellen.

Mit dem Thema „mit welchen Maßnahmen effektiver Klimaschutz betrieben werden kann“ beschäftigt sich die internationale Klimapolitik. Die Minimierung (Verringerung) des Ausstoßes von Treibhausgasen ist das zentrale Thema. Zusätzlich erarbeiten diese Staaten-

¹³ Vgl. Wietschel u. a. 2015, S. 7.

vertreter auch Lösungsvorschläge bei Themen, wo man den „Point of no Return“ schon versäumt hat.

Die internationalen Kooperationen haben ein gemeinsames übergeordnetes Ziel, nämlich eine Umwelt ohne Störung im Ökosystem der nächsten Generation Mensch auf dieser Welt zur Verfügung zu stellen. Man kann die Klimaerwärmung heute nicht mehr wegdiskutieren, sie ist direkt mit dem zunehmenden Ausstoß von Treibhausgasen in Verbindung zu bringen, speziell seit der Industrialisierung. Genau diese zählt zu den Hauptverursachern der Erzeugung von Treibhausgasen. Die renommierten Wissenschaftler der Welt sind sich einig, um den Klimawandel Einhalt zu gewähren muss die gesamte Welt eine deutliche Reduktion der Treibhausgase zustande bekommen sonst wird man die Folgen nicht mehr eindämmen können.

Die UNFCCC verfasst das Vertragswerk zum völkerrechtlichen internationalen Klimaschutz. 194 Staaten weltweit, gehören dieser Vereinigung an. Das Gute ist, wenn die UNFCCC eine Vorgabe unterzeichnet, dann gilt diese beinahe weltweit da fast alle Länder der Welt ihr zugehörig sind. Aber genau dies ist dann wiederum auch ein Problem da viele Länder auch unterschiedliche Interessen verfolgen und es beinahe unmöglich ist eine einstimmige Erklärung oder Vertrag abzuwickeln. Wenn es aber dennoch dann zu einer Entscheidung kommen sollte, diese dann auch von allen Mitgliedsstaaten verabschiedet worden ist, genießt diese dann eine sehr hohe Legitimation und Bindungskraft.

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 Wasserstoffelektrolyseure mit einer Leistung von 5 Gigawatt (GW) in Deutschland zu installieren. Dieser grüne H₂ soll dann umgewandelt werden in konventionellen Kraftstoff, im Umfang von einer Leistung von 2GW. Wenn man nun von den heutigen zugrunde liegenden Zahlen ausgeht, bedeutet dies, dass 2030, wenn man den Einsatz von 20TWh Strom hat, etwa 14 TWh Wasserstoff bereitgestellt wurde. Gleichzeitig würde dies heißen, dass man ca. 25% des heutigen fossilen Wasserstoffs abdecken könnte mit grünem H₂. Diese sollte dann aber nur der Start bzw. Wendepunkt in Europa sein denn die Wasserstoffstrategie lautet bis 2030 eine Elektrolyseleistung von 40GW anzustreben.¹⁴

¹⁴ Vgl. Umwelt Bundesamt 2021.

Jahr	Meilensteine „Nachhaltiger Entwicklungen“
1713	Hans Carl von Carlowitz verfasst erste wissenschaftliche Abhandlung zur „nachhaltenden“ Forstwirtschaft: nicht mehr Holz schlagen, als nachwächst
1972	Erste große UN-Umweltkonferenz mit Gründung eines Umweltprogramms (UNEP)
1973	Der Club of Rome verkündet „Die Grenzen des Wachstums“
1987	Brundtland-Bericht: „Unsere gemeinsame Zukunft“
1972	UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro: Ergebnis war u. a. die Agenda 21, ein entwicklungs- und umweltpolitisches Aktionsprogramm
1997	Verabschiedung des Kyoto-Protokolls (Mengenziele für die Emission von Treibhausgasen von IL), welches erst 2005 in Kraft trat – ohne USA und China
2000	UN erklären acht Millenniumsziele (MDGs), wie die Bekämpfung von Hunger und Armut, die bis 2015 erreicht werden sollen
2002	10 Jahre nach Rio: Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg: Große Probleme weiterhin ungelöst; Verabschiedung eines Aktionsprogramms
2012	20 Jahre nach Rio: UN-Konferenz über nachhaltige Entwicklung (UNCSD): Green Economy und unverbindliche Bestätigung alter Ziele
2005 - 2014	Die UN rufen die Weltdekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BNE) aus. Ziel: Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung in allen Bildungsbereichen zu verankern
2015	<p>UN-Weltaktionsprogramm startet (Nachfolger der BNE-Dekade)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ablösung der nicht oder nur teilweise erreichten Millenniumsziele durch 17 Sustainable Development Goals (SDGs), die bis 2030 verwirklicht werden sollen • UN-Klimakonferenz in Paris: Viel gefeiertes „Übereinkommen von Paris“, der Beschluss eines ersten globalen Klimaschutzabkommens, um die globale Erwärmung auf deutlich weniger als 2 °C zu begrenzen. Dazu soll die Welt in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts treibhausgasneutral sein

Tabelle 1: Meilensteine Nachhaltiger Entwicklungen¹⁵

¹⁵ Vgl.Kropp 2019, S. 10.

2.2 Einhaltung der Zwei Grad Obergrenze

Eine internationale Staatengemeinschaft die UNFCCC hat sich 2010 bei einer Vertragsstaatenkonferenz durchgerungen und ein Abkommen unterzeichnet mit dem Ziel: Die Durchschnittstemperatur des globalen Anstieges auf die vorindustriellen Werte zu begrenzen. Die sogenannte „Zwei Grad Obergrenze“ ist von internationalen renommierten Wissenschaftler begründet und politisch als Vorgabewert vorgegeben worden, bei Nichteinhaltung dieser Grenze, also einer Überschreitung kann man heute davon ausgehen dass irreparable Schäden in der Natur gemacht wurden und es zu gefährlichen Klimaänderungen für Mensch und Umwelt kommen wird.

Die Erhöhung der Erdoberflächentemperatur um 0.8°C seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist eine wissenschaftliche Messung die man nicht widerlegen kann. Und wenn man der Tendenz des Emissionstrends der Treibhausgase folgt, kommt man laut Weltbankbericht zu einer Erwärmung von bis 4°C. Dieses Szenario „4°C“ hätte verheerende Folgen für das Ökosystem auf der Welt, ins besonders aber für die Menschen, welche in den Küstenregionen der Welt leben und natürlich den Menschen in der 3. Welt oder Schwellenländern. Damit so ein Szenario nicht eintreten kann, müssen die Treibhausgasemissionen der gesamten Welt, kurzfristig und langfristig stark gesenkt werden.

Der Sachbericht vom IPCC auch umgangssprachlich als Weltklimarat bekannt, gab schon im Jahr 2007 seine Erkenntnisse aus, um die notwendige Reduktion der Treibhausgase zu bewerkstelligen. Um die sogenannte „2°C Obergrenze“ welche in meisten Hochrechnungsmodellen hinterlegt ist und nicht zu übertreten, ist auszunehmen, dass mindestens eine Halbierung (-50% bis -85%) der weltweiten CO₂ Emissionen bis 2050 gegenüber dem Höchststand von 2000 als Voraussetzung angesehen wird. Es wird angenommen, dass der globale Höchststand am Ausstoß von Treibhausgasen spätestens im Jahr 2020 sein sollte. Die jetzigen Modelle sind leider nicht aussagekräftig da die weltweite Corona Pandemie den Ausstoß an Treibhausgasen reduziert hat. Es bleibt abzuwarten, wie sich die Werte nach 2024 entwickeln. Grundsätzlich bedarf es weltweiter innovativen und ehrgeizigen Anstrengungen bzw. Projekte, um die Treibhausgasemissionen auf 44 Milliarden Tonnen CO₂ Äquivalente zu senken. Diese Differenz zu minimieren ist eine große Herausforderung aller Staaten der Welt. Leider sieht man nicht immer den Willen dazu wenn man die Emissionen der Industriestaaten USA, China, Indien genauer betrachtet.¹⁶

¹⁶ Vgl. Internationale Klimapolitik 2021.

Energiesektoren und mögliche Synergien

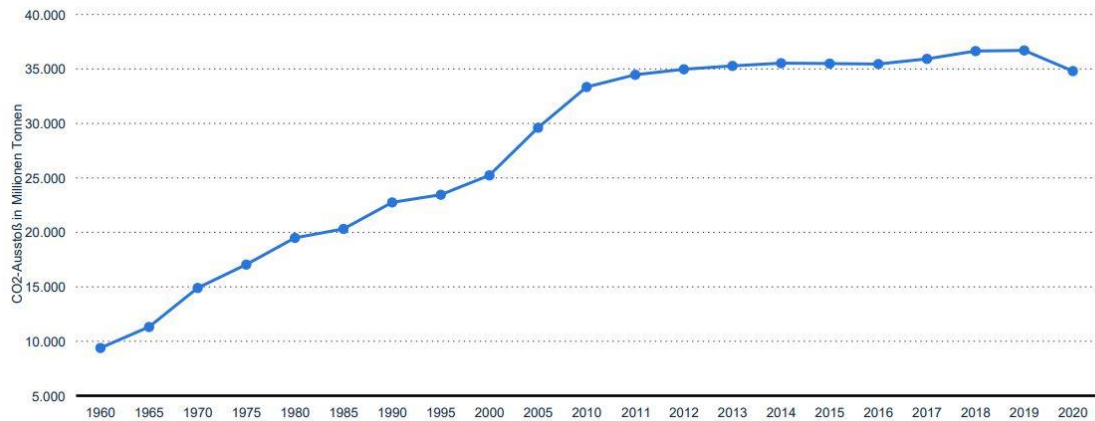


Abbildung 5: CO₂ Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2020¹⁷

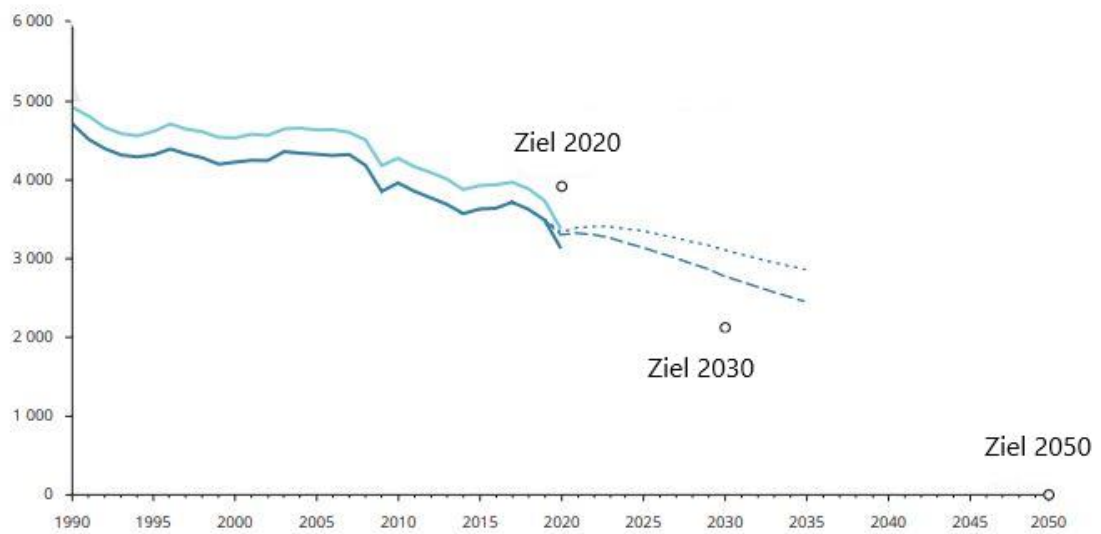


Abbildung 6 CO₂ Ausstoß (in Millionen Tonnen) der EU mit den Zielen der Klimakonferenz Ende 2021 in Paris¹⁸

¹⁷ Vgl. Statista, Treibhausgasemissionen in Österreich 2021.

¹⁸ Vgl. EEA o. J., S. 8.

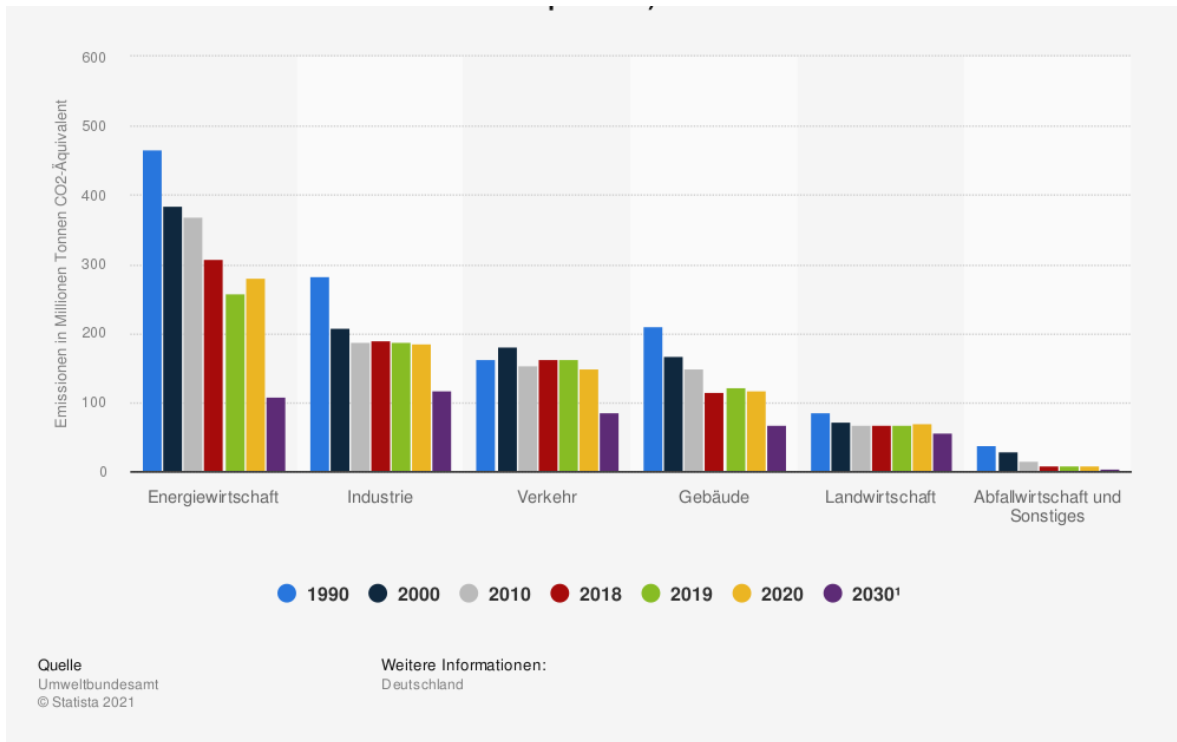


Abbildung 7 Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren¹⁹

¹⁹ Vgl. A. Bretkopf 2021.

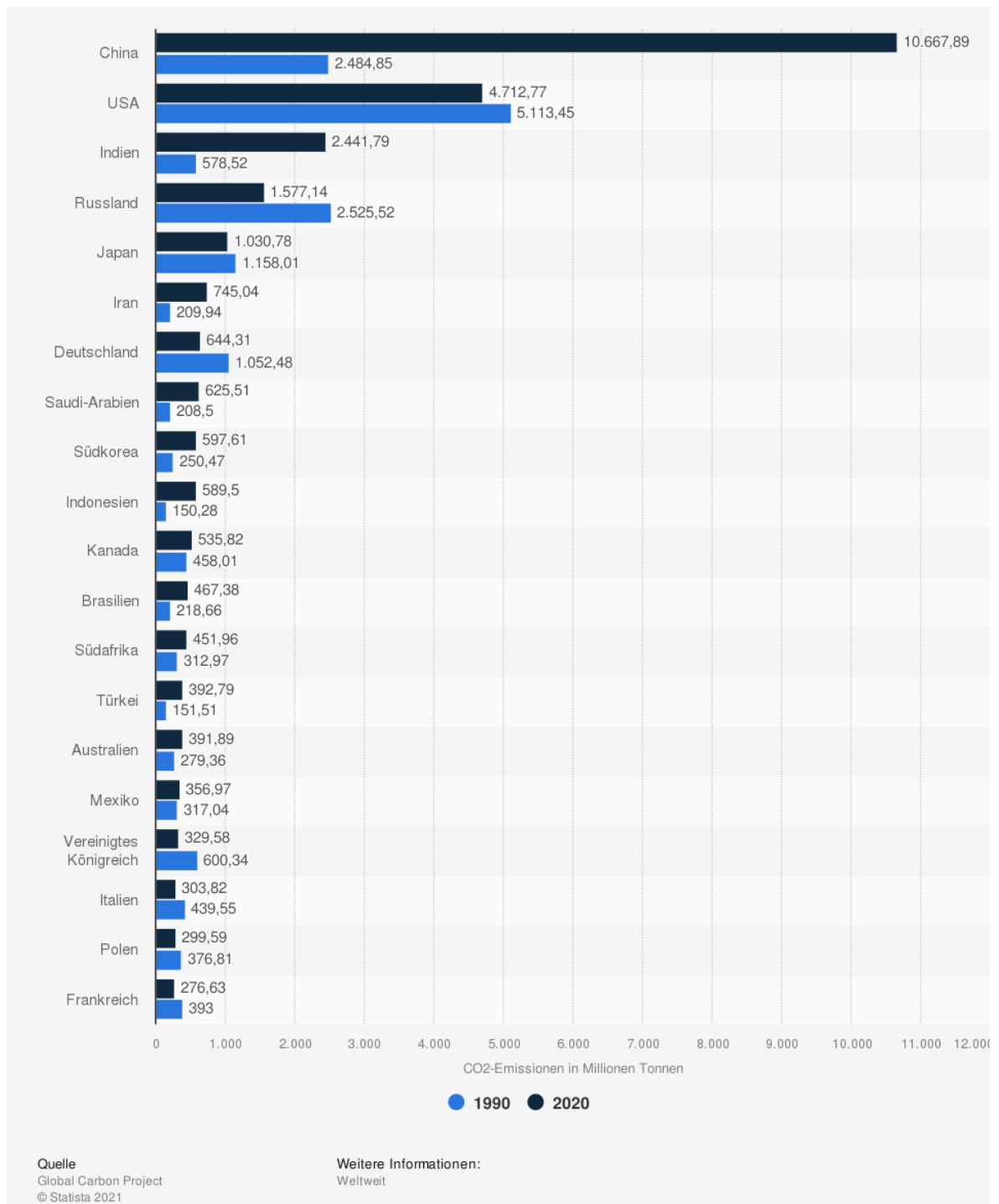


Abbildung 8: Energiebedingte CO₂-Emissionen nach Ländern im Jahr 2018 in Millionen Tonnen²⁰

In Abbildung 8 ist deutlich zu sehen, dass im Jahr 2020 China über zehn Milliarden Tonnen Kohlenstoffdioxid emittierte. Gegenüber dem Jahr 1990 hat sich die Menge ausgestoßenes CO₂ in China auf das Vierfache erhöht. Die USA, Indien und Russland gehören,

²⁰ Vgl.A. Breitkopf 2021.

wenn auch mit deutlichem Abstand zu China, ebenfalls zu den größten CO₂-Emittenten der Welt. Fakt ist auch, dass die Menge des weltweiten CO₂ Ausstoßes bisher mit kleinen Ausnahmen stetig zunimmt. Auch wenn wie in Abbildung 7 zu sehen ist das in der EU der CO₂ Ausstoß rückläufig ist. Somit sind die globalen Klima Ziele welche UNFCCC unterzeichnet hat anzuzweifeln, da der Einfluss der großen Industrieländer welche den Klimaschutz nicht ernst nehmen zu groß ist.

