



PSI - PAUL SCHERRER INSTITUT

Strombasierte Energieträger und deren Einsatz in Haushalten – eine Umweltbilanz

Synthesebericht

Christian Bauer, Romain Sacchi

21.06.2024

Technology Assessment Gruppe, Labor für Energiesystem-Analysen (LEA), PSI

www.psi.ch/ta

Kontakt:

christian.bauer@psi.ch

Erstellt im Auftrag der Stadt Zürich, des Kantons Basel-Stadt und des Bundesamts für Umwelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Kurzfassung mit den wichtigsten Ergebnissen und Empfehlungen	4
2.1	Ziel der Arbeit.....	4
2.2	Rahmen der Arbeit.....	4
2.3	Ökobilanzergebnisse – Raumwärme.....	5
2.4	Ökobilanzergebnisse – gemeinsame Wärme- und Stromproduktion	9
2.5	CO ₂ -Quellen für die Produktion von synthetischem Erdgas und Methanol	10
2.6	Aussagekraft und Belastbarkeit der Ergebnisse	11
2.7	Generelle Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	11
3	Hintergrund.....	13
4	Rahmen und Methodik dieser Arbeit	14
4.1	Exkurs: Ökobilanz der Nutzung von CO ₂ zur Herstellung von Treib- und Brennstoffen.....	15
5	Weitere Ergebnisse	18
5.1	Raumwärme.....	18
5.2	Strom.....	19
5.3	Energieträger	22
5.3.1	Wasserstoff	22
5.3.2	Synthetisches Erdgas.....	23
6	Ausblick	26
7	Literatur	27

1 Vorwort

Dieser Synthesebericht fasst die wichtigsten Inhalte, Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Ökobilanz zusammen, welche für strombasierte Energieträger und deren Einsatz zur Bereitstellung von Raumwärme und Strom im Schweizer Haushaltssektor erstellt wurde. Der Synthesebericht richtet sich an ein an der Thematik interessiertes Publikum, welches aber keine vertiefte Expertise hinsichtlich Ökobilanzen aufweist. Dementsprechend vereinfacht werden manche Aspekte dargestellt, explizit nicht mit dem Ziel, die Arbeit vollständig nachvollziehen und prüfen zu können. Insofern erhebt dieser Synthesebericht keinen Anspruch auf Vollständigkeit – sämtliche Details der Ökobilanz, inklusive links zu den kompletten Sachbilanzdaten und Ergebnissen sowie ein externer Review-Bericht, sind im Hauptbericht zu dieser Ökobilanzstudie zu finden (Sacchi and Bauer, 2024).

Die Ökobilanz, der zugehörige Hauptbericht sowie der hier vorliegende Synthesebericht wurden im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, der Stadt Zürich und des Kantons Basel-Stadt erstellt. Der Inhalt dieses Berichts liegt in alleiniger Verantwortung der Autoren und repräsentiert somit nicht notwendigerweise die Ansichten der auftraggebenden Stellen.

2 Kurzfassung mit den wichtigsten Ergebnissen und Empfehlungen

2.1 Ziel der Arbeit

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist es, die Umweltbilanz von so genannten «strombasierten» Energieträgern¹ und deren Anwendung zur Wärme- und Stromversorgung von Schweizer Haushalten im Vergleich zu etablierten Technologien zu untersuchen. Dazu wurde eine Ökobilanz erstellt, mit welcher die Umweltbelastungen entlang der gesamten Produktions- und Nutzungsketten dieser Energieträger (inklusive deren Speicherung und Transport) gemessen wurden. Unter Umweltbelastungen sind im Rahmen dieser Arbeit einerseits Treibhausgasemissionen, welche die Erderwärmung verursachen, zu verstehen, andererseits die «Gesamtumweltbelastung», gemessen nach der Methode der ökologischen Knappheit (BAFU, 2021). Weiter wurde als Mass der Energieeffizienz der gesamten Prozessketten – von der Nutzbarmachung der Primärenergieträger bis zur Wärme- und Stromproduktion – der Verbrauch an Primärenergie gemessen, in Form von verbrauchten erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieträgern.

2.2 Rahmen der Arbeit

Der Untersuchungsrahmen umfasst die drei Energieträger Wasserstoff, synthetisches Erdgas (SNG) und Methanol (Abbildung 1).

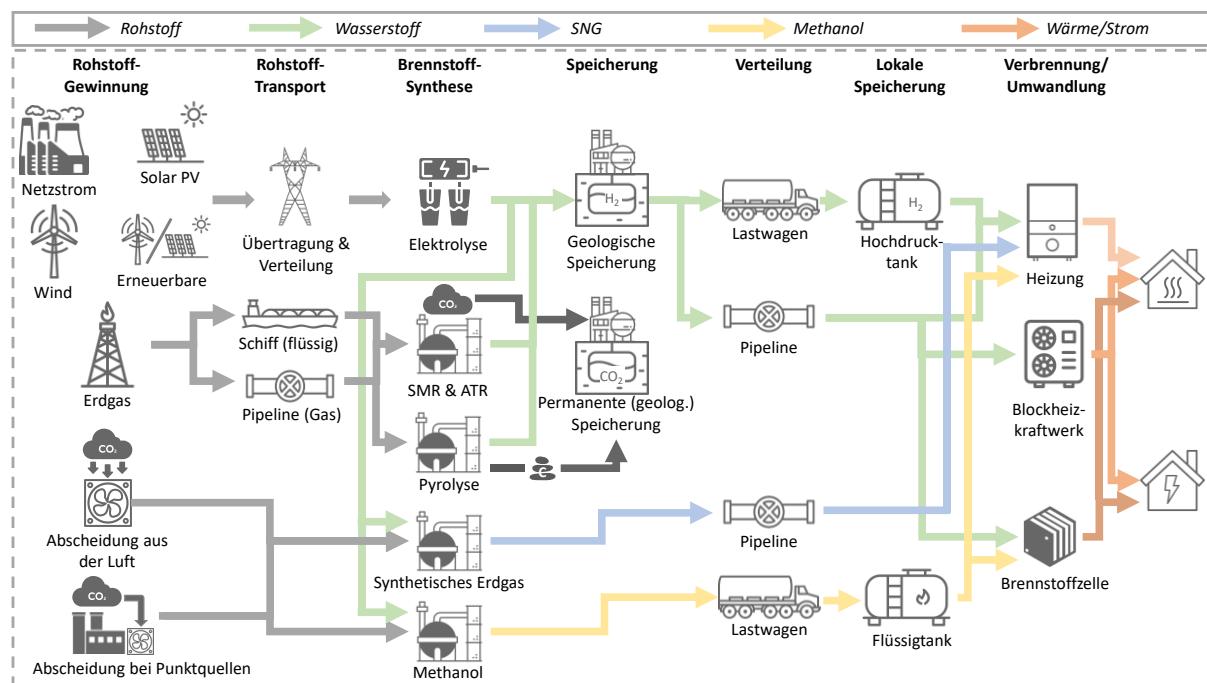


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Produktions- und Nutzungswege der in dieser Studie untersuchten Energieträger Wasserstoff, synthetisches Erdgas und Methanol, inklusive Transport und Speicherung. SNG: Synthetisches Erdgas; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; ATR: autotherme Erdgasreformierung; PV: Photovoltaik.

Neben der strombasierten Wasserstoffproduktion wurden auch Erdgaspyrolyse, bei der fester Kohlenstoff anstatt CO₂ entsteht, sowie Erdgasreformierung mit und ohne CO₂-Abscheidung und geologischer CO₂-Speicherung untersucht. Erdgas kann sowohl per Schiff als auch per Pipeline transportiert werden, Wasserstoff per Lastwagen und Pipeline, SNG per Pipeline und Methanol per

¹ «Strombasierte Energieträger» (oft auch als «Power-to-X» (PtX) bezeichnet) sind gasförmige oder flüssige Brenn- und Treibstoffe, die durch Nutzung von Elektrizität hergestellt werden. Bei deren Produktion wird in einem ersten Schritt Wasser mittels Elektrolyse – welche Strom benötigt – in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Dieser Wasserstoff kann direkt als Energieträger genutzt werden oder zusammen mit CO₂ mittels Syntheseprozessen in Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden, welche wie z.B. Erdgas, Benzin oder Diesel genutzt werden können.

Lastwagen. Als Optionen zur Speicherung der Energieträger werden Kavernen und Tanks bilanziert. Untersuchte CO₂-Quellen sind die Atmosphäre (direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft) sowie Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) und Zementwerke, welche industrielle Punktquellen repräsentieren. Zur Wärme- und Stromgewinnung dienen Heizungen und Blockheizkraftwerke (BHKW) sowie Brennstoffzellen, jeweils in Grössen für einzelne Haushalte. Wasserstoff kann mittels Elektrolyse sowohl in der Schweiz als auch an ausgewählten Standorten im Ausland, an denen Wind- und PV-Kraftwerke bessere Erträge erzielen als in der Schweiz, gewonnen und im Fall der Produktion im Ausland importiert werden.

Verglichen wird die Umweltbilanz dieser Arten der Wärme- und Stromversorgung mit heute in Betrieb befindlichen, herkömmlichen Alternativen («Referenztechnologien»): modernen Erdgas-, Biomethan- und Holzheizungen, Luft-Wasser Wärmepumpen (WP), welche mit heutigem, durchschnittlichem Schweizer Netzstrom oder Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, sowie Strom aus PV-Anlagen, Erdgaskraftwerken und dem Schweizer Netz.

Der Technologievergleich erfolgt auf Basis der Wärme- (und Strom-)Produktion einzelner Anlagen ohne eine Berücksichtigung allenfalls auftretender systemischer Effekte einer möglichen breiten Einführung von synthetischen Energieträgern.

Bei der Interpretation der Ökobilanzergebnisse ist zu beachten, dass Optionen verglichen werden, die sich derzeit nicht im gleichen Entwicklungsstadium befinden und teilweise in der Schweiz nicht verfügbar sind. So ist beispielsweise heute kein Wasserstoff aus Erdgaspyrolyse und -reformierung mit CO₂-Abscheidung und geologischer Speicherung erhältlich und es ist unsicher, ob dies jemals der Fall sein wird. Ebenso repräsentiert der Wasserstoff aus der aus Umweltperspektive optimalen Produktion in Marokko eine theoretische Option, die allenfalls in Zukunft verfügbar sein könnte. Ähnliches gilt für synthetisches Methanol und synthetisches Erdgas, welche heute (noch) keine kommerziell verfügbaren Produkte in der Schweiz darstellen. Wie realistisch und erstrebenswert es ist, dass diese Energieträger in den kommenden Jahren in grossem Massstab auf den Schweizer Markt kommen werden, darüber wird in dieser Arbeit keine Aussage getroffen.