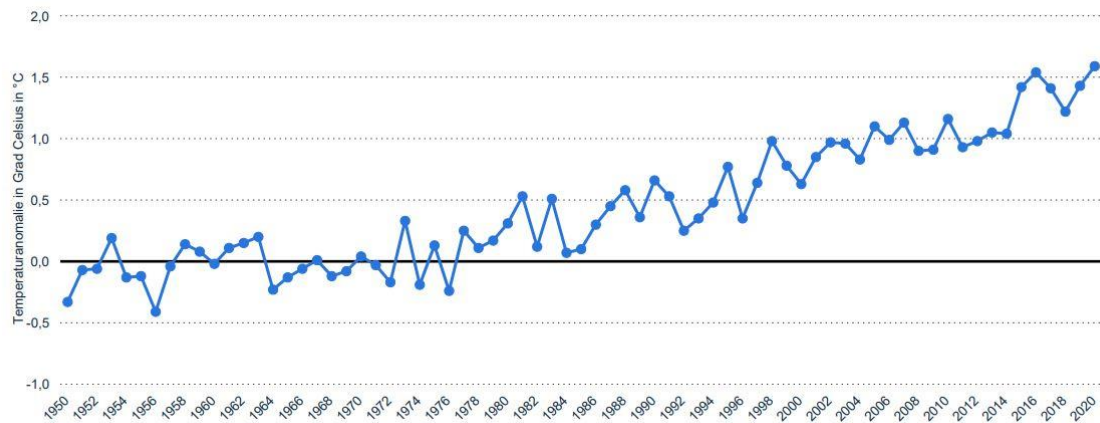


Abbildung 9: Anomalien der durchschnittlichen Kontinental-Temperaturen auf globaler Ebene²¹

Wenn man nun die Abbildung 5 und 9 übereinander legt kommt man zum Schluss, dass der CO₂ Ausstoß mitverantwortlich ist für die globale Klima-Erwärmung.

2.3 Treibhausgase

Der Mix von unterschiedlichen Treibhausgasen in der Atmosphäre unterteilt man in sechs Gase: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), und Lachgas (N₂O) sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase): wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), und Schwefelhexafluorid (SF₆). Ab 2015 wird Stickstoff Trifluorid (NF₃) zusätzlich einbezogen. In Deutschland entfallen 87,1% Prozent der Freisetzung von Treibhausgasen auf Kohlendioxid, 6,5 Prozent auf Methan, 4,6 Prozent auf Lachgas und rund 1,7 Prozent auf die F-Gase.²²

²¹ Vgl.A. Breitkopf 2021, S. 4.

²² Vgl.Doleski u. a. 2021, S. 6.

2.4 Begrenztheit und Nachhaltigkeit von fossilen Energieträgern

Die Umorientierung in Richtung auf unendlich, d.h. erneuerbare Energiereserven basiert auf der Begrenztheit der fossilen Energieträger. Die immer stärker werdenden Auswirkungen des Klimawandel, ist der Hauptbeweggrund und Motivator des technologischen Fortschrittes und der politischen Ziele, welche die Umorientierung antreibt. Die wachsenden Bevölkerungszahlen und die basierend auf der Industrialisierung steigende Energienachfrage auf der Welt tragen dazu bei, eine wettbewerbsfähige und umweltfreundliche Energieressourcen zu einzufordern. Das Angebot und die Preisgestaltung von fossilen Energieträgern könne durch Kartelle wie die OPEC in bestimmten Rahmen gesteuert werden. Je nach Marktstellung können sich die Preise für fossile Energieträger dabei drastisch ändern. Unsere Geschichte zeigt, dass diese wie in der jüngsten Vergangenheit, weltweit zu sozialen Konflikten führen kann.

Wenn man davon ausgeht, dass die Volkswirtschaften der Welt ein Umdenken starten, indem sie ihre Euro/Dollar nicht mehr in den Import von Energieträgern investieren, sondern die länderspezifischen lokalen erneuerbaren Energiequellen fördern würden, sodass eine umweltfreundliche unabhängige Energieversorgung aufgebaut werden kann. Eine energieunabhängige und nicht von fossilen Ressourcen fördernde erpressbare Volkswirtschaft würde entstehen.

Die Endlichkeit der fossilen Energieträger ist inhaltlich eng mit der Forderung nach umweltfreundlicher nachhaltiger Energieversorgung. Der Nachhaltigkeitsbegriff als Grundgedanke geht in das 17. Jahrhundert zurück. 1713 definierte Hans Karl von Carlowitz den Begriff als Gegengewicht zwischen Verbrauch und Konservierung von Holzinventar. Der Grundgedanke war nur so viel Holz zu schlagen wie wieder nachwächst.²³ Übertragen auf die Energieträger bedeutet dies, dass ein Gleichgewicht zwischen Energieumwandlung und Energiebereitstellung hergestellt werden muss. Auf lange Sicht ist dies nur mit erneuerbaren Energieträgern möglich.²⁴

Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft sollte das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung sein. Gleichberechtigt stehen dabei die drei Dimensionen nebeneinander. Leider existieren unterschiedliche Meinungen zur Gewichtung der Dimensionen. Zusätzlich zum Meinungsunterschied kommt es häufig zu einem Konflikt, das heißt zwei Ziele schließen sich aus oder lassen sich nur schwer miteinander verbinden. Die Prioritäten dann richtig zu setzen ist dann das Gebot der Stunde.

²³ Vgl. Hamberger/Joachim 2015.

²⁴ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 18–23.

In der Abbildung 8 ersichtliche drei Säulen Modell wird das Dach der Nachhaltigkeit von den drei Dimensionen getragen. Der Kritikpunkt an diesem Modell ist, dass wenn eine Säule komplett entfallen würde das Dach noch immer getragen wird. Dem gegenüber stehe das Schnittmengen-, oder Dreiklang Modell, in diesem verlaufen die Dimensionen ineinander und bilden dadurch in der Schnittfläche die Nachhaltigkeit. Am weitesten verbreitet ist das Nachhaltigkeits-Dreieck. Die zugrunde liegende Idee ist alle drei Dimensionen in ein gleichseitiges Dreieck zu implementieren. Der Kritikpunkt dieses Modell ist, das man einen einseitigen Fokus auf die nachhaltige Entwicklung legt. Denn die Fokussierung sollte Gerechtigkeit sein.²⁵



Abbildung 10 : Das Drei-Säulen-Modell, Dreiklang-Modell und integratives Nachhaltigkeitsdreieck²⁶

²⁵ Vgl. Kropp 2019, S. 9–11.

²⁶ Vgl. ebd., S. 11.

2.5 Wasserstoff als grüner Energieträger

In Zukunft wird das Augenmerk auf die Nutzung von erneuerbaren volatilen Energiequellen liegen, diese Anlagen wie PV-, Sonnen – und Windkraft brauchen ein Bindeglied, um Energie zwischenspeichern zu können, um es dann den Energienutzer bereitstellen zu können und genau hier wird H₂ zum Einsatz kommen. Die positiven Eigenschaften wie Speicherbarkeit, in beliebiger Menge und Transportfähigkeit machen H₂ als Sekundärenergieträger zur Pufferung von volatiler erneuerbarer Energie sehr interessant. Die neuesten Entwicklungen dezentraler Systeme zeigen, dass die H₂ Herstellung aus erneuerbaren volatilen Energiequellen möglich ist und ökonomisch Sinn macht. In Zukunft wird es immer wichtiger sein, die unbegrenzt und frei zur Verfügung stehenden primär Energiequellen zu nutzen, um die Versorgungssicherheit der Energieinfrastruktur zu gewährleisten. Die Primärenergiequellen sind sehr vielseitig und unterschiedlich umso wichtiger ist es diese mit Innovation und intelligenten Lösungen gegenüberzustellen. Diese können von kleinen dezentralen Energieerzeugungssysteme bis zu großen H₂ Anlagen (Power to Gas, Power to Liquid, Power to Fuel) gehen. Man kann heute schon da H₂ Gas in die Gasversorgungsnetze einspeisen und nutzen. Je nach geographischer Lage der Anlage werden unterschiedliche Energieumwandlungssysteme zur Anwendung kommen und somit werden sich dann sogenannte Energiecluster bilden. Beispielweise wird in gebirgigen Regionen die Windkraft stärker genutzt (Onshore- Windkraft), in geographischen Lagen mit landwirtschaftlichen Strukturen wird dann eher die Biomasse und in Küstenregionen des Meeres wird die Energie aus Gezeiten und Wellen genutzt werden. Diese Energiecluster werden sich global verbreiten, z.B Solarthermie und Photovoltaikanlagen könnten sich idealerweise in den südlichen Regionen der Welt ansiedeln so wie die Wellenkraftanlagen in der Küstenregion und die Windkraftanlagen in windstarken Gebieten sich ansiedeln werden. In diesen Regionen wird es wichtig sein die Energieüberproduktion zwischenzuspeichern und deswegen werden sich hier dann H₂ Produktionsanlagen ansiedeln. Diese sind von Anfang an Bestandteil der der mit EEQ betriebenen Kraftwerke. Um die erfolgreiche H₂ Nutzung umzusetzen ist der Schlüssel dazu die Herstellung von grünem H₂ aus EEQ und dessen Speicherung. Und genau diese werden in großer Variati-on für unterschiedliche Anwendungen erscheinen wie Gaskavernen, Gasnetzwerke, Flüssiggasspeicher und chemische H₂ Speicher (flüssig, Metallhydrid basiert, uvm.), Batteriesysteme in unterschiedlichen Leistungsklassen und Größen. Die Speichersysteme werden in naher Zukunft eine Schlüsselrolle bekommen, nämlich H₂ in unterschiedlichen physikalischen Formen oder chemischen Zuständen zu verteilen und speichern.²⁷

²⁷ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 25–27.

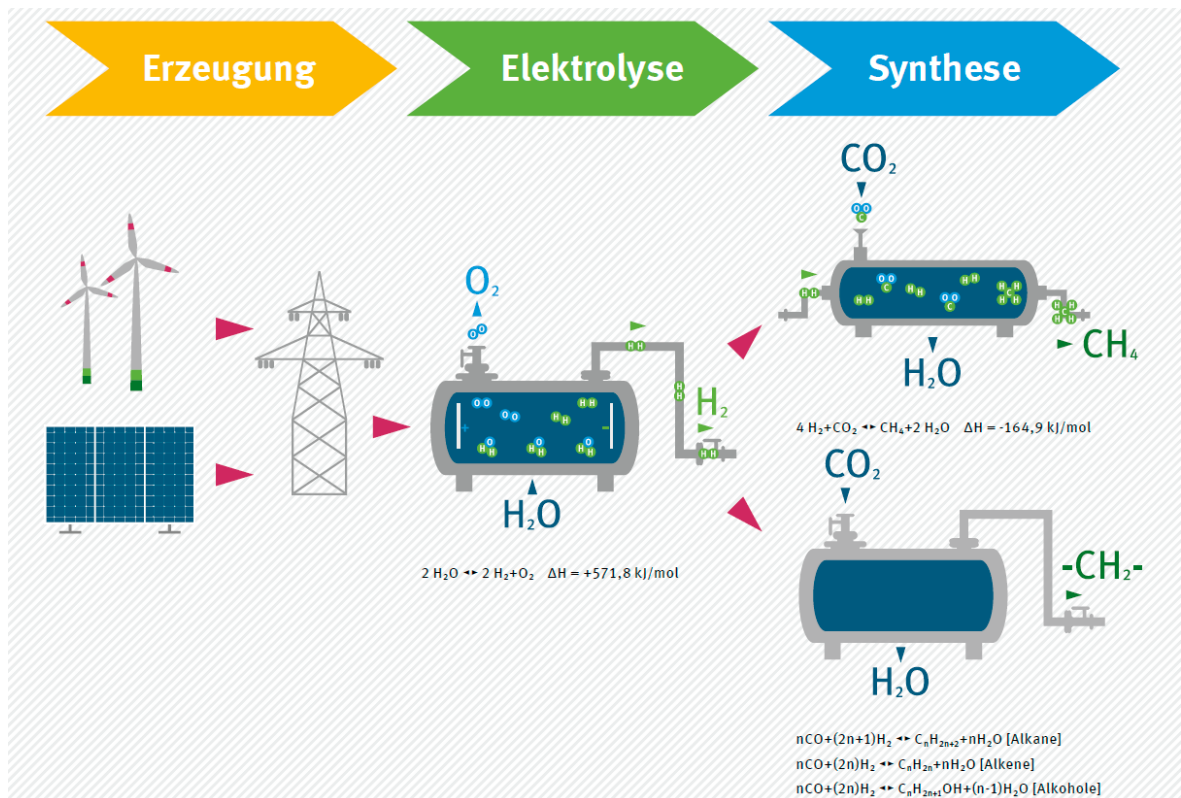


Abbildung 11: Schematische Funktionsweise von PtG und PtL²⁸

2.5.1 Grüner Wasserstoff

Von grünem Wasserstoff spricht man, wenn die Gewinnung des H_2 ausschließlich mit Strom aus EEQ erfolgt ist. Hier wird meist die Elektrolyse von Wasser eingesetzt. Ganz egal welche Elektrolysetechnologie zum Einsatz kommt ist die Produktion von H_2 CO_2 neutral, dies setzt voraus, dass der Strom aus EEQ zum Einsatz kommt.

²⁸ Vgl. Umwelt Bundesamt o. J.

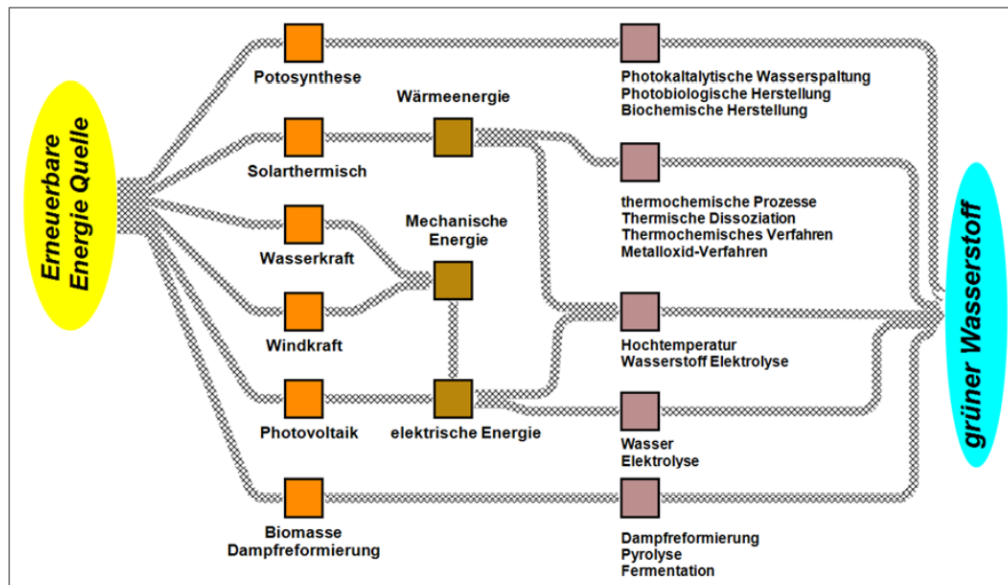


Abbildung 12: Grüne Herstellungsprozesse für H₂²⁹

Den höchsten Energiegehalt im Vergleich unter allen Energieträgern hat Wasserstoff. Der Vergleich 1kg H₂ mit Benzin auf der Basis der Energiemenge, so braucht man 2.75kg Benzin um äquivalent zu sein. Bei der Herstellung von 1 kg H₂, wird dementsprechend große Energie verwendet. Genauer gesagt sind es zwischen 50 und 55 kWh. Der Energiegehalt von 33.33 kWh/1kg Wasserstoff wird bei der Herstellung dementsprechend mehr Energie eingesetzt als später bei der Wiederverwendung zur Verfügung steht. Die Energietechniker haben die wichtige Aufgabe diese Umwandlungsverluste so gering wie möglich zu halten. Wichtig ist, dass die Grundgleichung der Wasserstoffspaltung immer die gleiche ist bei der Herstellung. Der verfahrenstechnische Unterschied resultiert daraus, welche Reaktionsschritte bei der Umwandlung für ein Verfahren notwendig ist. 8g Sauerstoff werden bei der Elektrolyse benötigt, um 1g H₂ herzustellen. Die für die Generierung von H₂ notwendige Energiemenge beträgt 572 kJ bzw. 158,9 W. Bei 4 g Massengleichung wären dies 39,7 W. Bei einem Kilogramm H₂ wären es 39,7 kWh/kg an Energiemenge. Diese Energiemenge entspricht dem oberen Heizwert für H₂. Es ist zu beachten, dass für 1 kg H₂ bei der Herstellung, ca. 9kg Wasser benötigt werden. 50-55 kWh elektrische Energie wird benötigt, um 1kg H₂ zu erzeugen. Der Wirkungsgrad bei der Herstellung von 1 kg H₂ liegt Stand heute bei ~60% und zugleich ist nicht zu vernachlässigen, dass man die 9-fache Menge an Wasser benötigt.