Ziel der Arbeit war es jedoch, ein möglichst breites Spektrum an Varianten zur Wasserstoffproduktion und darauf basierenden Energieträgern abzudecken und auch mögliche zukünftige Optionen unter optimistischen Rahmenbedingungen zu betrachten. Dies, um trotz aller Unsicherheiten, die vor allem bei (noch) nicht verfügbaren Optionen bestehen, einen ersten Eindruck vom bestenfalls möglichen ökologischen Nutzen zu bekommen. Und auch, um die richtigen Prioritäten in der zukünftigen Entwicklung hin zu einer klima- und umweltfreundlichen WärmeverSORGUNG der Schweizer Haushalte setzen zu können.

2.3 Ökobilanzergebnisse – Raumwärme

Die Ergebnisse der Ökobilanz der reinen RaumwärmeverSORGUNG – also per Wärmepumpe oder Heizkessel – zeigen folgendes Bild (Abbildung 2 bis Abbildung 5):

Wärmepumpen – insbesondere falls betrieben mit Strom aus erneuerbaren Quellen – verursachen die (mit Abstand) geringsten Treibhausgasemissionen und Gesamtumweltbelastungen bei der RaumwärmeverSORGUNG. Lediglich die Treibhausgasemissionen von Holzheizungen sind ähnlich tief.

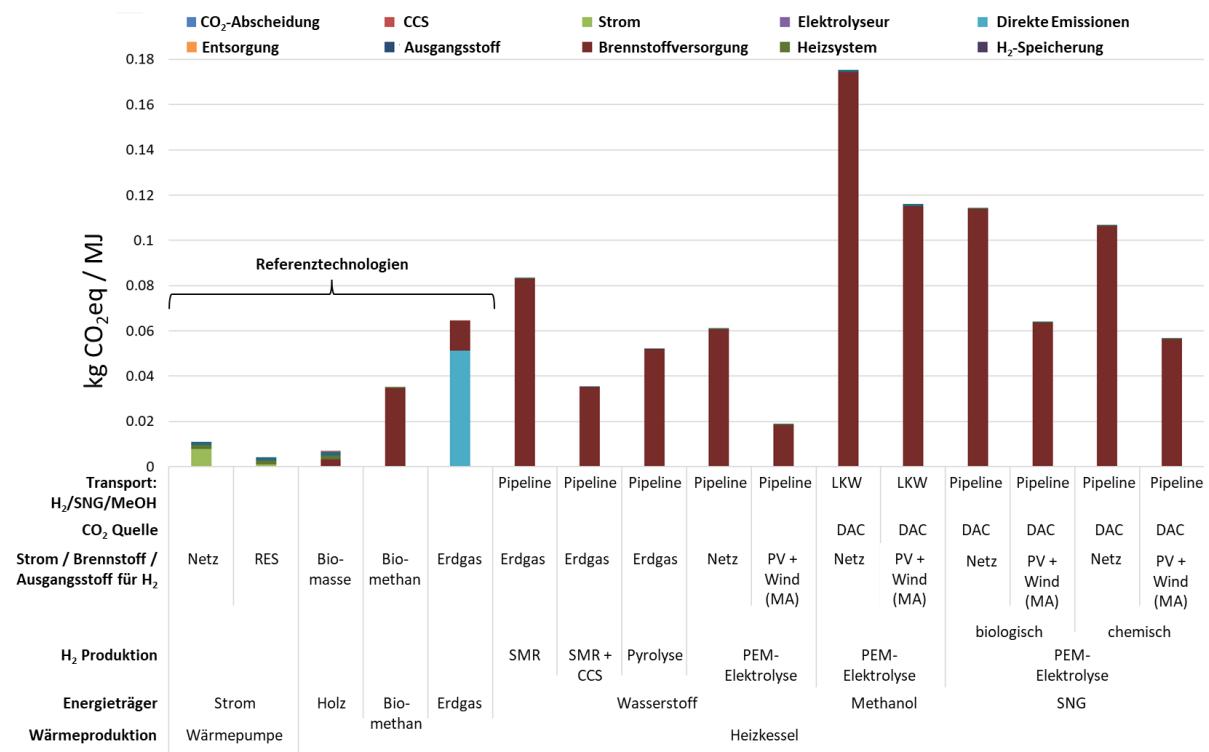


Abbildung 2: Treibhausgasemissionen der Raumwärmeversorgung in kg CO₂eq pro Megajoule (MJ) Nutzwärme. SNG: synthetisches Erdgas (Methan); RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; biologisch/chemisch: Art der SNG-Produktion; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MeOH: Methanol.

Die Nutzung von Wasserstoff oder den darauf basierenden synthetischen Kohlenwasserstoffen SNG und Methanol verursacht generell höhere Treibhausgasemissionen und Gesamtumweltbelastungen als Wärmepumpen, auch wenn Wasserstoff ausschliesslich mit Strom aus erneuerbaren Quellen produziert wird. Dies liegt vor allem daran, dass die Energieeffizienz der gesamten Produktions- und Umwandlungsketten von den Primärenergiequellen bis zur Raumwärme deutlich tiefer ist als bei der Anwendung von Wärmepumpen.

Die direkte Nutzung von Wasserstoff ist aus Umweltperspektive gegenüber SNG und Methanol vorzuziehen, da dies effizienter ist und auch der Aufwand der CO₂-Abscheidung entfällt. Unter den verschiedenen Optionen der Versorgung mit Wasserstoff zur Wärmeleitung weist die Wasserstoff-Herstellung via Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen an ertragreichen Standorten (hier: PV- und Windenergie in Marokko, was einen «Optimalfall» repräsentiert) die beste Treibhausgasbilanz auf. Allerdings sind die Treibhausgasemissionen immer noch beinahe doppelt so hoch wie jene der Wärmepumpe, die mit dem heutigen, durchschnittlichen Netzstrom betrieben wird und rund fünfmal höher als jene der mit Strom aus mit erneuerbaren Quellen betriebenen Wärmepumpe. Auch hinsichtlich Gesamtumweltwirkung sind die Belastungen dieser «saubersten» Art der Wasserstoffnutzung vier- bis fünfmal höher als jene der mit Strom aus erneuerbaren Quellen betriebenen Wärmepumpe. Im Vergleich zu einer Erdgasheizung sind allerdings sowohl Treibhausgasemissionen als auch Gesamtumweltbelastung der Wasserstoffnutzung – sofern dieser mit Strom aus erneuerbaren Quellen oder Erdgasreformierung mit CCS hergestellt wird – geringer; Treibhausgasemissionen um einen Faktor von rund zwei bis drei, die Gesamtumweltbelastung allerdings um nur etwa 20-40%.

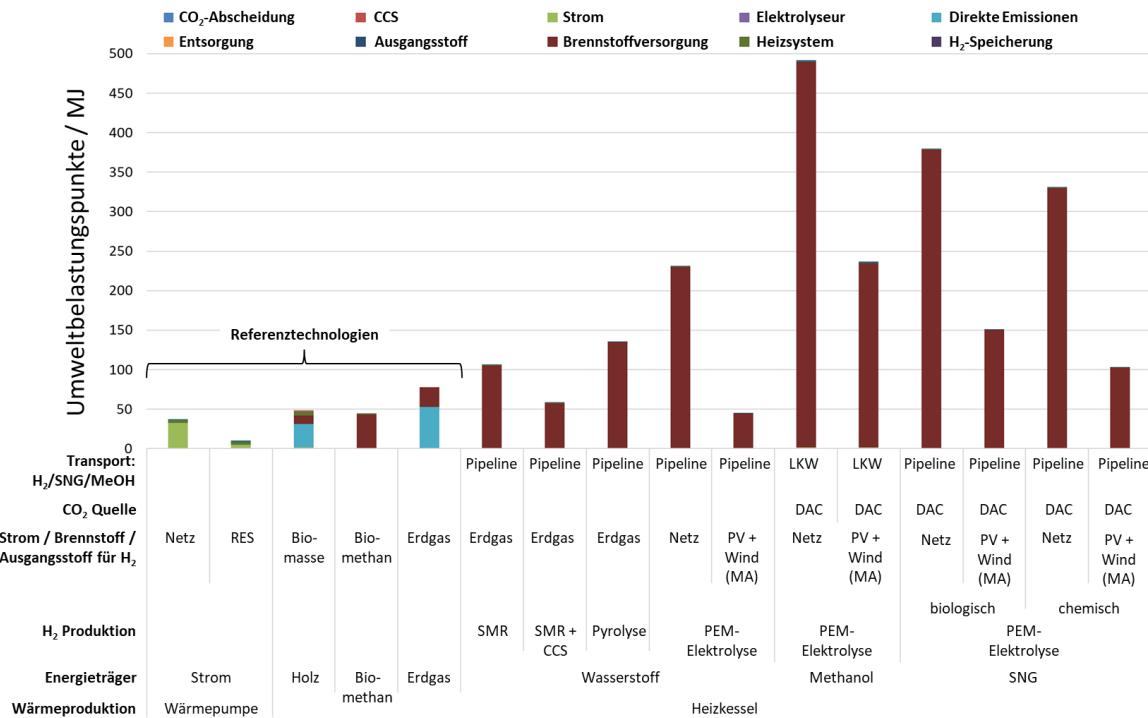


Abbildung 3: Gesamtumweltbelastung der RaumwärmeverSORGUNG in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro Megajoule (MJ) Nutzwärme. SNG: synthetisches Erdgas (Methan); RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; biologisch/chemisch: Art der SNG-Produktion; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MeOH: Methanol.

Die Nutzung von heutigem Schweizer Netzstrom zur Wasserstoffproduktion macht in der RaumwärmeverSORGUNG aus Umweltperspektive keinerlei Sinn, da damit die Treibhausgasemissionen in etwa gleich hoch sind wie bei einer Erdgasheizung, die Gesamtumweltbelastung etwa dreimal höher. Der Vergleich von fossilem mit synthetischem Erdgas (SNG) zeigt, dass SNG bei der RaumwärmeverSORGUNG nur geringfügig tiefere Treibhausgasemissionen verursacht, auch wenn der Wasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird und CO₂ aus direkter Abscheidung aus der Luft stammt². Die Gesamtumweltbelastung ist sogar um rund ein Viertel höher. Unter bestimmten Voraussetzungen kann jedoch Wärme aus SNG durchaus mit vergleichsweise geringen Treibhausgasemissionen verbunden sein: Im «Optimalfall» – Strom für die Elektrolyse aus Schweizer Wasserkraft, CO₂ aus einer KVA mit interner Energieversorgung der CO₂-Abscheidung ohne substanzIELLER Reduktion von extern genutzter Energie und keiner Anrechnung der CO₂-Emissionen aus der SNG-Verbrennung an den Endnutzer des SNG – wären die Treibhausgasemissionen der SNG-Heizung um rund zwei Drittel geringer als jene der Erdgasheizung. Zu beachten ist, dass in diesem Fall das biogene CO₂ aus der KVA nicht dauerhaft gespeichert wird und somit kein CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden kann.³ Die Treibhausgasemissionen von Wärme ab Wärmepumpe sind allerdings auch im Vergleich zu diesem «Optimalfall» deutlich geringer: Wird die Wärmepumpe mit heutigem durchschnittlichem Netzstrom betrieben, sind die Treibhausgasemissionen etwa halb so hoch, bei einem WP-Betrieb mit Strom aus erneuerbaren Quellen betragen die Treibhausgasemissionen nur mehr rund ein Fünftel.