²⁹ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 30.

Heutige Prognosen gehen davon aus, dass bis 2050 eine H₂ Mengen von 50Mio Tonnen von der Industrie und Verkehr eingesetzt werden. Diese Annahme geht von einem Jahreswachstum von 3.5% aus. Die heutige Wasserstoffherzeugung basiert leider auf fossilen Energiequellen. Um H₂ zu einer grünen Sekundärenergiequelle zu machen ist es erforderlich, dass endliche natürliche Ressourcen im gesamten Lebenszyklus möglichst wenig beeinträchtigt werden. Optimistische Prognosen gehen davon aus, dass bis 2030 es möglich ist, 50 - 60% des gesamten Wasserstoffs für die Industrie aus EEQ oder kohlenstoffarmen Quellen zu erzeugen.³⁰

2.5.2 Grauer Wasserstoff

Der graue Wasserstoff wird aus fossilen Brennstoffen erzeugt. Weit verbreitet bei diesem Herstellungsverfahren ist, die Anwendung von Erdgas als Hitzelieferant welche die Spaltung in Wasserstoff und Kohlendioxid (CO₂) ermöglicht. Leider wird dann bei diesem Verfahren das CO₂ direkt in die Atmosphäre abgegeben und ist deswegen nicht förderlich für den globalen Treibhauseffekt. Es entstehen bei dieser Art von H₂ Produktion 10t CO₂ auf 1t H₂.

2.5.3 Blauer Wasserstoff

Prinzipiell ist der blaue Wasserstoff, ein grauer Wasserstoff mit dem Unterschied, dass dessen CO₂ nicht in die Atmosphäre abgegeben wird, sondern abgeschieden und gespeichert wird. So landet dessen CO₂ nicht in der Atmosphäre und wird deswegen als CO₂ eingestuft.

2.5.4 Türkiser Wasserstoff

Türkiser Wasserstoff entsteht bei der Methanpyrolyse und ist daher eine thermische Spaltung von Methan. Hier wird nicht CO₂ abgeschieden, sondern fester Kohlenstoff. Die CO₂ Neutralität bekommt dieses Verfahren nur wenn bei der Wärmeversorgung aus EEQ sichergestellt wurde und der Kohlenstoff dauerhaft gebunden bleibt.³¹

³⁰ Vgl.ebd., S. 29–32.

³¹ Vgl.Bundesministerium für Bildung und Forschung 2020.

3 Geschäftsmodelle in den Wirtschaftswissenschaften

Der Begriff „Geschäftsmodell“ wurde zum ersten Mal in den 1950er Jahren in einen Artikel (Bellmann 1957) angewandt. Das damalige Verständnis von einem Geschäftsmodell war als eine Anleitung oder Konstruktionsplan für eine Firma zu verstehen.

Entstanden ist die Geschäftsmodelltheorie vor allem durch die „New Economy“ (1998-2001), den Ursprung hat sie jedoch Mitte der 1970er Jahre mit der Entstehung der Wirtschaftsinformatik in Verbindung mit der Geschäftsmodellierung.

Eine einheitliche Definition des Begriffes „Geschäftsmodell“ gibt es nicht. Dennoch haben sie alle gewisse Gemeinsamkeiten. In den meisten bringt das Geschäftsmodell Elemente, Objekte, Konzepte oder Komponenten in einen Zusammenhang. Dies dient dazu, neue Werte (Produkte, Dienstleistungen) zu schaffen und zu sichern.³²

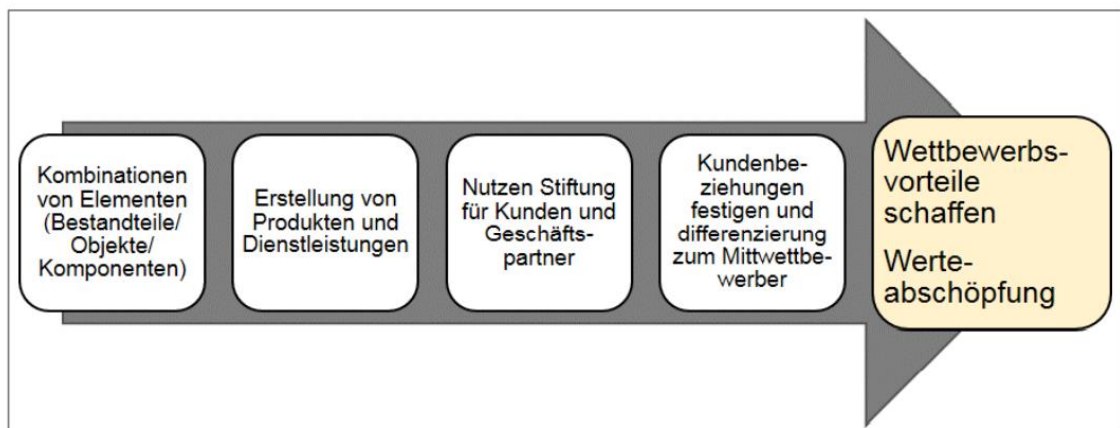


Abbildung 13: Geschäftsmodell Charakteristika ³³

³² Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 33.

³³ Vgl. ebd.

3.1 Ziele der Geschäftsmodelle

Ein Geschäftsmodell kann man als Instrument sehen womit man Planungs-, Entscheidungs- und Umsetzungsprozesse definieren kann und wo die betrieblichen Produktions- und Leistungssysteme abgebildet sind. Die Aufgabe eines Geschäftsmodell ist es die aktuellen Geschäftstätigkeiten zu optimieren, Mitbewerber zu analysieren, Wettbewerbsvorteile, Potenziale und Risiken zu erkennen und zu bewerten, die Geschäftsidee zu verstehen und den Mehrwert für den Kunden zu erklären. Gleichzeitig erlaubt es eine Aussage über zukünftige Erträge, Wertschöpfung und Personalbedarf.³⁴

3.2 Geschäftsmodelltheorie von Osterwalder und Pigneur

Diese beiden Autoren definieren ein Geschäftsmodell wie folgt:

„A business model describes the rationale of how an organization creates, delivers and capture value”³⁵

Die Grundidee dieser Herren ist wie eine Organisation Werte schaffen, bereitstellen und über längere Zeiträume sichern kann. Nach Osterwalder und Pigneur wird ein Geschäftsmodell auf 9 Bausteinen aufgebaut. Diese zeigen wie unterschiedliche Kanäle miteinander verbunden sind und wie profitabel die Idee ist. Wichtig dabei ist das diese 9 Bausteine die 4 wichtigsten Bereiche einer Unternehmung abbilden (Kunden, Angebot, Infrastruktur, Finanzen) Die folgende Tabelle zeigt dies nun im Detail.

³⁴ Vgl.Freiling 2007, S. 371.

³⁵ Vgl.Osterwalder/Pigneur 2011, S. 18.

	Bausteine/ Elemente	Aufgabe / Beschreibung	Bereich
1	Customer Segment/ Kundensegment	Personenkreise, Organisation und Unternehmen, die wir bedienen und deren Probleme wir lösen möchten	Kunde
2	Value Proposition/ Nutzenversprechen	Kundennutzen: Beschreibt den Nutzen, den Kunden vom Produkt oder Service erhalten	Angebot
3	Channels/ Kanäle	Kundensegment ansprechen, Vermittlung von Nutzversprechen, Weg zum Kunden	Infrastruktur
4	Customer Relationship/ Kundenbeziehung	Art der Beziehung zu Kundensegment persönlich / automatisiert	Kunde
5	Revenue Streams/ Einnahmequellen	Art der Einkünfte aus den Kundensegmenten	Finanzen
6	Key Resources/ Schlüsselressourcen	Wichtigste Schlüsselgüter für das Funktionieren eines Geschäftsmodells	Infrastruktur
7	Key Activities / Schlüsselaktivitäten	Wichtigste Aktivitäten, notwendig für die Funktion des Geschäftsmodells	Infrastruktur
8	Key Partnership/ Schlüsselpartnerschaften	Netzwerk von Partnern für das Gelingen des Geschäftsmodells	Infrastruktur
9	Cost Structure / Kostenstruktur	Kosten, die bei der Arbeit mit dem Geschäftsmodell anfallen	Finanzen

Tabelle 2: Elemente des Geschäftsmodell nach Osterwald/Pigneur³⁶

Weiters haben Osterwald und Pigneur diese Bausteine in eine spezielle Darstellung umgebaut: die „CANVAS Übersicht“. Diese erlaubt ein Geschäftsmodell schnell auf einen Blick darzustellen, zu verändern und analysieren.

³⁶ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 38.

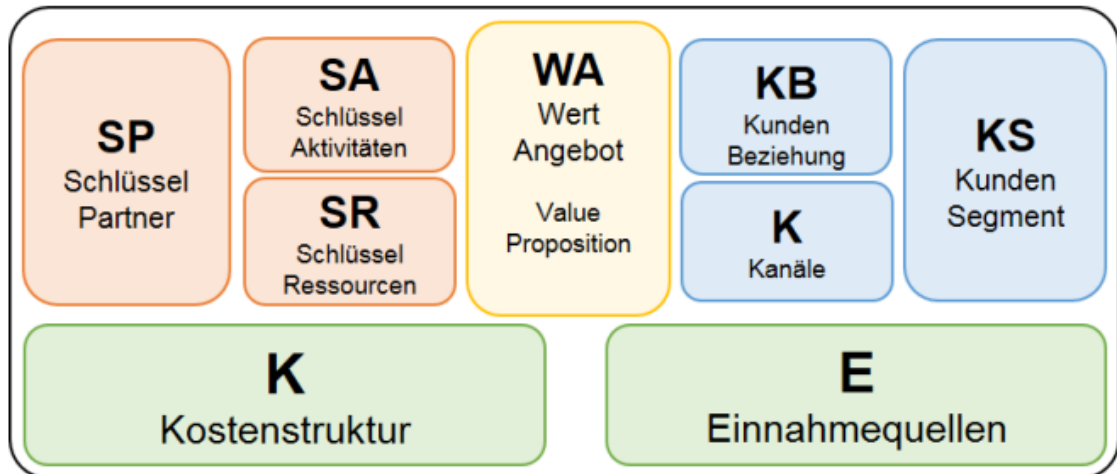


Abbildung 14: Business Model nach Canvas³⁷

3.2.1 Baustein „Kunde“ im CANVAS Model

Aus ökonomischer Sicht kann kein Unternehmen bestehen ohne profitable Kunden sein Eigen zu nennen. Somit ist der Kunde das Schlüsselement eines jeden G-M. Um Kunden genauer unter die Lupe zu nehmen, werden Kundensegmentierungen durchgeführt, um ihre Bedürfnisse besser zu erkennen, die Segmente abgegrenzt, diese dann zu Beschreiben und mit Nutzversprechen (Produkte oder Dienstleistung) zu befriedigen.

3.2.2 Baustein „Nutzversprechen“ im CM

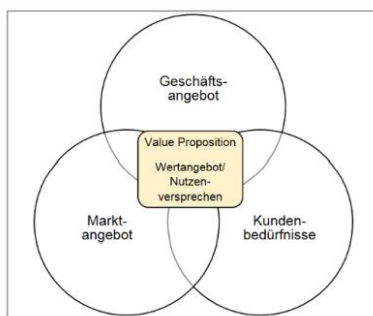


Abbildung 15: Schnittmenge Value Proposition³⁸

Im Mittelpunkt jeder Unternehmung steht der potenzielle Kunde. Die „Value Proposition“ (Nutzversprechen) ist der Grund, warum ein Kunde sich für ein Produkt oder Dienstleistung

³⁷ Vgl.ebd.

³⁸ Vgl.ebd., S. 39.

tung entscheidet. Durch die Nutzversprechen entstehen Mehrwerte für den Kunden, das kann eine höhere Qualität, höhere Effizienz oder einfachere Bedienung sein. Bessergesagt dieser Mehrwert löst ein Kundenproblem oder erfüllt ein Kundenbedürfnis. Die Schnittmenge aus GA, MA und Kundenbedürfnis (Abbildung 15) ergibt die speziellen Kunden Wertangebot.

Um ein Geschäftsmodell mit einem hohen Nutzversprechen zu generieren, müssen folgende Fragen eindeutig beantwortet werden:

1. Welcher Nutzen wird dem Kunden vermittelt?
2. Welche Problemlösungen können wir dem Kunden anbieten, bzw. welche Bedürfnisse werden gestillt?
3. Welche Produkte und Dienstleistungen bieten wir für das einzelne Kundensegment an?

Ein Nutzwertversprechen kann qualitativ oder quantitativ sein. Qualitative Werte sind Beschaffenheit bzw. charakteristische Eigenschaften. Quantitative Werte sind Anzahl, Größe oder Menge des Produkts. Ein Nutzversprechen kann man in unterschiedlichen Kategorien einteilen, welche ein Kunde für wichtig hält. Zum Beispiel:

- Funktioneller Wert: konzentriert sich auf das Produkt oder Dienstleistung (z.B einfache Handhabung, bessere Problemlösung)
- Emotionale Wert: Bewertet die Attraktivität und wie angenehm die Leistung ist. Kann aber auch ein nostalgischer Wert sein oder auf Empfehlung von einer dritten Person.
- Wirtschaftlicher Wert: ist ein finanzieller Vorteil, fördert Energieeinsparungen, ist innovativ oder spart Zeit.
- Symbolischer Wert: Legt der Kunde Wert auf den Status, welcher mit dem Produkt geliefert wird
- Weitere Werte sind: Gesundheit, Wohlstand, Jugend, usw.

Nutzenversprechen	Beispiele
Neuheit	Hocheffizientes dezentrales Brennstoffzellen Heizgerät, H2 hergestellt aus Biomaterial, Energie rückführungssystem,
Leistungsverbesserung	Höhere Leistungsfähigkeit, höhere Effizienz, höhere Reichweite, höhere Beladung, geringeres Gewicht
Anpassung an Kundenwünsche	Größe und Leistung von Fahrzeugen, Wärmelieferung für private und kommerzielle Heizungsanlagen
Arbeitserleichterung	Heizungsanwendung mit All-inclusive-Arbeit, Installation, Arbeiten, Wartung, Carsharing-System (Mobilität auf Anfrage!)
Design	Futuristic, modern, innovativ
Marke Status	Marken Namen, Farbe, Form
Preis	Leasing model, car sharing, Energie
Kostenreduktion	Energiekostenreduzierung durch dezentrale Systeme
Risikominimierung	Verfügbarkeit für H2, dezentral produziert, lokal produziert
Verfügbarkeit	Energie Infrastruktur für grünem H2
Anwenderfreundlichkeit Bequemlichkeit	Kurze Betankungszeit, einfache Befüllung,

Tabelle 3: Nutzversprechen mit grünem H₂ ³⁹

3.2.3 Baustein „Kanäle“ im CM

Ein weiteres Element nach Osterwalder und Pigneur sind die Kanäle, sie vermitteln das Nutzversprechen an den Kunden. Man unterscheidet „direkte“ und „indirekte“ Kanäle. Wenn der Kanal im eigenen Unternehmen integriert ist, spricht man von einem direkten Kanal. Wenn die Kommunikation über einen Partner oder externe Firma zustande kommt spricht man von indirektem Kanal.

³⁹ Vgl.ebd., S. 41.

Kanaltypen		Kanalphasen				
eigene	Verkaufs- abteilung	1. Aufmerksamkeit Wie lenken wir die Aufmerksamkeit auf die Produkte und Dienstleistungen unseres Unternehmens?	2. Bewertung Wie helfen wir unseren Kunden, das Wertangebot unseres Unternehmens zu bewerten?	3. Kauf Wie ermöglichen wir es den Kunden, spezifische Produkte und Dienstleistungen zu kaufen?	4. Vermittlung Wie vermitteln wir den Kunden ein Wertangebot?	5. Nach dem Kauf Wie unterstützen wir die Kunden auch nach dem Kauf?
	Internet- verkauf					
	Eigene Filialen					
Partner	Partnerfilialen					
	Großhändler					

Abbildung 16: Kanaltypen und Kanalphasen⁴⁰

3.2.4 Baustein „Kundenbeziehung“ im CM

In diesem Baustein wird der Zusammenhang zwischen Kunden und Unternehmung definiert. Dies kann persönlich bis automatisiert reichen.

Folgende Motivationen sind treibend bei der Kundenbeziehung:

- Kundenakquise
- Kundenpflege
- Verkaufssteigerung

3.2.5 Baustein „Einnahmequelle“ im CM

Analog zu dem Nutzversprechen ist auch bei der Einnahmequelle das wichtigste Element die Kundensegmentierung. Je nach Kundensegment kann man eine unterschiedliche Preisfestlegung verfolgen, prinzipiell wieviel die Kundensegmente bereit sind zu bezahlen.

Einnahmequellen können bestehen aus:

- Nutzgebühr
- Verkauf von einem Produkt
- Mitgliedsgebühr
- Lizenz
- Marktgebühr uvm.

⁴⁰ Vgl. Osterwalder/Pigneur 2011, S. 31.

3.2.6 Baustein „Schlüsselressourcen“ im CM

Um bei einem Geschäftsmodell die Funktionsweise sicherzustellen, muss man die notwendigen Wirtschaftsgüter/Assets wissen und sichern. Wichtig ist die Ressourcen den Nutzversprechen, Kanäle und Kundenbeziehung richtig zuzuordnen.

Ressourcen können sein:

- Physisch (Gebäude, Immobilien)
- Finanziell (Geld, Kreditwürdigkeit)
- Humane (Personal, Facharbeiter)
- Technologische (Qualitätsstandards, Lizenzen, Forschung Know-How etc.)

3.2.7 Baustein „Schlüsselaktivitäten“ im CM

Um ein Produkt auf den Markt zu bringen, muss davor eine Wertschöpfung vorgeleistet werden. In diesem Prozess muss man nun die wichtigsten Aktivitäten definieren, welche für die erfolgreiche Umsetzung unbedingt benötigt werden. Je nach Geschäftsmodell können die Schlüsselaktivitäten unterschiedlich sein z.B:

- Produzierendes G-M: Produktion entwickelt Produkt, produziert und liefert.
 - o Schlüsselaktivitäten sind in der Produktion zu finden und fordert eine fortwährende Schulungsmaßnahmen.
- Plattform als G-M: z.B. ebay oder Facebook.
 - o Schlüsselaktivitäten sind Updates der Serveranlagen denn hier sollte kein Fehler passieren.

3.2.8 Baustein „Schlüsselpartnerschaft“ im CM

Ein Schlüsselpartner sollte (ist aber kein Muss) in erster Linie ein Nicht – Konkurrent sein also ein Lieferant, Service-Bereitsteller oder ein strategischer Partner. Sie tragen dazu bei neuen Ideen in das G-M zu bringen oder das G-M zu optimieren. Folgende Formen sind üblich:

- Kooperation (Wettbewerber bilden eine strategische Partnerschaft)
- Strategische Allianzen
- Joint Ventures
- Käufer-Anbieter-Beziehung
 - o Diese ermöglicht eine zuverlässige Versorgung

3.2.9 Baustein „Kostenstruktur“ im CM

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen zwei Sichtweisen.

Kostenorientierte Sichtweise:

Hier wird der Schwerpunkt auf das Minimieren der Kosten, wo immer es möglich ist gelegt. Ziel ist es eine schlanke Kostenstruktur zu erschaffen und aufrechtzuerhalten. Zum Einsatz kommen hier folgende Anwendungen:

- Outsourcing
- Maximale Automatisierung
- Niedrigstes Werteangebot

Wertorientierte Sichtweise:

Es gibt Firmen bzw. G-M wo man weniger um den Kostenzusammenhang bemüht ist. Diese konzentrieren sich auf ein erstklassiges Werteangebot und eventuell in Verbindung mit einem persönlichen Service. Ein gutes Beispiel sind Luxushotels.

Durch die Betrachtung der Kostenstruktur der fixen und variablen Kosten und deren verschiedenen Berechnungsverfahren wie Deckungsbeitragsrechnung, statische und dynamische Investitionsrechnung/ Finanzierungsrechnung kann eine Charakterisierung durchgeführt werden.⁴¹

⁴¹ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 39–45.

4 Ökologische Merkmale von grünem Wasserstoff

Stand 2019 wird H₂ überwiegend (98%) aus fossilen Energieträgern bzw. aus Abfallprodukten von chemischen Prozessen, in Raffinerien erzeugt. Die Energietransformationsprozesse sind heute teilweise sehr ineffizient. Wenn man die Sektoren (Wärme/Kälte, Mobilität, Elektrizität) ansieht müssen diese noch optimiert und besser verbunden werden. Und genau als Energiebindeglied der Sektoren wird dann H₂ als erneuerbare Sekundärenergie eine Rolle spielen.⁴²

Da die Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energiequellen immer günstiger werden, wie z.B. mit PV Anlagen oder Windrädern entstehen immer mehr Geschäftsoptionen beim Einsatz mit H₂ als erneuerbare Sekundärenergiequelle.

Das Problem ist die volatile Energie bei Energieüberschuss zu speichern. Und genau hier kann H₂ das Problem lösen, in dem eine Energiezwischenpufferung in H₂ durchgeführt wird. War dies früher aus ökonomischer Sicht nicht wirtschaftlich und aus technischer Sicht nicht durchführbar hat sich dies nun aber geändert.

Das Zauberwort könnte Energiearbitrage lauten. Die bedeutet eine Fähigkeit zu erlangen Energie zu einer bestimmten Tageszeit zu speichern und zu einem anderen Zeitpunkt wieder abzugeben, wodurch der Energieverbrauch verschoben werden kann. Nun könnte man einen finanziellen Vorteil aus dem System ziehen, indem man in Zeiten geringerer Nachfrage kostengünstig Energie speichert und bei Spitzennachfrage zu hohem Preis wieder verkauft.

4.1 Umwandlungsmethoden für grünen Wasserstoff

Um grünen Wasserstoff herstellen zu können gibt es zurzeit zwei technische Möglichkeiten via einen Elektrolyseur in Verbindung mit einem Verdichter oder eine Biologische Umwandlung.

⁴² Vgl. Svilenyatyn o. J.

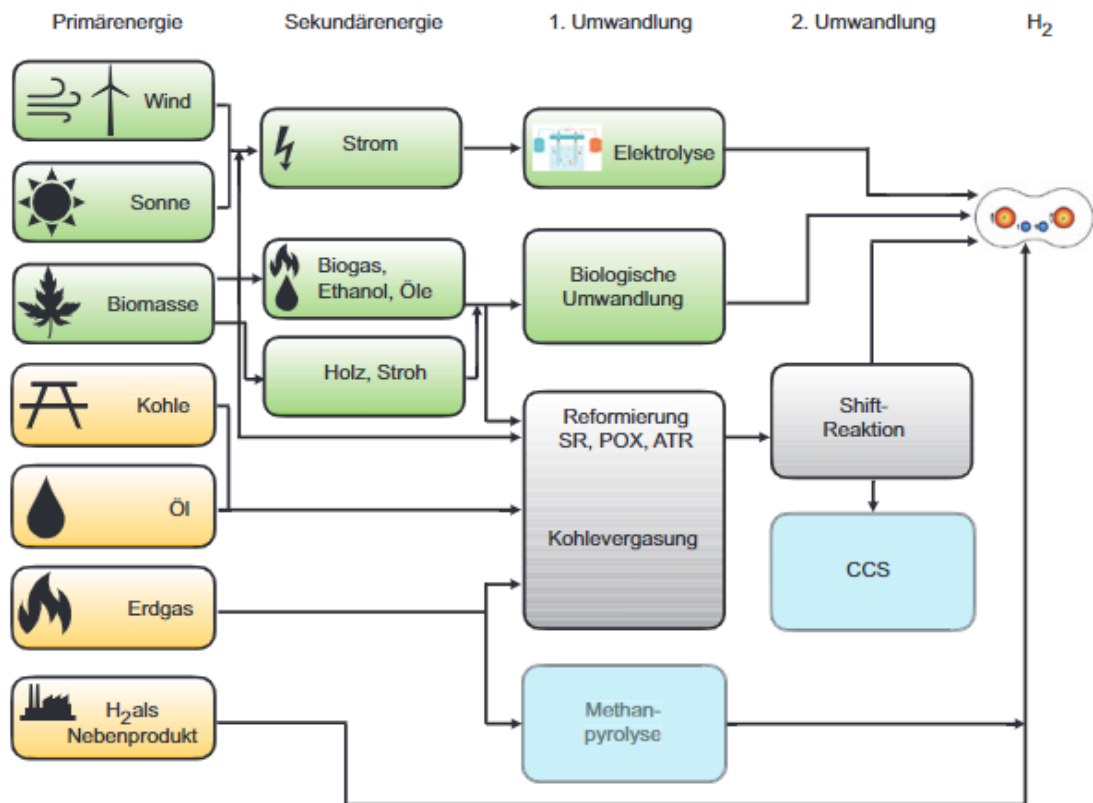


Abbildung 17 : Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff⁴³

4.1.1 Elektrolytisches Verfahren zu Wasserstoffherzeugung

Das elektrolytische Verfahren ist für die Energiewirtschaft ein Schlüsseltechnologie, da dieses Verfahren prädestiniert ist für eine sogenannte Sektorenkopplung in den überschüssigen Strommengen dem Stromnetz entnommen werden, um Wasser im flüssigen oder dampfförmigen Zustand elektrolytisch in Wasserstoff zu verwandeln. Dieser könnte dann direkt in das Gasnetz eingespeist werden oder in einem Speicher zu einem Kunden transportiert werden. Die heute verwendeten Technologien benötigen mit Ausnahme von der alkalischen Elektrolyse teure Edelmetalle wie Platin Iridium (PEM – Elektrolyse) oder seltene Erden wie beispielweise Lanthan (SOEL Elektrolyse).

Prinzipiell unterscheidet man zwischen:

- PEM Elektrolyse Anlagen
- AEL Elektrolyse Anlagen
- SOEC Elektrolyse Anlagen

⁴³ Vgl.Schmidt 2020, S. 218.

Die Einsatzbereiche der jeweiligen Elektrolyseanlagen sind in Tabelle 4 zu sehen.

Elektrolyse Arten		Temperaturbereich	Reversibler Betrieb	Modulgröße
AEL	Akalische Elektrolyse	50-90°C	begrenzt möglich	0.5 - 5 MWeI
PEM	Membran Elektrolyse	50-90°C	begrenzt möglich	0.1 - 1.5 MWeI
SOEC	Hochtemperatur Elektrolyse	500-900°C	möglich	KW Bereich

Tabelle 4: Kennzahlen der Elektrolyseverfahren⁴⁴

4.1.2 Biologische Verfahren zur Wasserstoffgewinnung

Eine zukünftige biologische Wasserstoffproduktion kann vor allem mit drei unterschiedlichen Verfahren erfolgreich sein. Allen drei ist gemein, dass in ihnen Mikroorganismen einen wesentlichen Anteil in der jeweiligen Verfahrenskette übernehmen. Die Verfahren sind die Biophotolyse, die mikrobielle Elektrolyse und die Fermentation. Hilfestellung leistet bei der mikrobiellen Elektrolyse neben der Bereitstellung von Biomasse der Eintrag von regenerativ erzeugtem Strom und Sonnenlicht.⁴⁵

4.2 Konventionelle Kraftwerke zur Elektrizitätsgewinnung

Die zurzeit wohl gebräuchlichsten konventionellen Kraftwerke sind Kohlekraftwerke, Gaskraftwerke, Gasturbinenkraftwerke und nukleare Kraftwerke.

⁴⁴ Vgl.Brinner 2018, S. 16.

⁴⁵ Vgl.Schmidt 2020, S. 294.

Kraftwerkstyp	Wirkungsgrad	Co2 Kg/kWh	LCOE min €/kWh	LCOE max €/kWh
GuD Gas und Dampfturbinen Kraftwerk	< 63%	0.42-0.48	0.094	0.210
Steinkohlekraftwerk	30-40%	0.85-1.20	0.060	0.100
Braunkohlekraftwerk	30-40%	0.75-1.10	0.050	0.080
Kernkraftwerk	35%	0.02-0.12	0.090	0.180

Tabelle 5: Eckdaten konventionelle Kraftwerke⁴⁶

Bei den Kernkraftwerken ist es etwas schwierig die Kosten bzw. den CO₂ Ausstoß anzugeben, da die Endlagerung der Brennstäbe noch hunderte von Generationen andauern wird, deswegen sind diese Angaben mit Vorsicht zu betrachten. Wenn man nun alle Kraftwerkstypen auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft und Nutzungszeit, Investitionskosten, Betriebskosten, Auslastungsgrad gegenüberstellt, dann kann das Resultat teilweise irreführend sein, da die prognostizierten Nutzungsraten, der vorhandene Ressourcenmix und die Kapazitätswerte in unterschiedlichen Regionen stark variieren können.

Die in der Table 5 stehenden Werte und Wirkungsgrade so wie die Stromgestehungskosten können große Streubreiten haben, die vom Wirkungsgrad der Anlage des Typen, dem Alter der Anlage abhängig ist.

Wenn man nun den gesamten Prozess analysiert, welcher ein Wirkungsgrad bei der Endanwendung ankommt, kommt man auf ein ernüchterndes Ergebnis. Im Beispiel Deutschland muss man noch zu den Kraftwerksverlusten auch noch die Netz Distributionsverluste von ~8%⁴⁷ mitbeachten. In der Abbildung 18 wird dies noch näher graphisch erläutert.

⁴⁶ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 51.

⁴⁷ Vgl. APG o. J.

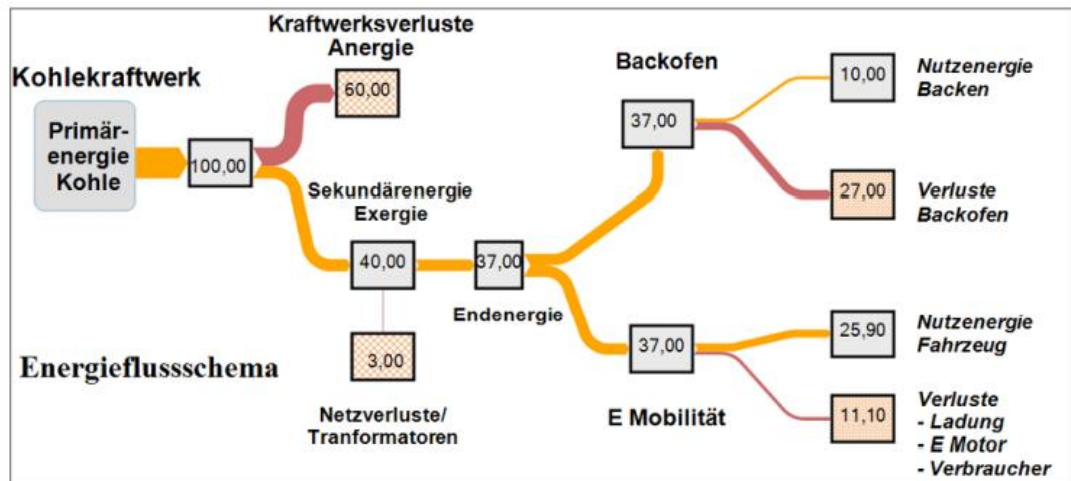


Abbildung 18 Energieflussschema eines Kohlekraftwerks mit Anwendungsbeispiel⁴⁸

4.3 Kraftwerk mit erneuerbarer Energie

Prinzipiell unterscheidet man drei erneuerbare Primärenergiearten:

- die Solarstrahlung als Folge der Kernfusion im Inneren der Sonne
- die geothermische Energie als Folge des radioaktiven Zerfalls im Erdkern
- die Gezeitenenergie als Folge der Planetenbewegung und Gravitation.

Die Solarstrahlung kann direkt genutzt werden. Daneben bildet sie die Grundlage für weitere regenerative Energiearten: Die unterschiedliche Erwärmung der Erdoberfläche bewirkt Luftdruckunterschiede, in der Folge entstehen in der Atmosphäre Luftströmungen. Die Solarstrahlung treibt den Wasserkreislauf an und ist Voraussetzung für die Produktion von Biomasse durch Fotosynthese. Die aus den genannten regenerativen Primärenergiequellen resultierenden Energieströme unterscheiden sich hinsichtlich der Energiedichte und der Verfügbarkeit. Durch geeignete Technologien ist die Umwandlung regenerativer Primärenergieträger in verbrauchsgerechte End- und Nutzenergie möglich.⁴⁹

⁴⁸ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 52.

⁴⁹ Vgl. Reich 2013, S. 45.

Kraftwerkstyp	Wirkungsgrad	Co2 Kg/kWh	LCOE min €/kWh	LCOE max €/kWh
Photovoltaiksysteme Flächenmontage	12-18%	0.02-0.05	0.060	0.120
Windkraftwerke onshore	45%	0.020	0.040	0.080
Windkraft offshore	45%	0.020	0.080	0.130
Biomassekraftwerk Biogas	65%	0.050	0.100	0.150
Thermische Solarkraftwerke	75%	0.010	0.080	0.180

Tabelle 6: Eckdaten regenerative Kraftwerke⁵⁰

4.4 Fallbeispiele zur Herstellung von grünem Wasserstoff

4.4.1 Erläuterung Wasserstoffgestehungskosten

Die Produktions- bzw. Gestehungskosten (englischsprachig: Levelized Cost of Production, abgekürzt LCOP) setzen sich bei der Herstellung grünen Wasserstoffs aus folgenden Kostenblöcken zusammen.

$$K = \frac{K_i + K_v + K_b + K_s - E}{m[H_2]}$$

Formel 1: Wasserstoffgestehungskosten⁵¹

K_i = Investitionskosten

K_v = Verbrauchergebundene Kosten inkl. Stoff und Energiebezug

K_b = Betriebsgebundene Kosten einschließlich Wartung und Personal

K_s = Sonstige Kosten einschließlich Versicherung

E = Einnahmen für Wasserstoff und Sauerstoff

M = Erzeugte Wasserstoffmenge in einem bestimmten Zeitraum

K = Wasserstoffgestehungskosten [€/kgH₂]

4.4.2 Erläuterung Wasserstoffgestehungskosten unter Berücksichtigung der Kapitalwertmethode.

⁵⁰ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 60.

⁵¹ Vgl. ebd., S. 69.

Um eine Investitionsentscheidung zu treffen wird häufig die Kapitalwertmethode verwendet. Sie gibt unter Berücksichtigung des Cashflows zum Zeitpunkt null abgezinst an ob eine Investition sinnvoll ist oder nicht. Ist der Kapitalwert positiv ist die Investition ökonomisch sinnvoll ist er negativ sollte man die Investition noch mal überdenken.

In den folgenden Fallbeispielen werden wir die LCOE nach der Kapitalwertmethode anwenden. Die Formel ist wie folgt:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{G_{fix} + G_{var}}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \left(E_t \frac{Et}{(1+i)^t} \right)}$$

Formel 2: Stromgestehungskosten⁵²

I_0	=	Investitionskosten im Zeitpunkt 0
t	=	Zeitpunkt
G_{fix}	=	fixe Betriebskosten
G_{var}	=	variable Betriebskosten
G_s	=	Restwert / Entsorgung sonstiges
E_t	=	Nettostromerzeugung im Zeitpunkt t
r	=	Diskontierungssatz

4.4.3 Fallbeispiel 1: Dezentrale Anlage mit Photovoltaik 20 Jahre

Dieses Fallbeispiel ist ein dezentrales H₂- Herstellungssystem, das an einer Tankstelle fungieren soll. Es soll Firmen mit H₂ beliefern welche Gabelstapler oder Bagger mit H₂ in Verwendung haben. In dieser Kalkulation wird angenommen das die Elektrolyseure einen Wirkungsgrad von 70% und der Verdichter von 90% hat. Die Kosten für den Wasserbedarf von 9l pro 1kg H₂ sind im Betriebsaufwand einberechnet. Die Anschaffungskosten von 7 250 000€ wurden aus einer aktuellen Zeitschrift entnommen.⁵³

⁵² Vgl.ebd.

⁵³ Vgl.Magazin NEBENWERTE 2021.