² Wird solch atmosphärisches CO₂ zur Produktion von synthetischen Kohlenwasserstoffen genutzt, so ist dessen Emission aus der Verbrennung der Kohlenwasserstoffe nicht klimawirksam, da ein klimaneutraler, geschlossener CO₂-Kreislauf hergestellt wird.

³ Wird biogenes CO₂ (z.B. aus KVA) dauerhaft im Untergrund gespeichert, so kann dies als so genannte «Carbon Dioxide Removal (CDR)» Methode bezeichnet werden, welche «Negativemissionen» generiert und entsprechende Emissionszertifikate verkaufen könnte.

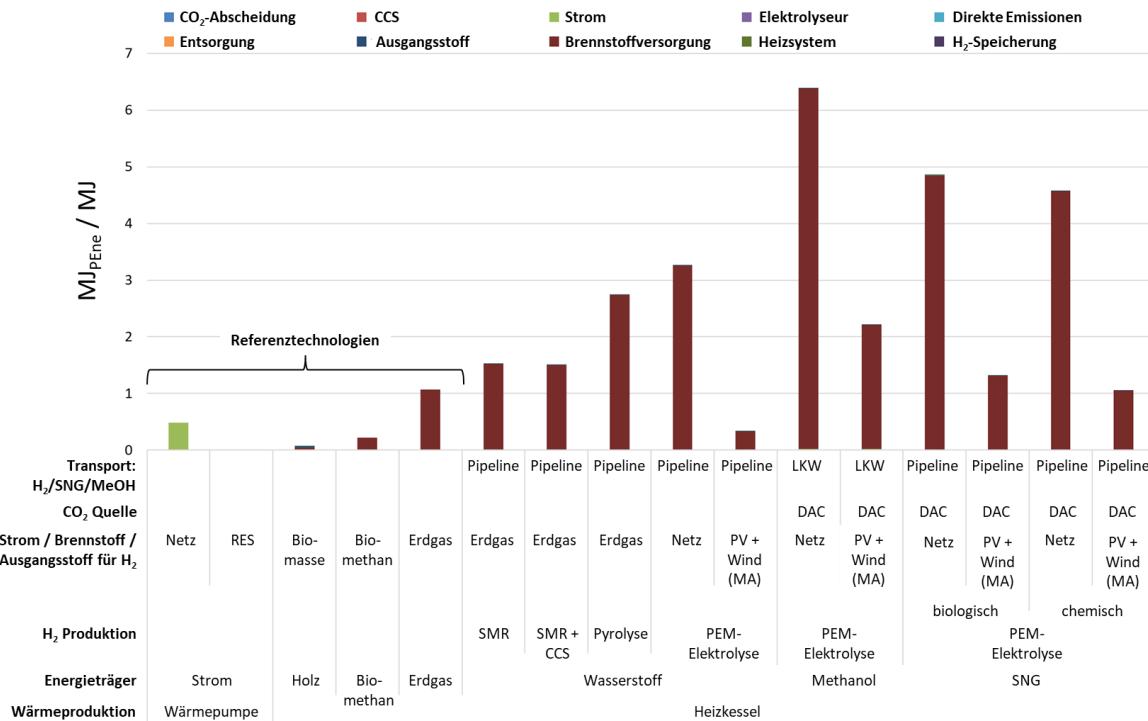


Abbildung 4: Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf (Pene) der RaumwärmeverSORGUNG in MJ(PE) pro Megajoule (MJ) Nutzwärme. SNG: synthetisches Erdgas (Methan); RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; biologisch/chemisch: Art der SNG-Produktion; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MeOH: Methanol.

Generell kann festgehalten werden, dass bei wasserstoffbasierten Heizsystemen die Art der H₂-Produktion und die Art der dazu genutzten Energie den grössten Einfluss auf die Umweltbilanz der erzeugten Wärme aufweisen. Wird Wasserstoff dazu genutzt, synthetische Kohlenwasserstoffe zu erzeugen, dann spielt auch die Art der CO₂-Gewinnung eine Schlüsselrolle. Aus Umweltperspektive ist ein Transport der Energieträger per Pipeline gegenüber einem LKW-Transport vorzuziehen. Die durch die lokale Wasserstoffspeicherung verursachten Umweltbelastungen sind gering, wobei hier angenommen wurde, dass aus logistischen Gründen mehrmals pro Heizperiode Wasserstoff geliefert wird.