Ökologische Merkmale von grünem Wasserstoff

Prozess 1: Elektrolyse		
Parameter		Preis/Energie
Kapitalkosten:		
Investitionskosten Elektrolyseur 20MW von der Firma NEL		7 250 000.00 €
Kapitalkosten über 20 Jahre $6\%(1+i)^t \times$ Investitionskosten		28 055 212.35 €
Betriebskosten:		
Wartungskosten	7%/a	507 500.00 €
Betriebsaufwand	150000€/a	150 000.00 €
Betriebskosten:	über 20 Jahre	13 150 000.00 €
Gesamtkosten Elektrolyse	Betriebskosten + Investitionskosten	41 205 212.35 €

Tabelle 7: Fallstudie Kosten Elektrolyse Laufzeit 20 Jahre

Prozess 2: Verdichter/Speicher		
Parameter		Preis/Energie
Kapitalkosten:		
Investitionskosten Tankstelle/Verdichter/ Speicher von der Firma NEL		2 000 000.00 €
Kapitalkosten über 20 Jahre $7\%(1+i)^t \times$ Investitionskosten		7 739 368.92 €
Betriebskosten:		
Wartungskosten	7%/a	140 000.00 €
Betriebsaufwand	70000/a	70 000.00 €
Betriebskosten:	über 20Jahre	4 200 000.00 €
Gesamtkosten Elektrolyse	Betriebskosten + Investitionskosten	11 939 368.92 €

Tabelle 8: Fallstudie Kosten Verdichter Laufzeit 20Jahre⁵⁴

In diesem Fallbeispiel wird angenommen (fiktiv), dass die Errichtung in Österreich stattfindet. Man kann deshalb annehmen es kommt zu ca. 2000h Sonnenstunden pro Jahr. Der Auslastungsgrad ist optimistisch angenommen (maximal Wert). Die Kosten der PV Anlage wurden mit 600€ / kWp⁵⁵, der Grundstückspreis zu 15€/m² auf einer Fläche von 105000m² wird angenommen.

⁵⁴ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 79.

⁵⁵ Vgl. Kost 2018, S. 10.

Ökologische Merkmale von grünem Wasserstoff

Prozess 3 :PV Anlage			
Generierte Energie	20MW x 20J x 2000h	800000000	kwh
Speicherbare Energie Menge	n= 0.63	504000000	kwh
Menge H2 im Speicher nach 20 Jahren	1kg H2 = 33.33kwh	15121512.15	kg H2
Menge Jährlich		756075.6076	kg H2
Mänge Täglich		2071.440021	kg H2
Investitionskosten PV Anlage	Unter der Annahme 1kw ~1200€	12 000 000.00 €	
Grundstück Kosten	Annahme für kollektorfläche von 104000m ²	1 500 000.00 €	
Kapitalkosten über 20 Jahre		52 240 740.24 €	

Gesamtkosten: Elektrolyse + Verdichter/Speicher + PV Anlage	Kosten über 20 Jahre	105 385 321.52 €
---	----------------------	------------------

Tabelle 9: Fallstudie Gesamtkosten in €

LCOE Prozess gesamt	Summe Aller Kosten über Betriebszeit / Summe generierte Energie	0.21	€/kWh
	Kosten H ₂ /kg	6.97	€/kgH ₂
Benzin EU		0.18 €	€/kWh
Benzin USA		0.11 €	€/kWh

Tabelle 10: Fallstudie Vergleich Herstellkosten H₂ vs. Benzin

LCOE Prozess H ₂ (ohne PV Anlage)	Summe Aller Kosten über Betriebszeit / Summe generierte Energie	0.11	€/kWh
--	---	------	-------

Tabelle 11: Energiegestehungskosten für H₂

In diesem Fallbeispiel kann man nun folgendes Ableiten:

$LCOE_{\text{Prozess gesamt}} >$ Benzin Preis in der USA und in der EU. Daraus kann man ableiten, diese Fallstudie ist nicht wirtschaftlich, die Kosten für eine kWh H₂ sind aber nur geringfügig höher als Kraftstoff (in der EU) trotzdem ist dieses Geschäftsmodell nicht konkurrenzfähig. Dennoch sollte angemerkt sein, wenn man staatliche Förderungen erhalten könnte, ist man schnell konkurrenzfähig. In den USA wäre dieses Geschäftsmodell nicht wirtschaftlich.

4.4.4 Fallbeispiel 2: Dezentrale Wasserstoffherstellung Laufzeit 20 Jahre mit Windenergie Onshore.

In diesem Fall kann man die Tabelle 7 und 8 wieder verwenden. Es ändert sich nur die zu Verfügung gestellte Energie in diesem Fall aus Windkraft.

$LCOE_{H_2}$ wird von Fallbeispiel 1 übernommen also 0.11 €/kWh

$$LCOE_{\text{gesamt}} = LCOE_{H_2} + \frac{LCOE_{\text{Wind}}}{\eta}$$

$$LCOE_{\text{gesamt}} = 0.11\text{€/kWh} + \frac{0.04\text{€/kWh}}{0.63}$$

$$LCOE_{\text{gesamt}} = 0.17\text{€/kWh}$$

LCOE Prozess gesamt	Summe Aller Kosten über Betriebszeit / Summe generierte Energie	0.17	€/kWh
	Kosten H ₂ /kg	5.67	€/kgH ₂
Benzin EU		0.18 €	€/kWh
Benzin USA		0.11 €	€/kWh

Bei der Betrachtung des Fallbeispiels 2 kommt man zum Ergebnis, dass es absolut wirtschaftlich ist in der EU mit Windkraftanlagen H_2 herzustellen und als Kraftstoff anzubieten. Man kann davon ausgehen, dass in unseren Breiten eine wirtschaftliche Erzeugung denkbar ist. Des Weiteren darf man annehmen, dass die Investitionskosten durch die Stückzahldegression fallen werden und somit es noch attraktiver wird, in solch ein GM zu investieren.

4.5 Ableitung Nutzversprechen aus Fallbeispiel 1 und 2

Aus technischer Sicht ist die Herstellung von grünem H_2 nicht problematisch, sondern industriell schon heute verfügbar und wirtschaftlich absolut denkbar. Geeignet zur grünen Stromerzeugung sind Wind, Wasser, Solar, Biomasse, und in Zukunft dann auch Gezeitenkraftwerke und Wellenkraftwerke. Zusätzlich kann man davon ausgehen, dass sich die Wirkungsgrade der Elektrolyseure noch deutlich nach oben korrigieren lassen, da sich noch 3 unterschiedliche Typen einen Wettkampf geben. (im Fokus liegen: Effizienz, Investitionskosten und Flexibilität). Grundsätzlich haben die Fallbeispiele 1 und 2 gezeigt, dass die wirtschaftliche Herstellung von grünem H_2 heute schon möglich ist, dennoch muss man die geographische Lage der Anlage eines Elektrolyseurs immer genauestens prüfen. Die Vorteile liegen schon mal auf der Hand. Es liegt jetzt daran diese Technologie in ein passendes Geschäftsmodell zu verpacken und anzuwenden. Denn abgesehen von dem kommerziellen Vorteil hat der grüne H_2 einen immensen Vorteil bei dem CO_2 Ausstoß. In der folgenden Tabelle werden die Nutzversprechen oder „Value Proposition“ für ein eventuelles GM erläutert.

Faktoren	Nutzversprechen mit grünem H ₂
Preis	Energiekosten für H ₂ , Preise für Umwandlungsprozesse, Preise für Speicherung von H ₂ , Peripherie-Preise, Investitionskosten der Prozesse, keine großen Preisschwankungen ausgesetzt.
Kostenreduktion	Reduzierung der Produktionskosten im Umwandlungssystem, Reduktion von Herstell- und Energiekosten, Umweltkosten, Laufzeiten Verlängerung, Gesundheitskosten, Kosten für Umweltrisiken, Steuerbelastungen, Fördermittel,
Neuheit	effiziente dezentrale Systeme, hybride Systeme (Wind/Solar), Multi Treibstofftankstellen, autarke dezentrale Systeme, Elektrolyseure Wirkungsgrad, Einsatz umweltfreundlicher Materialien
Risiko Minimierung	Keine Energiekostenschwankungen, keine Umweltkosten, keine Umweltrisiken, Energieverfügbarkeit, unabhängige Energiewandlung, großer Kundenkreis
Kundenforderung	Eigenständig/autark, Energieunabhängigkeit, geringer Platzbedarf, Flexibilität, hohe Lebensdauer, wartungsfreundlich, umweltfreundlich, geräuscharm, Smart-Grid-fähig, online
Markenstatus	Neu und einzigartig, Name, Qualität, Alleistellungsmerkmale
Komfort/ Benutzerfreundlichkeit	24 h Energie, online, Bedienungsfreundlichkeit, Fernwartung
Verfügbar	24/7, Energieverfügbarkeit, eigene Energie Produktion
Design	Spielt eine untergeordnete Rolle, bei kleineren Anlagen ggf. Farbe, Form
Produktionsverbesserung	Höhere Effizienz, kostengünstiger zu produzieren, Materialien
Umweltfreundlichkeit	keine Schadstoffemissionen

Tabelle 12: Nutzversprechen H₂⁵⁶

⁵⁶ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 87.

5 Analyse Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff

Wie in Kapitel 2 beschrieben, ändert sich durch die eingeleitete Energiewende in Europa die Energieinfrastruktur. Es liegt nun an der Industrie die Innovationen voranzutreiben, um eine mögliche Energietransformation oder noch besser eine Erneuerbare Energie Infrastruktur zu schaffen. Grüner H₂ könnte hier die wichtige Rolle des Bindegliedes zwischen den heutigen Energiesektoren erfüllen. Weltweit kann man in den reichen Industrieländern den Wandel der für die Energietransformation notwendigen Energieträger von Fossilen zu Erneuerbaren beobachten. Gründe dafür sind:

- geringere Abhängigkeiten von fossilen Energieträgern
- Abkehr von endlichen Energieressourcen
- Reduzierung des Klimawandels durch Dekarbonisierung
- Bessere Kostenkontrolle durch erneuerbare Energieressourcen

Wie in Kapitel 4 aus den Fallbeispielen hervorgeht, um H₂ wirtschaftlich als Alternative zu den fossilen Energieträgern einzusetzen, ist der naheliegendste Vergleich die Herstellungskosten in €/kWh in eine ähnliche Größenordnung zu bringen wie die fossilen Energieträger. Hauptsächlich hängen die Herstellungskosten von grünem H₂ von Stromgestehungskosten von der zur Verfügung gestellten erneuerbaren Energieressource ab. Wenn man den Einsatzort der regenerativen Kraftwerke klug löst, kann man schon heute mit den konventionellen Energieträgern (Kohle, Öl, Gas) vorteilhaft im Wettbewerb stehen. Zusätzlich eine positive Auswirkung sollten die international ratifizierten Verträge zur Treibhausgasreduktion bewirken. Dennoch bleiben die wirtschaftlichen und energiepolitischen Ziele einzelner Volkswirtschaften ein unklarer Faktor. Stand Heute ist die Nachfrage nach grünem H₂ bedingt durch die noch geringen Anwendungsmöglichkeiten etwas eingeschränkt und deswegen nur in Nischenmärkten zu finden. Um die volatilen erneuerbaren Energien kontinuierlich im Energienetz zur Verfügung zu stellen sind neue Technologien wie dezentrale Umwandlungssysteme, ein Internet of Energy, und Speichersysteme notwendig. Um die Energiesektoren Wärme – Strom – Mobilität miteinander zu koppeln ist das dezentrale Umwandlungs- und Speichersystem basierend auf grünem H₂ gerade prädestiniert. Eine Studie von McKinsey/Hydrogen geht davon aus, dass im Jahr 2050 400 Mio. Autos 15-20 Mio. LKW und rund 5 Mio. Busse mit H₂ angetrieben werden, dies ist ca. 20% des jeweiligen Transportsegmentes. Weiters kann man hier entnehmen,

dass rund $\frac{1}{4}$ der Fahrgastschiffe und rund $\frac{1}{5}$ aller Züge mit synthetischem Kraftstoff angetrieben werden.⁵⁷

5.1 Marktteilnehmer in einer grünen H₂-Ökonomie

Bereits heute gibt es Unternehmungen welche im Bereich der Wasserstofferzeugung, Distribution und Anwendung tätig sind. Wenn man die Produktionsportfolio der großen Gasproduzenten wie Linde, Shell oder Air-Liquid genauer betrachtet findet man bei allen Anwendungen den grünem H₂. Die angebotene Menge ist aber überschaubar. In der Tabelle 13 sind die heutigen Stakeholder in den verschiedenen Bereichen aufgelistet.

Der entscheidende Faktor zur erfolgreichen Akzeptanz und Umsetzung von grünem H₂ als Energieträger ist die Bereitstellung einer Infrastruktur in Form von Tankstellen, Transportnetzen und Speichernetzen. Aktuell stellen diese Infrastruktur eher Regierungsunternehmen mit EU-Förderprogrammen oder Institutionen bereit. Seit das Augenmerk auf die EEQ Form gelegt wird können auch kleine Firmen oder gar Haushalte in diesem Markt mitmischen. Denn jedem dem die EEQ in Form von Sonne oder Wind zur Verfügung steht könnte grünen H₂ erzeugen, speichern und nutzen. Dies ist im Fallbeispiel im Kapitel 4 erläutert worden.⁵⁸

⁵⁷ Vgl. McKinsey&Company 2021, S. 20–38.

⁵⁸ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 91–96.

Bereiche		Unternehmung:
Erzeugung		Shell, AirLiquid, Linde, Air products and chemicals, US Praxair Inc US, Iwatani Japan, Nel Showa Denko K.K, Hydrogenics Co Canada, Total, Hazar Group Australia, Hazer Group, Linde AG H ₂ , Hydrogenious Technologies, Hydrogenics
Distribution		Chiyoda Hydrogenious
Stationäre		ITM Power, Ballard, Hydrogen Pro AS, Mitsubishi Hitachi power systems, Tianjin H ₂ Equipment, GreenHydrogen, Enapter, AREVAH ₂ Gen, ERGOSUP, ErreDue, H-Tec Systems, Helbio, Höller, Home_Power_Solution (HPS), Hugreen Power Inc., HydrogenPro, Tianjin, P.R Sunfire, Proton Motor Fuel Cells, Nel
Mobile		Toyota, Honda, Hyundai, Mercedes, Volkswagen, BMW, Giner ELX, Ballard, Proton Motors Fuel Cells,
Sonstige		Institute ZSW Ulm, Fraunhofer Institut für Solarsysteme ISE,

Tabelle 13: H₂ Unternehmungen⁵⁹

5.2 Geschäftsfelder als Basis für Modelle

Die Geschäftsgrundlage eines Unternehmens ist die Umschreibung eines Geschäftsfeldes. Nach Abell wird ein Geschäftsfeld wie folgt definiert: „Ein Geschäftsfeld ist somit ein Teilbereich eines Unternehmens mit eigenständiger Nachfrage-, Leistungs-, Technologiecharakteristik, wodurch eigenständige strategische Entscheidungen eines Geschäftsfelds hinsichtlich Wettbewerbsumfeld und unternehmerischer Ressourcen ermöglicht werden“. Und mit Hilfe der CANVAS Methode kann man dann das Geschäftsfeld von anderen Geschäftsfeldern abgrenzen.

Damit die Definition von dem Geschäftsfeld mit grünem H₂ sinnvoller Art passiert, werden folgende Fragen gestellt:

⁵⁹ Vgl.ebd., S. 96.

- Ein Geschäftsfeld sollte eine eigenständige Kundengruppe ansprechen, deren Bedürfnisse und Bedarf auch längerfristig andauern.
 - Für diese Zielgruppe sollte kennzeichnend sein, dass sie über längerfristig andauernde, gleichartige Bedürfnisse und Bedarf verfügen, welche sich von anderen Segmenten deutlich unterscheiden.
 - Dem Unternehmen muss es möglich sein, für ein einzelnes Geschäftsfeld eine von anderen Geschäftsfeldern unabhängige Strategie zu verfolgen.
 - Die Verantwortungen und Entscheidungsbefugnisse für ein Geschäftsfeld sollten sinnvoll einer organisatorischen Einheit im Unternehmen übertragen werden.
 - Aufwendungen und Erträge sind dem Geschäftsfeld eindeutig zuzuordnen.
 - Die Bildung von Geschäftsfeldern folgt nach Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten.⁶⁰
- Für grünen Wasserstoff ergeben sich nun 3 Geschäftsfelder:
- Herstellung von grünem Wasserstoff
 - Infrastruktur für grünem Wasserstoff
 - Anwendung von grünem Wasserstoff

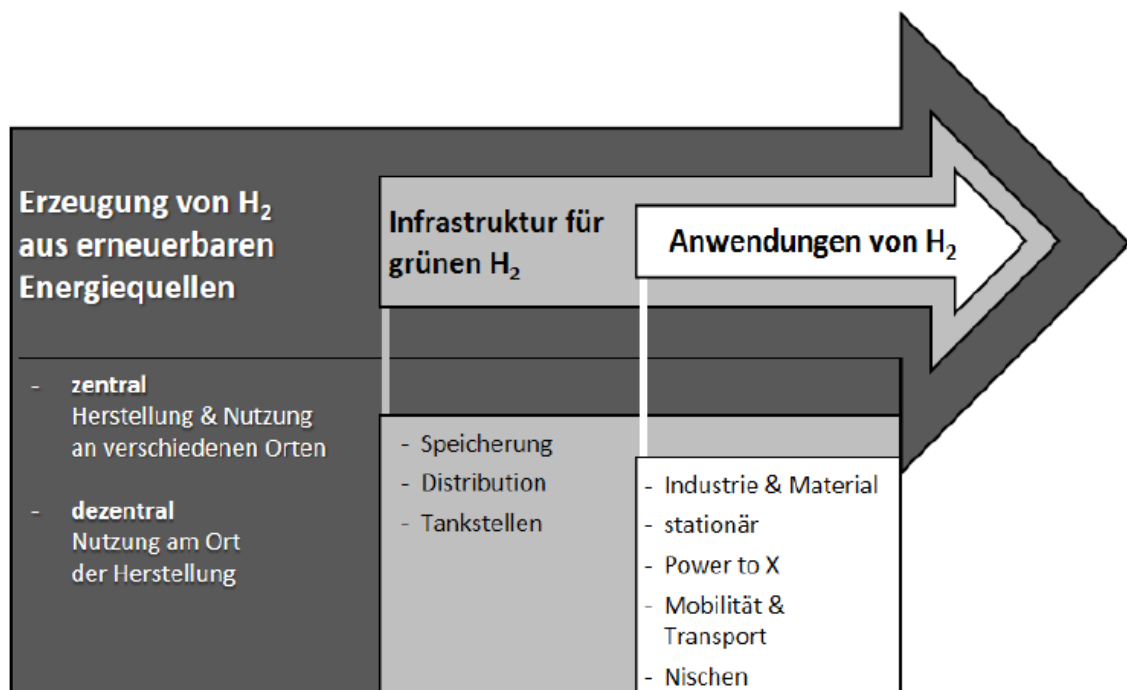


Abbildung 19: Geschäftsfelder mit grünem H₂⁶¹

⁶⁰ Vgl. Pohlmann C. 2022.

⁶¹ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 99.

5.2.1 Geschäftsfeld: Herstellung von Wasserstoff

Das erste Geschäftsfeld ist die Herstellung von H₂ als grüner Sekundärenergieträger. Man unterscheidet nun die dezentrale und zentrale H₂ Herstellung. Dezentrale Anlagen sind meist Anlagen die als Einheit definiert sind, die H₂ für die Anwendung vor Ort erzeugen. Diese kann eine dezentrale Tankstelle, energieautarke Gebäude, mobile Anwendung oder Stand Alone Systeme sein. Zentrale sind Anlagen, welche den grünen H₂ aus erneuerbaren Energiequellen erzeugen und danach diesen weiterleiten und dieser dann zu synthetischen Kraftstoff weiterverarbeitet wird oder man diesen für andere chemische Prozesse nutzt. Eine perfekte Anwendung für eine zentrale Anlage ist die Überkapazitäten der volatilen erneuerbaren Energiequellen effizienter zu nutzen. Es kommt sehr oft vor, dass die Energienachfrage geringer ist als die mögliche Energienutzung. Da diese Energie (Sonne, Wind) zu einem Tageszeitpunkt vorhanden ist wo das Netz diese nicht brauchen bzw. speichern kann. Diese sogenannten Abregelungsmenge lag 2018 in Deutschland bei 5403 GWh. Dies entspricht einen Entschädigungsanspruch von ca. 635Mio€. ⁶² Mit diesem gewonnenen Wasserstoff kann man nun das Gasnetz unterstützen (Power to Gas) oder wenn sich die Energienachfrage wieder erhöht kann man via Elektrolysegeneratoren wieder in das Netz einspeisen (Gas to Power).

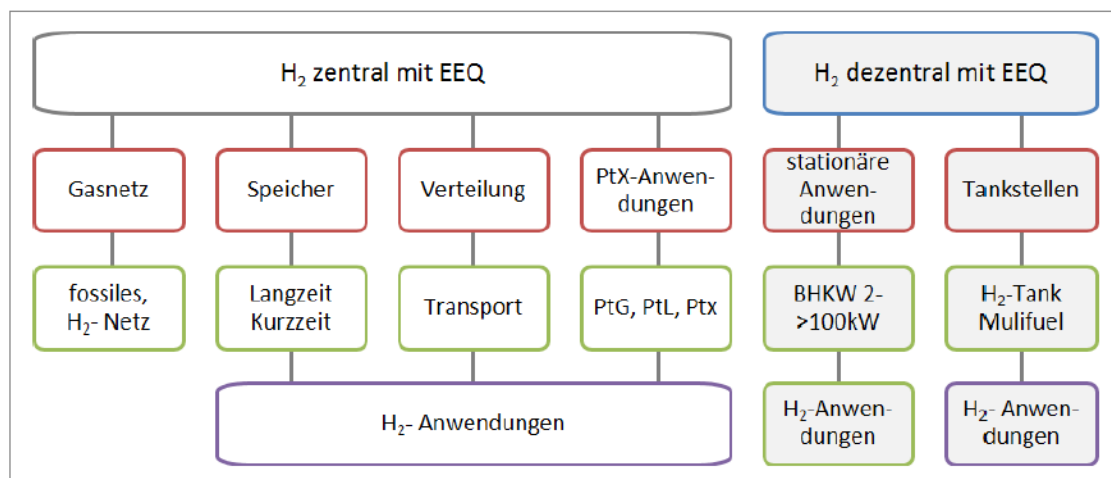


Abbildung 20: Geschäftsfelder der H₂ Erzeugung⁶³

⁶² Vgl.ebd., S. 98.

⁶³ Vgl.ebd., S. 104.

5.2.2 Geschäftsfeld: Infrastruktur mit grünem Wasserstoff

In diesem Geschäftsfeld ist die Speicherung und der Transport von H₂ als Erneuerbare Energieträger im Fokus. Je nach Anwendung gibt es unterschiedliche Speichertechnologien, hier wird dann speziell auf den Umwandlungswirkungsgrad ein genaues Auge geworfen. Idealerweise kann man in Zukunft den Gasförmigen Wasserstoff in bestehenden Gasnetzen als Distributionsnetzwerk verwenden. Im Mobilitätssektor wird auf Drucktanks zurückgegriffen, welche man auch in der dezentralen Herstellung als Pufferspeicher verwenden könnte. Interessant ist auch die Idee die untertägigen Gasspeicheranlagen um funktionalisieren und als H₂ Speicher zu verwenden. Genau durch dieses Kundenbedürfnis entsteht nun ein neues Geschäftsfeld.

GM Nr.:	Beschreibung Geschäftsmodelle
GM 1.0	Speicherung von grünem H ₂
GM 1.1	kurzfristige/mittelfristige Speicherung von H ₂ unter Druck
GM1.2	Langfristige Speicherung in Kavernenspeicher
GM1.3	Speicherung von H ₂ in flüssiger Form
GM 1.4	Speicherung von H ₂ unter bis 300bar
GM 1.5	Speicherung von H ₂ unter bis 700bar
GM 2.0	Transport von flüssigen H ₂ (Straße, Wasser, Schiene)
GM 2.1	Transport von gasförmigen H ₂ (Straße, Wasser, Schiene)
GM 2.3	Transport über bestehendes Gasnetz

Tabelle 14: Geschäftsmodelle für Geschäftsfeld Infrastruktur ⁶⁴

In dem Geschäftsfeld der Infrastruktur sind Großkonzerne der Energiewirtschaft im Vorteil, da diese das bestehende Gasnetz als Distributionswerkzeug kostengünstig einsetzen können. Wichtig wird es sein, wo der Energielieferant seine Speicherung vornimmt, denn diese ist platzintensiv.

⁶⁴ Vgl.ebd., S. 110.

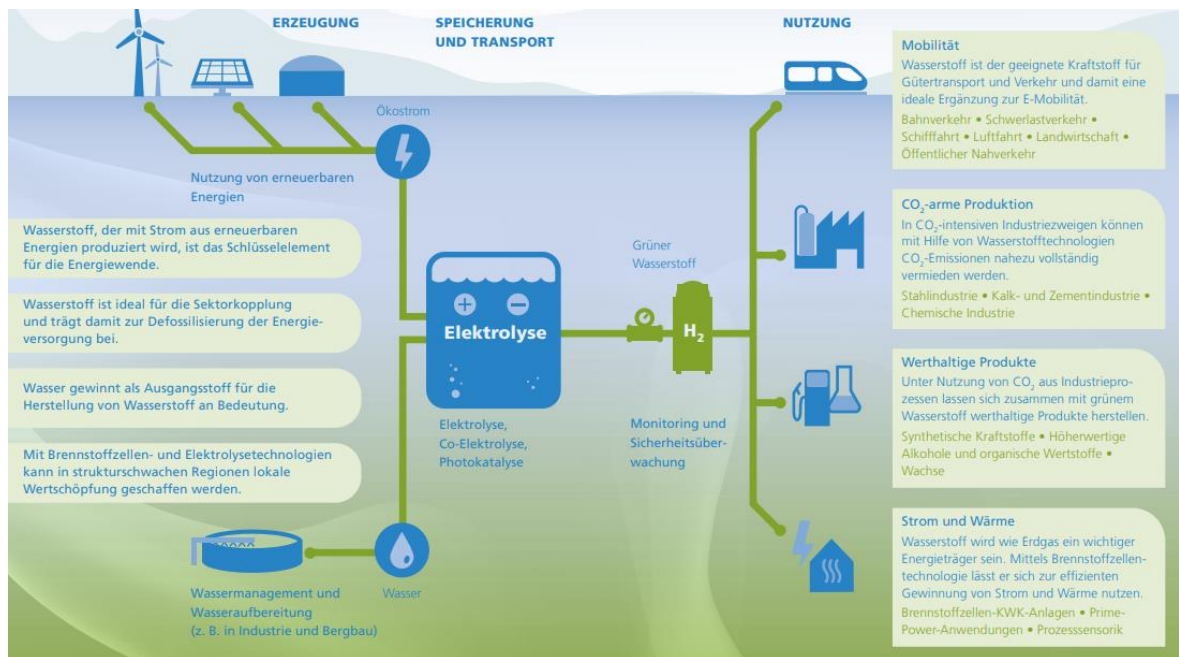


Abbildung 21: Erklärung der Wertschöpfungskette von H₂⁶⁵

5.2.3 Geschäftsfeld: Anwendungen von Wasserstoff

Das letzte Geschäftsfeld ist die Anwendung und setzt sich aus vielen Stakeholdern zusammen die heute meist in Nischenmärkten zu Hause sind. Zu den bekannten 3 Sektoren (Elektrizität, Wärme, Mobilität) kommt die Dienstleistung noch dazu. Die Tabelle 15 beschreibt die Anwendungen von grünem H₂.

⁶⁵ Vgl. Jahn 2022.

Sektoren	H ₂ Anwendung
Elektrizität	Stationäre Systeme, BHKW, Elektrolyseure, tragbare Systeme (Batterien, Back-up-Systeme), Notstromversorgungen, Generatoren für unterschiedliche Anwendungen (Strom, Licht)
Wärmeversorgung	Brennstoffzellenheizgeräte, Gasgeräte
Verkehr, Mobilität, Transport	Brennstoffzellenfahrzeuge für industrielle Fahrzeuge, Zweiräder, maritime Fahrzeuge, Flugzeuge, Sonderfahrzeuge
Dienstleistung	F&E, Schulungen, Dokumentationen, Vorschriften, Berechnungen, Ausbildungen

Tabelle 15: Geschäftsfeld Sektoren Anwendungen von grünen H₂

Diesen Geschäftsfeldsektor Anwendungen kann man nun wiederum in ein Geschäftsmodell Strukturen unterteilen. In diesen Fall gibt es dann die GM in „Stationären Anwendungen“ hier zählt die Elektrizitätsgewinnung und Wärmeversorgung dazu und die Mobilmodelle.

GM Nr.:	Beschreibung Geschäftsmodelle
	Brennstoffzellenfahrzeuge mit Druckspeicher
GM 3.1	BZ - PKW
GM 3.2	BZ - Fahrzeuge für kommerzielle Fahrzeuge
GM 3.3	BZ - Fahrzeuge Schwerlastwagen
GM 3.4	BZ - Fahrzeuge ÖNV (Busse)
GM 3.5	BZ-Fahrzeuge Schienenverkehr
GM 3.6	BZ-Fahrzeuge Marine
	Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Speicher
GM 4.1	ICE-Fahrzeuge
GM 4.2	ICE-Fahrzeuge kommerzielle Fahrzeuge
GM 4.3	ICE-Fahrzeuge Schwerlastwagen
GM 4.4	ICE-Fahrzeuge ÖNV
GM 4.5	ICE-Schienenfahrzeuge
GM 4.6	ICE-Maritime Fahrzeuge
	Fahrzeuge mit Hybris Systeme FCEV
GM 5.1	BZ-Fahrzeuge bis 3,5 Tonnen (private Nutzer)
GM 5.2	BZ-Fahrzeuge kommerzielle Fahrzeuge
GM 5.3	BZ-Fahrzeuge Schwerlastwagen
GM 5.4	BZ-Fahrzeuge ÖNV

Tabelle 16 : Geschäftsmodelle Mobilität

GM Nr :	Beschreibung Geschäftsmodelle
	Brennstoffzelle zur Energieumwandlung in Strom und Wärme oder nur eine Energieform
GM 6.1	Brennstoffzellenheizgerät mit Speicher für Wärme-/Strom-Umwandlung < 15 kW
GM 6.2	Notstromversorgung BZ mit Speicher zur Stromerzeugung
GM 6.3	KWK mit BZ-Speicher für Wärme/Strom > 10 kW
GM 6.4	Unterbrechungsfreie Stromversorgung, Speicher, BZ, elektrische Energie
	Stationäre Anwendungen mit Elektrolyseuren zur Erzeugung von grünem Strom für PtX-Anwendungen
GM 7.1	EEQ mit Elektrolyseur, H ₂ -Erzeugung und Distribution in das Gasnetz
GM 7.2	EEQ mit Elektrolyseur, H ₂ -Erzeugung, Methanisierung, Gasnetz
GM 7.3	EEQ mit Elektrolyseur H ₂ -Erzeugung, CO ₂ und Flüssigtreibstoff
	Portable Anwendungen mit grünem H ₂
GM 8.1	Notleuchte BZ, Speicher Batterie, portable Beleuchtung CO ₂ -neutral
GM 8.2	Portables Netzteil, H ₂ -Speicher, BZ, Stromversorgung DC/AC

Tabelle 17: Stationäre GM Anwendungen⁶⁶

Zu Grunde liegen nun drei Geschäftsfelder:

- Erzeugung von Grünem H₂
- Infrastruktur
- Anwendung mit grünem H₂

Die GM Gliederung in den Tabellen 14 -17 sind heute noch überschaubar. Man kann davon ausgehen, dass durch die Weiterentwicklungen und Innovationen in diesen Bereichen die Variationsmöglichkeit zukünftig noch steigen wird.

⁶⁶ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 107–116.

6 Wasserstoff im Mobilitätssektor

Die Mobilität gehört zum Markenkern der heutigen globalisierten Gesellschaft. Der Schutz der Umwelt und das Bestreben, unseren Kindern und Enkeln auch in Zukunft eine lebenswerte Umwelt zurückzulassen, sollte Antrieb genug sein, über die Struktur und Art des Verkehrs von morgen nachzudenken. Es gibt Leuchtturmprojekte, die zeigen, dass der Verkehr auch CO₂ neutral sein kann, indem man Wasserstoff als Primärenergiequelle verwendet.

Es macht Hoffnung, wenn man die Wasserstoffmobilität genauer betrachtet: Eine ausgebaute Tankstelleninfrastruktur vorausgesetzt, gibt es keine Einschränkungen hinsichtlich auf Reichweite mehr und die Betankungszeit ist gleichwertig wie bei derzeit üblichen Sekundärenergiequellen (Benzin, Diesel und LPG). In Deutschland machen Brennstoffzellenzüge auf nicht elektrifizierten Strecken Furore, und zeigen, dass die Anwendung von Wasserstoff in Verbindung mit einer Brennstoffzelle funktioniert.

6.1.1 Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr

Der öffentlichen Nahverkehr CO₂ neutral zu betreiben ist möglich, dies zeigen verschiedene Vorzeigeprojekte wie:

- WSW (Wuppertaler Stadtwerke) setzte im Jahr 2020 die Idee um 10 Wasserstoffbusse im Nahverkehr zu testen. Die Busse werden mit Wasserstoff betankt, der aus dem Müll der Wuppertaler Bürger gewonnen wird. Mit dem gewonnenen Strom wird ein Elektrolyseur der WSW-Konzerntochter AWG beliefert, der wiederum Wasserstoff anliefert. Aktuell sind zehn Busse des belgischen Herstellers Van Hool im Einsatz. Die Reichweite beträgt je nach Linie ca. 280km.⁶⁷
- In Wien ist seit Dezember 2021 ein wasserstoffbetriebener Bus im Einsatz. Dieser soll dann bis 2025 mit 10 zusätzlichen Fahrzeugen unterstützt werden.⁶⁸

Aus diesen Feldversuchen kann man ableiten, dass die Leistungsfähigkeit der Wasserstofffahrzeuge vergleichbar ist mit herkömmlichen Diesel LKWs. Die Hauptvorteile dieser BZ Fahrzeuge sind: geringere Lärmemissionen in der Fahrgastzelle und natürlich die günstige Umweltbilanz. Die laufenden Kosten sind ähnlich wie bei einem Diesel Fahrzeug

⁶⁷ Vgl. WSW o. J.

⁶⁸ Vgl. Bundesdienst für Elektromobilität o. J.

dem gegenüberstehen aber die um 50% höheren Investitionskosten (Anschaffungskosten).⁶⁹

6.1.2 Wasserstoff im Schienenverkehr

Grundsätzlich spricht nichts gegen den Einsatz von Wasserstoff im Schienenverkehr. Dass dies möglich ist, zeigt ein Vorzeigeprojekt im Nordwesten der Bundesrepublik Deutschland. Dort fahren die weltweit ersten wasserstoffbetriebenen Personaltransportzüge schon seit 2018 und man erweitert nun schrittweise die Strecken wo diese Züge zum Einsatz kommen. Die Fahrgastkapazität beträgt zurzeit 300 Personen und die Reichweite bis zur nächsten Betankung ist 1000km. Wenn man nun in Deutschland alle Dieselantriebssysteme (~1600 Stück) mit Wasserstoff betriebene Systeme ersetzen würde ist davon auszugehen, dass dies aus ökonomischer Sicht günstiger ist als eine komplette Elektrifizierung des Schienenverkehrs.

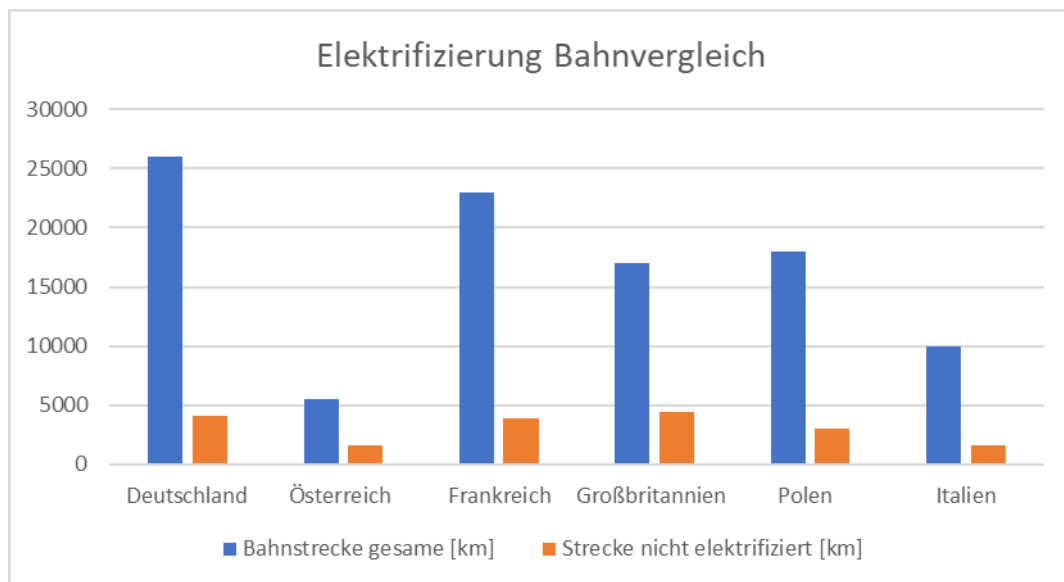


Tabelle 18: Länge der nicht elektrifizierten Bahnstrecke Staatenvergleich⁷⁰

Die Umstellung auf diese neue Technologie setzt aber voraus, dass entsprechende Infrastruktur für Erzeugung, Transport und Speicherung des H₂ vorhanden sein muss. Dies ist leider aber noch nicht der Fall.⁷¹

⁶⁹ Vgl. Berger o. J.