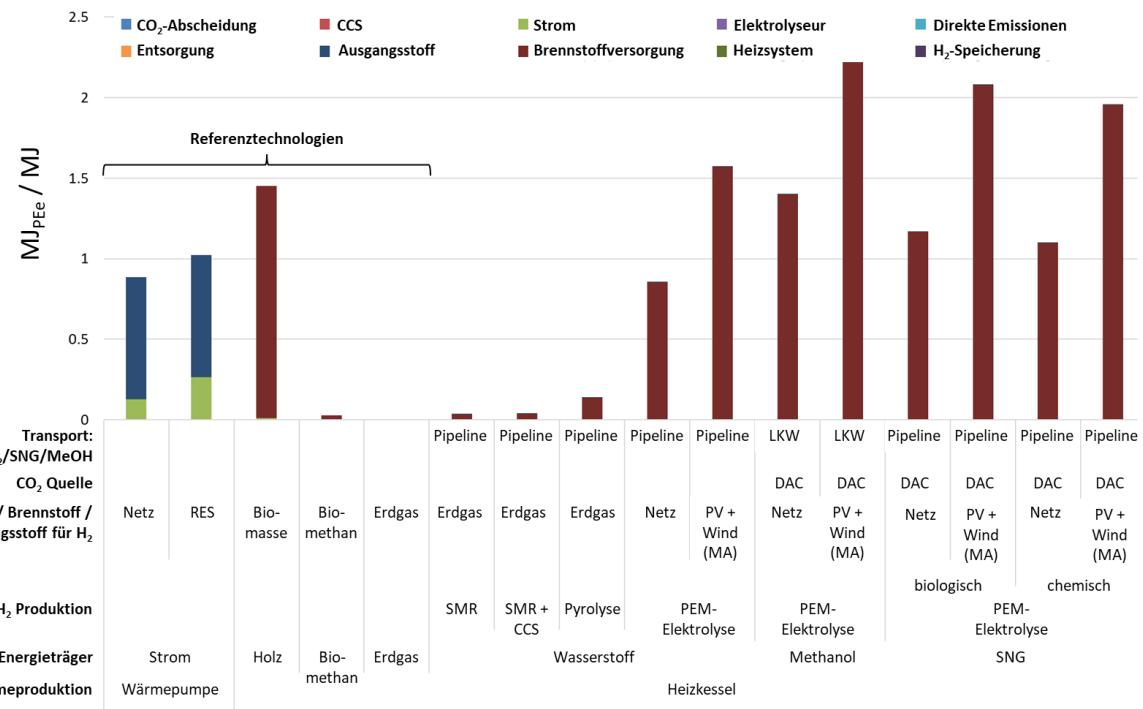


Abbildung 5: Erneuerbarer Primärenergiebedarf (PEe) der RaumwärmeverSORGUNG in MJ(PE) pro Megajoule (MJ) Nutzwärme. SNG: synthetisches Erdgas (Methan); RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; biologisch/chemisch: Art der SNG-Produktion; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MeOH: Methanol.

2.4 Ökobilanzergebnisse – gemeinsame Wärme- und Stromproduktion

Brennstoffzellen (BZ) und Blockheizkraftwerke (BHKW) produzieren Wärme und Strom gleichzeitig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Methanol- und Wasserstoff-BZ sowie Wasserstoff-BHKW untersucht. Pro Megajoule Wärme erzeugen die Brennstoffzellen 0.167 kWh Strom, die BHKW 0.22 kWh. Die Umweltbelastungen dieser kombinierten Strom- und Wärmeproduktion können mit den Umweltbelastungen verglichen werden, welche bei der Erzeugung der jeweils gleichen Energiemengen mit anderen Technologien entstehen (Abbildung 6 bis Abbildung 8) – hier mit einer Kombination von Wärmepumpen (WP), welche entweder mit dem durchschnittlichen Netzstrom betrieben werden oder mit Strom aus erneuerbaren Quellen (RES), und der entsprechenden Menge an Strom, wiederum ab Netz oder aus erneuerbaren Quellen.

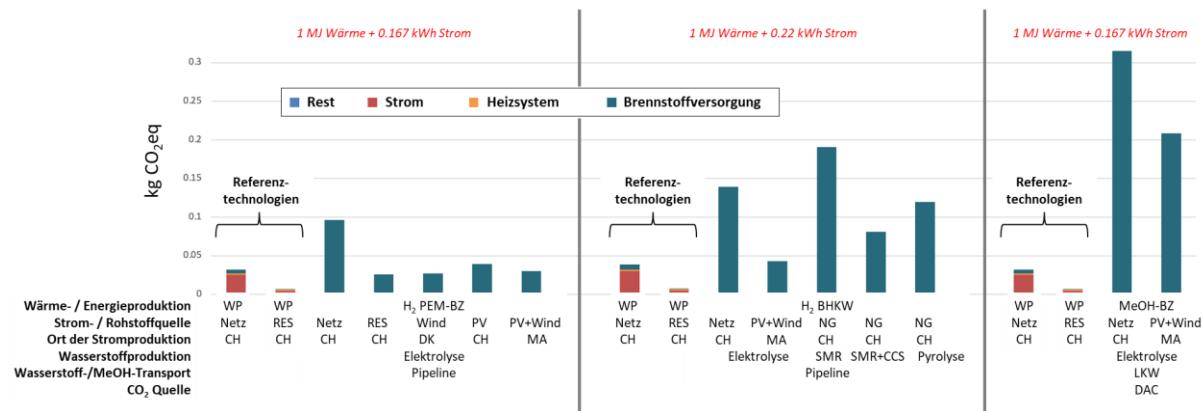


Abbildung 6: Treibhausgasemissionen der kombinierten Wärme- und Stromversorgung in kg CO₂eq. WP: Wärmepumpe; BZ: Brennstoffzelle; BHKW: Blockheizkraftwerk; Netz: durchschnittlicher Strom ab Netz; RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DK: Dänemark; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung, MeOH: Methanol.