⁷⁰ Vgl. Schienen-Control 2022, S. 18.

⁷¹ Vgl. Schmidt 2020, S. 428–431.

6.1.3 Wasserstoff im PKW Bereich

Wasserstoff betriebene Fahrzeuge werden abgekürzt FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) genannt. Sie bestehen grundsätzlich aus Batterie (Energiespeicher), Brennstoffzelle (Energiewandler), Wasserstofftank (Energiespeicher), mehreren Spannungswandlern, Elektromotor, eventuell noch einem Getriebe und schließlich dem Antrieb zu den Rädern.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen 2 Systeme, des zurzeit dominante Brennstoffzellenantrieb und den Range Extender Antrieb. Beim Brennstoffzellenantrieb wird der Fahrleistungsbedarf mit der Brennstoffzelle gedeckt, die Batterie dient ausschließlich der Rekuperation von Bremsenergie beim Verzögern und Unterstützung beim Beschleunigen. Deswegen haben diese PKWs eine leistungsstarke Brennstoffzelle (100 – 150kW), die Batterie hat eine hohe Leistungsdichte aber eine geringe Kapazität von ca. 1 – 2 kWh, der Wasserstofftank hingegen beinhaltet zwischen 5-6 kg Wasserstoff (Energieinhalt H_2 33.33kWh/kg) einen hohen Energieinhalt. Mit diesen Systemen kann man eine Reichweite von ca 600km erreichen.

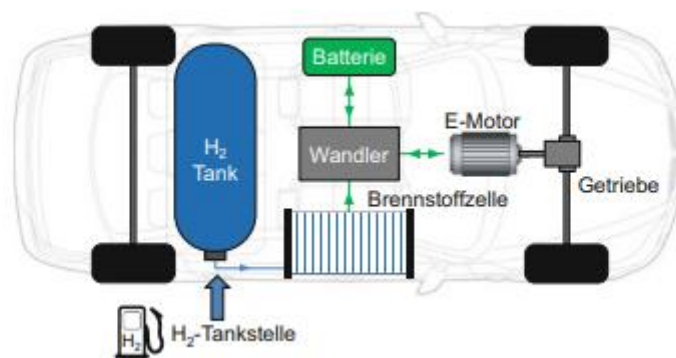


Abbildung 22: Dominanter Brennstoffzellenantrieb

Beim Range Extender Antrieb, wird Energie für die Fahrleistung aus der Batterie genommen, die Auslegung der Batterie ist auf ca. 70km begrenzt (geringe Leistungsdichte aber hohe Kapazität), dies ist ein üblicher Wert für die tägliche Benutzung eines PKWs im privaten Bereich. Die Brennstoffzelle hat eine geringere Leistung von 20 - 30kW und einen klein volumigen Wasserstofftank. Durch diese Bauweise bietet sich die Ausführung Plug-In an, der Vorteil dieser Bauweise ist, dass die Energiezufuhr zusätzlich zur Wasserstoff-Betankung auch mittels Stromzufuhr getätigt werden kann. Dieses Mischkonzept wird auch als MSFC (Mid Size Fuel Cell) bezeichnet.⁷²

⁷² Vgl. Klell/Eichlseder/Trattner 2018, S. 178–181.

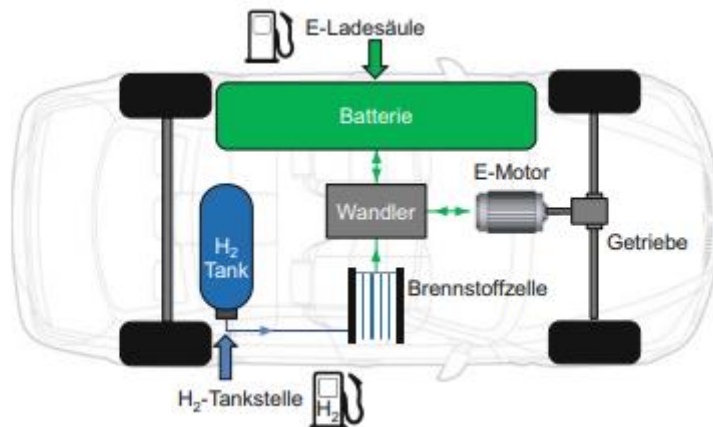


Abbildung 23: Range Extender Antrieb

6.1.3.1 Brennstoffzellenfahrzeug versus Elektrofahrzeug versus konventionelles betriebenes Fahrzeug

In dieser Untersuchung werden nun 3 Fallstudien gegenübergestellt um ökonomische, wirtschaftliche und technische Eigenschaften zu vergleichen. In diesen Vergleichen kann man dann die Resultate als Nutzversprechen in mögliche Geschäftsmodelle einsetzen. In diesen Fallstudien werden ein ICE betriebener VW Golf, ein BEV (Tesla 3, Golfe E, Opel Ampera E) und ein FCEV (Hyundai Nexa) zum Gegenstand gemacht.

In den Abbildungen 23 und 25 sieht man den deutlichen Vorteil eines BEV gegenüber eines ICE betriebenen Fahrzeuges. Im Allgemeinen hat ein ICE einen Wirkungsgrad von 20 – 40%⁷³. Elektro betriebene Fahrzeuge hingegen kommen auf einen Wirkungsgrad von 60%. Aus den Abbildungen 23 - 25 kann man ableiten, dass ein BEV 70% weniger Primärenergie verwendet als ein ICE betriebene Fahrzeuge.

⁷³ Vgl. Braun 2019, S. 27.

BEV :

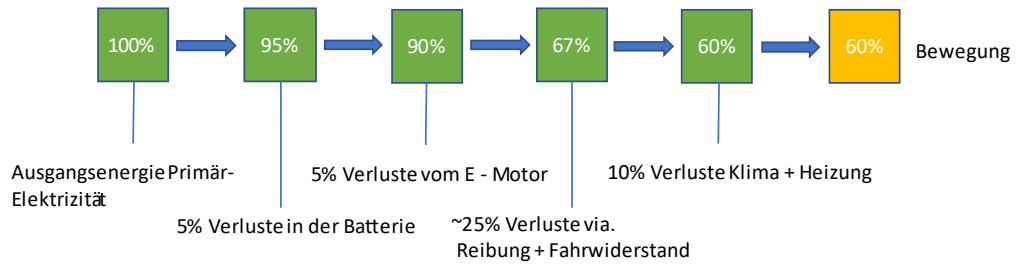


Abbildung 24: Wirkungsgrad eines elektrischen Fahrzeuges⁷⁴

FCEV :

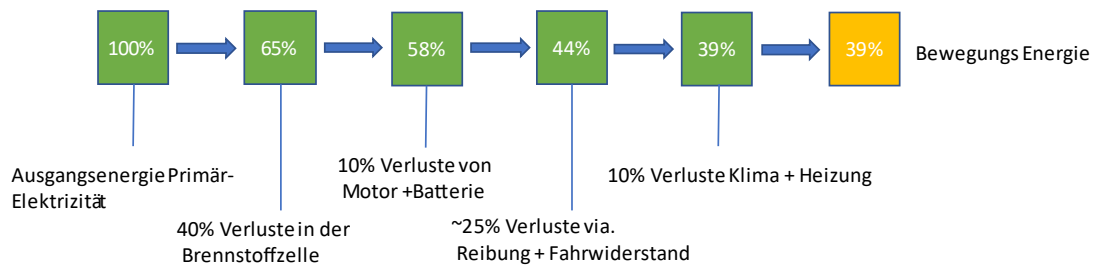


Abbildung 25: Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen Fahrzeuges⁷⁵

⁷⁴ Vgl. Staiger/Tanțău 2020, S. 45.

⁷⁵ Vgl. ebd., S. 177.

ICE :

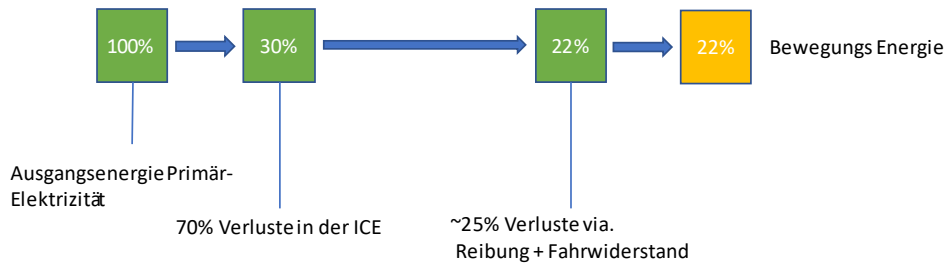


Abbildung 26: Wirkungskette eines ICE (eigene Darstellung)

6.1.3.2 Anwendung einer SWOT Analyse Im Vergleich ICE vs. FCEV vs. BEV

Das Instrument einer SWOT Analyse kann bei der Erstellung von einem Business Plan hilfreich sein, um die Tauglichkeit zu prüfen wie im Fall von Abbildung 27 der Gegenüberstellung von Stärken und Schwächen von ICE, BEV und FCEV. Dies kann zusätzlich in die Überlegungen zu „Value Proposition/Wertversprechen / Nutzversprechen“ eingesetzt werden.

	ICE	BEV	FCEV
Reichweite	+	-	+
Tankzeit	+	-	+
Umweltemissionen	-	+	+
Lärmpegel	-	+	+
Energiekette mit grüner Primärenergie	-	+	+
Umweltbelastende Materialien benötigt	-	-	-
Nachhaltigkeit des Produktes	-	+	+

Leistungseinschränkung beim Tanken		+	-	+
Investitionskosten		+	0	-
Verfügbarkeit		+	+	-
Serviceaufwand		-	+	-
Anzahl der Hersteller am Markt		+	+	-
Energieinfrastruktur		+	0	-
Effizienz		-	+	+
Status		-	+	+
Summe		7 mal +	9 mal +	9 mal +

Abbildung 27: Eigene Darstellung SWOT Analyse

6.1.3.3 Fallbeispiel Energieverbrauch ökologische Betrachtung

In den folgenden 4 Beispielen wird der Gesamtwirkungsgrad η und der Primärenergieeinheit (PEE) in kWh aufgezeigt. Der Gesamtwirkungsgrad ist das Produkt aller Wirkungsgrade in der Entstehungskette.

Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \dots * \eta_x$$

Im ersten Fallbeispiel wird angenommen, dass Fahrzeug mit 19% Wirkungsgrad und für die Benzingewinnung 82% ergibt einen Gesamtwirkungsgrad von 16%. Somit wird für eine Einheit der Ausgangsenergie am Fahrzeug /wheel 6.44 PEE benötigt. Die Kalkulation sagt aus, dass für 1kWh Rotationsenergie am Fahrzeug 6.4kWh an Energieumwandlungsprozesse, von Nöten waren. Für die CO₂ Auswirkung wird die Menge an PEE mit dem CO₂ Äquivalent multipliziert

TEI Total Environmental Impact :

$$TEI = Q_{primary} * CO_2 \text{ GWPF}$$

$Q_{primary}$... Durchfluss (H₂, Benzin, Diesel ...)

CO₂GWPF Emissionsfaktor aus dem GEMIS Simulationsprogramm

Prozess Benzin	Wirkungsgrad η	PEE in kWh	TEI	kg/kWh
Primär Energie		6.42	0.288	kg/kWh
Benzinherstellung	0.820	5.26		
Fahrzeug	0.190	1.00		
Gesamt	0.156	6.40	1.8432	kg/kWh

Tabelle 19: PEE und TEI Berechnung für ein Benzinfahrzeug

Prozess BEV aus Strom, aus dem Netz	Wirkungsgrad η	PEE in kWh	TEI	kg/kWh
Primär Energie		4.99	0.565	kg/kWh
Elektrizität Umwandlung mit Netzverlusten	0.340	1.69		
Fahrzeug	0.590	1.00		
Gesamt	0.201	5.00	2.825	kg/kWh

Tabelle 20: PEE und TEI Berechnung für ein BEV fossil Fahrzeug

Prozess BEV Strom aus PV EEQ	Wirkungsgrad η	PEE in kWh	TEI	kg/kWh
Primär Energie		7.06	0.02	kg/kWh
EEQ Wirkungsgrad PV Anlage	0.240	1.69		
Fahrzeug	0.590	1.00		
Gesamt	0.142	7.06	0.1412	kg/kWh

Tabelle 21: PEE und TEI Berechnung für ein BEV EEQ PV

FCEV Fossil	Wirkungsgrad η	PEE in kWh	TEI	kg/kWh
Primär Energie		11.97	0.565	kg/kWh
Elektrizität Umwandlung mit Netzverlusten	0.340	4.07		
H ₂ Herstellung	0.630	7.54		
Fahrzeug	0.390	1.59		
Gesamt	0.084	11.97	6.76305	kg/kWh

Tabelle 22: PEE Und TEI Berechnung FCEV fossil

Wasserstoff im Mobilitätssektor

FCEV EEQ mit PV	Wirkungsgrad η	PEE in kWh	TEI	kg/kWh
Primär Energie		16.96	0.02	kg/kWh
EEQ Wirkungsgrad PV Anlage	0.240	4.07		
H ₂ Herstellung	0.630	10.68		
Fahrzeug	0.390	1.59		
Gesamt	0.059	16.90	0.338	kg/kWh

Tabelle 23: PEE und TEI Berechnung FVEV EEQ PV

	Fossil ICE	Fossil BEV	EEQ BEV	Fossil FCEV	EEQ FCEV
Teschnische Werte					
Gesamtwirkungsgrad η von Primärenergie Well to Wheel	0.16	0.20	0.14	0.08	0.06
Energie Menge in kWh Primär	6.40	5.00	7.06	11.97	16.90
Energie Menge in kWh Kosten	5.26 €	1.69 €	1.69 €	4.07 €	4.07 €
Umwelteinfluss in kgCO ₂	1.84	2.825	0.1412	6.673	0.338
Energieverbrauch /100km	6.4l	16kW	16kW	1kg	1kg
Energiespeichergröße	45l	60kWh	60kWh	7kg	7kg
Energiespeicher in kWh	400.5	60	60	233.33	233.33
mögliche Distanz km	700	375	375	700	700
Energieeffizienz Tank to Wheel kWh/km	0.57	0.16	0.16	0.33	0.33
Tankzeit in min (Hausanschluss BEV)	4min	3h	3h	4min	4min

Tabelle 24: ökologisches Ergebnisse Fallbeispiel

Wasserstoff im Mobilitätssektor

	Fossil ICE	Fossil BEV	EEQ BEV	Fossil FCEV	EEQ FCEV
Teschnische Werte					
Investitionskosten	40000	60000	60000	100000	100000
Treibstoffkosten	1.6€/l	0.24€/kWh	0.12€/kWh	6€/kg	5€/kg
Treibstoffkosten in €/kWh	0.18	0.24	0.12	0.18	0.15
Treibstoff Trend	>	>	<	>	<
Kosten /km	0.10 €	0.04 €	0.02 €	0.06 €	0.05 €

Tabelle 25: ökonomisches Ergebnis Fallbeispiel

Die Tabelle 25 zeigt die ökonomischen Berechnungen für die unterschiedlichen Fahrzeuge. Gut zu sehen ist, dass die Kosten/km für das BEV und das FCEV schon günstiger sind als für ein ICE betriebenes Fahrzeug. Dennoch muss man anmerken, dass in dieser Tabelle die einmaligen Investitionsausgaben nicht berücksichtigt sind. Zusätzlich ist hier angenommen worden, dass für das FCEV mit EEQ die Gestehungskosten von 0.14€/kWh kalkuliert wurde.

Dieses Fallbeispiel zeigt die unterschiedlichen Bereiche wie Betankung, Kosten, Speicherdichten, Wirkungsgradketten und Emissionen auf. In der Tabelle 26 werden diese Erkenntnisse in Nutzversprechen umgewandelt.

Nutzwertversprechen	Fossil ICE	Fossil BEV	EEQ BEV	Fossil FCEV	EEQ FCEV
Wartungsintervalle	hoch	niedrig	niedrig	Mittel	Mittel
Umweltauswirkungen	hoch	hoch	niedrig	hoch	niedrig
Ladeinfrastruktur	gut	mittel	mittel	niedrig	niedrig
Ladeleistung	hoch	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig
Umweltzonen	beschränkt	unbeschränkt	unbeschränkt	unbeschränkt	unbeschränkt
Tanken	einfach	einfach	einfach	einfach	einfach
Umweltfreundlich	nein	nein	ja	ja	ja
Steuervergünstigungen	nein	ja	ja	ja	ja
Subventionen	nein	ja	ja	ja	ja

Tabelle 26: Vergleich Nutzversprechen ICE/BEV/FCEV

6.1.3.4 Trends bei E – Fahrzeugen und Brennstoffzellenfahrzeugen

Wenn man aus den vorgestellten Entwicklungen von den OEMs die Zukunft ableitet, kommt man zum Schluss, dass es einen großen Mix aus Kraftstoffen und Antriebssträngen geben wird. Um eine Dekarbonisierung des Verkehrs zu erreichen braucht man beide Antriebskonzepte, BEV und FCEV. Wie auch für unterschiedlichen Anwendungen, Einsatzbedingungen und Kundenkreise.

7 Ausblick der aktuellen Marktentwicklung mit grünem Wasserstoff

Wie in dieser Arbeit beschrieben, hat Wasserstoff ein sehr hohes Potential in der direkten oder indirekten Nutzung im Elektrolyse-, Industrie- und Verkehrs-Sektor und langfristig auch in der Erzeugung von Strom. Um die globalen Treibhausgasemissionen zu reduzieren und somit die Ziele der UN-Klimakonferenz in Paris 2020 zu erfüllen, gibt es nur einen möglichen Weg und dieser lautet den Anteil der fossilen Energieträger im Energiemix zu reduzieren bzw. idealerweise auf 0 zu bringen. Dies wird nur möglich sein, wenn die globale Nutzung der EEQ verstärkt eingesetzt wird und die Wasserstoffwirtschaft als Bindeglied angenommen wird. Es wird immer deutlicher, dass H₂ und dessen Syntheseprodukte bei der Dekarbonisierung aller energiekonsumierenden Sektoren wie Industrie, Verkehr und Gebäude eine wichtige Rolle einnehmen werden. Der große Vorteil von Wasserstoff ist seine hohe Speicher- und Transportfähigkeit bei der steigenden Systemintegration von erneuerbaren Energien.

Aus nationaler Sichtweise kristallisiert sich immer mehr heraus, dass die Wasser-Elektrolyse zu einer wichtigen industriepolitischen Komponente wird. Das betrifft vor allem die Erzeugung des in Deutschland benötigten H₂ und nicht zu vergessen, die Möglichkeiten diesen wieder ins Stromnetz einspeisen zu können. In der Energiewende wird Wasserstoff eine Kerntechnologie für den globalen Exportmarkt sein. Wichtig ist es nun, dass die richtigen Anreize der marktpolitischen Ziele gesetzt werden damit es zu einer Lenkungswirkung kommen kann. Der Markthochlauf der EEQ in Verbindung mit Wasser-Elektrolyse sollte laut vielen Studien bis in das Jahr 2050 eine Größenordnung von 80GW erreichen.

Es wird nun immer deutlicher, dass ohne den Einsatz von grünem H₂ parallel zur Durchsetzung nationaler Industriepolitik und Durchführung der globalen Energiewende diese Schritte nicht möglich sein werden. Um dies umzusetzen, bedarf es einer auf globaler Ebene ausgerichteten Förderung von EEQ wie Solar-, PV-, und Windkraftanlagen in den hierfür prädestinierten Regionen.

Auf diese neue Art des erneuerbaren Energiehandels bereiten sich schon viele Teile der Welt vor. Dies ermöglicht den Teilnehmern eine neue Energiepartnerschaft über bisherige fossile Abhängigkeiten hinaus zu gründen und zu leben. Gute Beispiele für solche Länder sind Marokko, Australien, Island, Chile uvm. und genau diese kommen für einen substantiellen Export von H₂ in Frage. Unter Einbeziehung der Transportkosten ist in diesen Ländern die Produktion von Wasserstoff oder synth. Kraftstoffen günstiger zu bewerkstelligen als in Europa.

7.1 Zusammenfassung und Fazit

Als Bindeglied zwischen den 3 Energiesektoren (Elektrizität, Wärme und Mobilität) kann man Wasserstoff in Zukunft idealer Weise einsetzen. Das Wachstumspotential dieses neu entstehenden Wirtschaftsbereiches ist in all den hier diskutierten Anwendungsbereichen enorm und wird auch von nationalen und internationalen Studien und Marktanalysen prognostiziert. Für die zukünftige gewinnbringende Nutzung in einer Unternehmung sind vor allem innovative und mutige Geschäftsmodelle nötig. Leider hat der grüne H₂ weder einen ökologischen noch technischen wie auch keinen ökonomischen Einfluss im heutigen energiewirtschaftlichen System.

Das heutige energiewirtschaftliche System basiert leider noch immer auf fossile Primärenergieträgern. Genau diese haben die Umwelt in den letzten 100 Jahren beinahe an den Rand des Kollapses getrieben haben. Die Klimaerwärmung ist proportional mit der CO₂ Konzentration in der Atmosphäre und mittlerweile wissenschaftlich bestätigt. Die Lösung dieses Problems wäre der Einsatz von erneuerbaren Energien als Primärenergiequellen, mit dem Vorteil, dass die zur Verfügung gestellte Energiemenge unendlich und klimaneutral ist. Der Nachteil dieser Energie ist die Volatilität, welche mit Energieumwandlern in speicherbare Medien und wieder mit einer Rückumwandlung kompensiert werden kann. Und genau hier würde der grüne H₂ als Sekundärenergiequelle und Bindeglied zwischen den EEQ und den Energiesektoren eine geniale Anwendung finden. Dieser Prozess ist heute schon in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung bzw. hohem Windaufkommen wirtschaftlich und technisch möglich. Gleichzeitig sind die fallenden Investitionskosten für Photovoltaik und Windenergie eine wirtschaftlich interessante Tendenz, welche konkurrenzfähige Energiegestehungskosten auch in den nördlichen Breitengraden voraussagt.

Weiters wurde in dieser Arbeit analysiert in welchen Bereichen grüner H₂ eingesetzt werden kann, es wurde unterschieden in der Anwendung, Herstellung und der Infrastruktur. Zu jedem Bereich wurden dann die jeweiligen Geschäftsmodelle abgeleitet. Die Geschäftsmodelle sind in Anlehnung an die unterschiedlichen Geschäftsmodell Bausteine nach Osterwalde und Pigneur entstanden. Als Resultat dieser Arbeit könnte man ableiten, dass die Nachfrage an Elektrolyseverfahren im KW – MW Bereich stark ansteigen wird. Eine zusätzliche Verstärkung wird aufkommen, wenn die Energiekosten für fossile Energie durch die CO₂ Abgabe eingefordert wird. Die Rentabilität von grünem Wasserstoff als

EEQ wurde in den Fallbeispielen noch nicht bestätigt, bei steigenden fossilen Energiepreisen würde sich dies aber umkehren.

Wenn man die Mobilität als Energiesektor betrachtet, sieht man, dass dieser für 30% des Schadstoffausstoßes verantwortlich ist. Unabhängig welche Technologie sich hier nun schließlich durchsetzen wird (ICE, BEV, FCEV), ist man sich auch hier einig: ohne H₂ als Ersatz von fossilen Energieträgern wird es zu keiner Reduktion der Schadstoffbelastung kommen können. Die infrastrukturelle Einschränkung von der H₂ (beinahe kein Tankstellennetz vorhanden), die hohen Energiekosten und die hohen Anschaffungskosten der Fahrzeuge lässt die Nachfrage gering erscheinen. Dennoch ist man auch hier auf einem guten Weg. Dieser könnte noch beschleunigt werden, wenn die synthetischen Kraftstoffe marktreif gemacht werden. Aktuelle Studien gehen davon aus, dass in Zukunft sich das BEV und FCEV den Markt von Personenkraftwagen teilen werden. Für leichte kleine Fahrzeuge wird man ein BEV angeboten bekommen und für längere Strecken, schwere Fahrzeuge vor allem in der Logistik wird man ein FCEV angeboten bekommen.

Das Fazit dieser Arbeit ist, zurzeit ist von einer kommerziellen Herstellung von grünem H₂ abzuraten da dieser noch nicht konkurrenzfähig bzw. kein komparativer Konkurrenzvorteil vorhanden ist.⁷⁶

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Elektrolyse ist in der H₂- Erzeugung die zentrale Technologie. Hier muss man sagen, dass die Herstellungskosten von grünem H₂ mit EEQ auf unter 0.10 €/kWh (LOCE) durch Skaleneffekte, kontinuierliche F&E Anstrengungen und Automatisierung der Produktion gesenkt werden sollten. Der Aufbau eines Gigawatt Marktes in verschiedenen Ländern der Welt ist die Voraussetzung für eine Marktdurchdringung. Hier wird dann die Etablierung von Zulieferketten und der Ausbau einer wettbewerbsfähigen Elektrolyse Industrie eine wichtige Rolle spielen. Um eine Erhöhung der Nachfrage von grünem Wasserstoff zu erwirken ist nun die Politik gefragt, indem diese die regulatorischen Rahmenbedingungen für den Strombezug bzw. die Installation von Elektrolyse- Anlagen anpasst oder fördert.

Des Weiteren braucht es einen weiteren Forschungsbedarf in der Industrie für die verstärkte Nutzung von Wasserstoff. Grundvoraussetzung hierfür ist der Ausbau des Wasserstoffpipeline Netzes auf nationaler Ebene welcher speziell für die Industrie (Chemie-, Raffinerien, Stahlindustrie usw.) essential ist. Parallel dazu wäre es sinnvoll Einrichtungen zu erschaffen, welche den Scale-ups von „Power to x“ Anwendungen sowie die Adressierung an schon bestehende industrielle Infrastrukturen vorgibt. Wichtig bei diesem Prozess wird es sein, dass ein hohes Maß an regulatorischer Planungssicherheit vorhanden ist.

⁷⁶ Vgl. Hebling C./Ragwitz M. 2019, S. 45–49.

Für Einsatz von Wasserstoff im Verkehr bedarf es den Ausbau der Betankungs-Infrastruktur und einer wesentlichen Weiterentwicklung der Brennstoffzellenantriebe. Diese Infrastruktur sollte für PKWs und LKWs gleichermaßen erfüllt werden. Dazu ist zu berücksichtigen, dass die Betankungsanlagen für PKW und LKW unter Berücksichtigung der Wasserstoffmenge und des grenzüberschreitenden Verkehrs ausgelegt werden. Die regionalen, nationalen bzw. internationalen politischen Handlungsoptionen der Brennstoffzellenmobilität umfassen die Förderung von Betankungsanlagen wie auch die Vorreiterrolle bei der Beschaffung von Fahrzeugen in Städten bzw. Flughäfen. Zusätzlich bedarf es der Anerkennung von Wasserstoff als Treibstoff statt Industriegas.⁷⁷

⁷⁷ Vgl.ebd., S. 2–10.

8 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Lannach 21.Februar.2022

Unterschrift:

9 Literaturverzeichnis

- A. Breitkopf, Höhe der CO₂-Emissionen nach ausgewählten Ländern weltweit im Jahresvergleich 1990 und 2020, Internet, 2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167864/umfrage/co-emissionen-in-ausgewaehlten-laendern-weltweit/> (abgerufen am 16. Dezember 2021).
- A. Breitkopf, Klimawandel, ncdc.noaa.gov, Februar 2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/579481/umfrage/anomalien-der-globalen-durchschnittlichen-kontinental-temperaturen/> (abgerufen am 17. Dezember 2021).
- A. Breitkopf, Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes in den Jahren 1990 bis 2020 und Prognose für 2030, Dezember 2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1241046/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektor/> (abgerufen am 16. Dezember 2021).
- APG, Netzverluste, o. J., <https://www.apg.at/de/markt/netzverluste> (abgerufen am 10. Januar 2021).
- Baehr, Hans Dieter, *Thermodynamik*, Berlin, Heidelberg/s.l. 2000 (*Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines*).
- Berger, R., Wie entwickeln sich die Preise für Brennstoffzellenbusse?, Internet, o. J., <https://emcel.com/de/preise-fuer-brennstoffzellenbusse/> (abgerufen am 16. Januar 2022).
- Braun, Andreas, *Effiziente Elektrofahrzeuge. Fahrumgebung, Fahrmuster und Verbrauch Batteriebetriebener Pkw Unter Realbedingungen*, Wiesbaden 2019, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5830036>.
- Brinner, A., Technologiebericht 4.1 Power-to-gas (Wasserstoff), Internet, 2018, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7058/file/7058_Power-to-gas.pdf.
- Bundesdienst für Elektromobilität, Wiener Linien integrieren H₂-Stadtbus von Hyundai, o. J., <https://www.electrive.net/2021/09/02/wiener-linien-integrieren-h2-stadtbus-von-hyundai/> (abgerufen am 16. Januar 2022).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung, Wissenswertes zu Grünem Wasserstoff. Nationale Wasserstoffstrategie, Internet, 2020, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html> (abgerufen am 23. Dezember 2021).

Doleski, Oliver D. u. a., *Digitale Dekarbonisierung. Technologieoffen die Klimaziele erreichen*, Wiesbaden 2021 (*Springer eBook Collection*).

EEA, Trends and projections in Europe 2021, No 13/2021, o. J., file:///D:/Privat/UNI/200_Diplomarbeit/05_Reporte/No13_Trends-Projection%20TH-AL-21-012-EN-N%20-2.pdf (abgerufen am 16. Dezember 2021).

Eni SpA, *World Oil, Gas and Renewables Review 2020* 2021, <https://www.eni.com/assets/documents/eng/scenari-energetici/POCKET-O-Gr-2020.pdf> (abgerufen am 4. Dezember 2021).

Freiling, Jörg, *Markt und Unternehmung. Eine marktorientierte Einführung in die Betriebswirtschaftslehre*, 2. Aufl., Wiesbaden 2007 (*SpringerLink Bücher*).

Hamberger und Joachim, Hans Carl von Carlowitz: Sein Leben und Wirken, Forstwirtschaft in Deutschland, 31. Dezember 2015, <https://www.forstwirtschaft-in-deutschland.de/forstwirtschaft/nachhaltigkeit/hans-carl-von-carlowitz/> (abgerufen am 21. Dezember 2021).

Hauck, Markus, Christoph Leuschner und Jürgen Homeier, *Klimawandel und Vegetation - Eine globale Übersicht*, Berlin, Heidelberg 2019, <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1573062>.

Hebling C. und Ragwitz M., Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, Internet, 2019, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf (abgerufen am 19. Februar 2022).

IEA, *Key World Energy Statistics 2021* 2021, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf> (abgerufen am 4. Dezember 2021).

Internationale Klimapolitik. Für Mensch und Umwelt, Das Umweltbundesamt, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik#klimapolitik-der-eu> (abgerufen am 16. Dezember 2021).

Jahn, Matthias, Wertschöpfung für grünen Wasserstoff, 2022, https://www.ikts.fraunhofer.de/de/industrieloesungen/wasserstofftechnologien/jcr:content/content-Par/sectioncomponent_654340699/teaserParsys/teaser/linklistParsys/downloadcomponent_1063326855/file.res/ikts_infografik_wasserstoff.pdf (abgerufen am 5. Februar 2022).

Klell, Manfred, Helmut Eichlseder und Alexander Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4. Aufl., Wiesbaden 2018 (*ATZ/MTZ-Fachbuch*), <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5356050>.

Kost, Ch, *STROMGESTEHUNGSKOSTEN ERNEUERBARE ENERGIEN*, unter Mitw. von V. Jülch und T. Schlegl 2018, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf.

Kropp, Ariane, *Grundlagen der nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung*, Wiesbaden 2019 (essentials), <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5498069>.

La Francesco, Camera, *GLOBAL GLOBAL RENEWABLES OUTLOOK 2020* 2020, <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020> (abgerufen am 5. Dezember 2021).

Magazin NEBENWERTE, Kauf einer 20 MW Elektrolyseanlage NEL, Internet, 2021, <https://www.nebenwerte-magazin.com/h2reihe-update-nel-verkauft-20-mw-elektrolyseanlage-an-wen-wohl-everfuel-perfektes-ping-pong/> (abgerufen am 13. Januar 2022).

McKinsey&Company, Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, 2021, <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf>.

Osterhage, Wolfgang, *Chancen und Grenzen der Energieverwertung. Physikalische Grundlagen und Technologien*, Wiesbaden 2019 (SpringerLink Bücher).

Osterwalder, Alexander und Yves Pigneur, *Business Model Generation. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer*, Frankfurt/New York 2011, <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=832895>.

Pohlmann C., Was ist ein Geschäftsfeld, Internet, 2022, <https://www.marketinginstitut.biz/blog/geschaeftsfeld/> (abgerufen am 30. Januar 2022).

Reich, Gerhard, *Regenerative Energietechnik. Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung*, Wiesbaden 2013 (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

Schienen-Control, Schienenverkehr in Österreich, Internet, 2022, <https://de.statista.com/statistik/studie/id/41180/dokument/schienenpersonenverkehr-in-oesterreich-statista-dossier/> (abgerufen am 30. Januar 2022).

Schmidt, Thomas, *Wasserstofftechnik. Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft*, München 2020.

Schreiner, Klaus, *Basiswissen Verbrennungsmotor. Fragen - rechnen - verstehen - bestehen*, 3. Aufl., Wiesbaden 2020 (Springer eBook Collection), <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz1728473020cov.htm>.

Staiger, Robert und Adrian Tanțău, *Geschäftsmodellkonzepte mit grünem Wasserstoff. Wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen für H₂ als nachhaltiger Energieträger*, Wiesbaden 2020 (*Springer eBook Collection*).

Statista, Energieverbrauch weltweit, BMWi - Energiedaten, Tabelle 31a, 2021, <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6691/dokument/energieversorgung-und-energieverbrauch---statista-dossier-2012/> (abgerufen am 4. Dezember 2021).

Statista, Treibhausgasemissionen in Österreich. CO₂-Ausstoß weltweit bis 2020, Internet, 2021, <https://de.statista.com/statistik/studie/id/59925/dokument/treibhausgasemissionen-in-oesterreich/> (abgerufen am 16. Dezember 2021).

Svilengatyn, S., Energy Transition in Europe Across Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. GLOBAL ENERGY SYSTEM BASED ON 100% RENEWABLE ENERGY, o. J., http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/Key-findings_100-renewable-Transition-across-energy-sectors-Europe.pdf (abgerufen am 10. Januar 2022).

Umwelt Bundesamt, Schematische Funktionsweise von PtG und PtL. Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem, o. J., <https://www.umweltbundesamt.de/bild/schematische-funktionsweise-von-ptg-ptl> (abgerufen am 23. Dezember 2021).

Umwelt Bundesamt, Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem, Internet, 11. März 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Rolle> (abgerufen am 22. Dezember 2021).

Wiesche, Stefan aus der und Franz Joos (Hg.), *Handbuch Dampfturbinen. Grundlagen, Konstruktion, Betrieb*, Wiesbaden 2018 (*SpringerLink Bücher*), <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz508130573cov.htm>.

Wietschel, Martin u. a. (Hg.), *Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze*, Wiesbaden 2015 (*Springer eBook Collection*), <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz425009300cov.htm>.

WSW, WSW-Wasserstoffbusse erreichen Kostenparität mit Dieselnissen, o. J., <https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/meldung/wsw-wasserstoffbusse-erreichen-kostenparitaet-mit-dieselnissen/> (abgerufen am 16. Januar 2022).