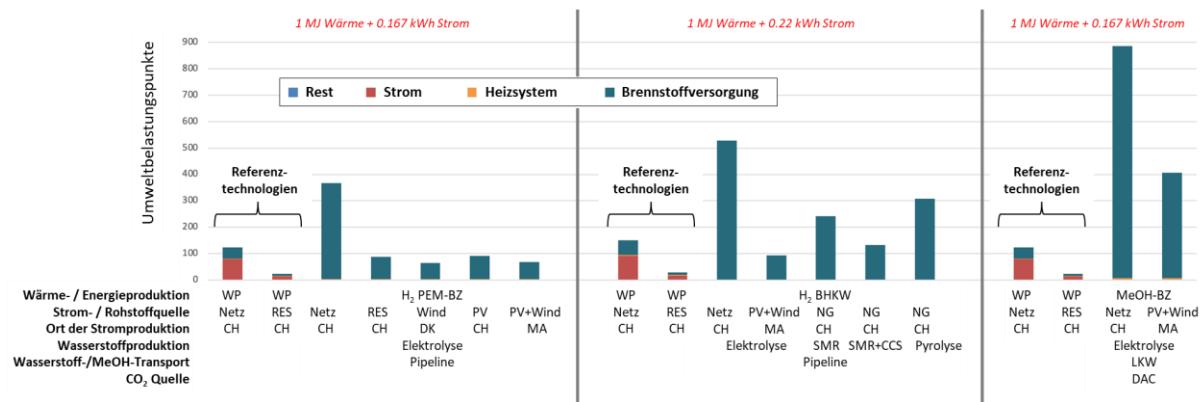


Abbildung 7: Gesamtumweltbelastung der kombinierten Wärme- und Stromversorgung in Umweltbelastungspunkten (UBP). WP: Wärmepumpe; BZ: Brennstoffzelle; BHKW: Blockheizkraftwerk; Netz: durchschnittlicher Strom ab Netz; RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DK: Dänemark; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MeOH: Methanol.

Dieser Vergleich macht deutlich, dass die Kombination aus Wärmepumpe und Strom aus erneuerbaren Quellen die mit Abstand geringsten Treibhausgasemissionen und Gesamtumweltbelastungen verursacht. Diese Kombination weist auch die mit Abstand höchste Energieeffizienz auf. H₂-BZ und H₂-BHKW, die mit Wasserstoff betrieben werden, welcher mittels Elektrolyse und Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird, generieren ähnlich hohe Treibhausgasemissionen wie die Kombination aus einer Wärmepumpe und durchschnittlichem Netzstrom. Wird der Wasserstoff jedoch mit dem Durchschnittstrom hergestellt, dann fallen sowohl Treibhausgasemissionen als auch Gesamtumweltbelastung rund doppelt so hoch aus wie bei der vergleichbaren WP-Alternative. Die Wasserstoffproduktion im Ausland an ertragreichen PV- und Windkraft-Standorten erweist sich gegenüber der Schweiz hinsichtlich Umweltbelastung als leicht vorteilhaft.

Wie schon bei der Betrachtung der reinen Wärmeproduktion erweist sich auch hier bei der kombinierten Strom- und Wärmeproduktion die direkte Nutzung von Wasserstoff gegenüber einer weiteren Umwandlung in Kohlenwasserstoffe aus Umweltperspektive als die bevorzugte Option.

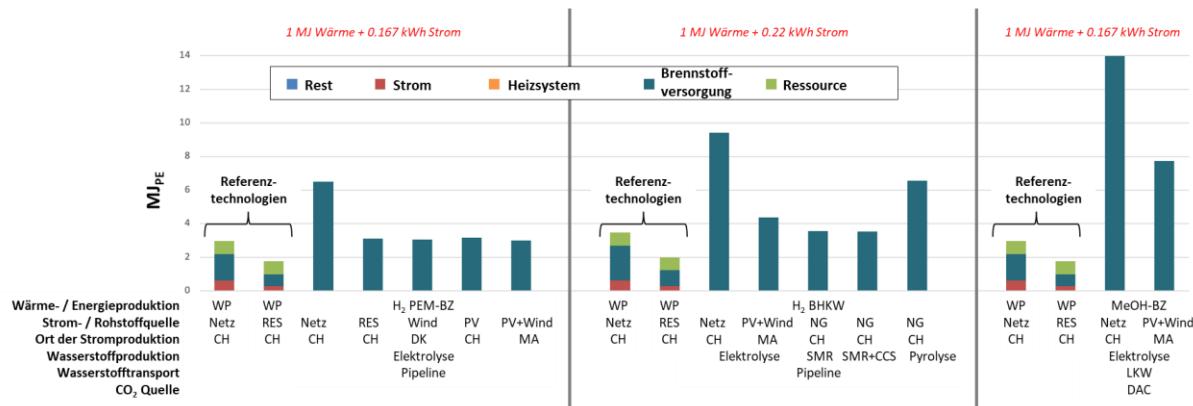


Abbildung 8: Gesamter Primärenergiebedarf (PE) der kombinierten Wärme- und Stromversorgung in Megajoule PE. WP: Wärmepumpe; BZ: Brennstoffzelle; BHKW: Blockheizkraftwerk; Netz: durchschnittlicher Strom ab Netz; RES: Strom aus erneuerbaren Quellen; MA: Marokko; DK: Dänemark; DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und Speicherung; MeOH: Methanol.

2.5 CO₂-Quellen für die Produktion von synthetischem Erdgas und Methanol

Wird zur Produktion von SNG und Methanol CO₂ aus industriellen Punktquellen wie Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) oder Zementwerken genutzt, dann ist für die Treibhausgasbilanz entscheidend, ob die CO₂-Emissionen der SNG- und Methanolverbrennung den Endnutzern dieser Brennstoffe angerechnet werden, oder den ursprünglichen CO₂-Quellen (Details dazu im Abschnitt «Weitere

Ergebnisse»). Werden diese CO₂-Emissionen den ursprünglichen CO₂-Quellen angerechnet, dann sind für die SNG-Nutzung mit CO₂ aus KVAs nur dann ähnlich hohe Treibhausgasemissionen möglich wie bei der direkten Wasserstoffnutzung, falls die Energie zur CO₂-Abscheidung KVA-intern bereitgestellt werden kann und dies nicht zu einer markanten Reduktion der von der KVA produzierten Mengen an Strom und Wärme (die anderswo genutzt werden) führt. Muss Energie aus externen Quellen zugeführt werden, oder müssen reduzierte Strom- und Wärmeproduktion anderwärts ersetzt werden, so sind die entsprechenden, zusätzlichen Treibhausgasemissionen in der Bilanz zu berücksichtigen und die Gesamtemissionen fallen tendenziell höher aus als bei der direkten Wasserstoffnutzung. Generell zu bedenken gilt es bei einer Nutzung von CO₂ aus KVA und Zementwerken zur Herstellung von Brenn- und Treibstoffen, dass der biogene CO₂-Anteil nicht für so genannte «negative CO₂-Emissionen», also eine permanente Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre mittels CCS, verfügbar ist.

2.6 Aussagekraft und Belastbarkeit der Ergebnisse

Da die vorliegende Studie zu den verschiedenen Energieträgern und deren Nutzung zur Raumwärme- und Stromversorgung im Haushaltssektor auf einen Vergleich von einzelnen Technologien beschränkt ist, kann sie nicht zur Unterstützung von Entscheidungen herangezogen werden, welche vermutlich Effekte auf Systemebene auslösen. Solche Effekte betreffen beispielsweise eine mögliche Verknappung von einzelnen (erneuerbaren) Primärenergieträgern, bei welchen die Potenziale – zumindest in der Schweiz – beschränkt sind (beispielsweise PV- und Windstromproduktion). Auswirkungen auf Systemebene würden beispielsweise bei einer grosskaligen Einführung von strombasierten Energieträgern als Ersatz von heutigen Erdgasheizungen auftreten.

Zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie wurde keine systematische Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Qualitative Aussagen zur Verlässlichkeit dieser Ergebnisse sind dennoch möglich. Generell am höchsten sind die Unsicherheiten bei Prozessen (und damit den zugehörigen Sachbilanzdaten), welche sich tendenziell noch am Anfang ihrer technischen Entwicklung befinden und für die noch keine Erfahrung hinsichtlich Praxisverhalten besteht. Darunter fallen beispielsweise Pyrolyse und autotherme Reformierung von Erdgas sowie biologische Methanisierung zur Wasserstoff- bzw. SNG-Produktion. Ebenso in diese Prozesskategorie einzureihen sind Methanol-Brennstoffzellen und Wasserstoff-BHKW, für welche kaum Daten zum Praxisbetrieb vorhanden sind. Bei derartigen Prozessen sind die Ergebnisse der Ökobilanz am wenigsten belastbar, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.

2.7 Generelle Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Trotz der genannten Einschränkungen und Unsicherheiten können einige generelle Schlussfolgerungen gezogen und Empfehlungen formuliert werden:

- Die Nutzung von Strom mit Wärmepumpen ist zur Raumwärmeversorgung aus Klima- und Umweltperspektive sowie aus Energieeffizienzgründen einer Verwendung von Strom zur Erzeugung von Wasserstoff und dessen Nutzung als Niedertemperatur-Brennstoff eindeutig vorzuziehen.
- Eine Wärmepumpe, betrieben mit Strom aus erneuerbaren Quellen, weist unter allen hier verglichenen Optionen zur Raumwärmeversorgung die mit Abstand geringsten Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungen auf.

Daraus ergibt sich, dass aus Umweltperspektive der Einsatz von strombasierten synthetischen Energieträgern – egal ob gasförmig oder flüssig – im Haushaltssektor so weit wie möglich vermieden werden sollte. Stattdessen liegt ein Ausbau der heimischen erneuerbaren Winterstromproduktion und die direkte Nutzung dieses Stroms nahe.

Allgemein können aus der Betrachtung der Produktionswege von strombasierten Energieträgern folgende Punkte zu deren Klima- und Umweltbelastung festgehalten werden:

- Die Klima- und Umweltbelastungen, welche strombasierte Energieträger – sei es Wasserstoff oder darauf aufbauende Kohlenwasserstoffe – verursachen, hängen primär davon ab, welche Art von Strom zur Wasserelektrolyse genutzt wird. Nur mit Strom aus erneuerbaren Quellen können strombasierte Energieträger im Vergleich zu fossilen Brennstoffen die Klima- und Umweltbelastungen in nennenswertem Ausmass reduzieren.
- Neben der Wasserelektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren kann auch eine Erdgasreformierung mit CO₂-Abscheidung und -speicherung unter bestimmten Voraussetzungen klima- und umweltfreundlichen Wasserstoff bereitstellen. Voraussetzungen dafür sind sehr geringe Methanemissionen entlang der Erdgasversorgungskette sowie fortgeschrittene Reformierungsverfahren, bei denen der allergrösste Teil des CO₂ abgeschieden und damit nicht als CO₂-Emission frei wird. Allerdings besteht hier der Nachteil, dass die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen nicht verringert wird und auch keine heimischen Energieressourcen genutzt werden.
- Elektrolyseanlagen an sehr ertragreichen Standorten zur PV- oder Windstromproduktion erzeugen etwas klima- und umweltfreundlicheren Wasserstoff als Anlagen in der Schweiz. Die Unterschiede sind – unter Berücksichtigung des nötigen Transports (für den Import) – jedoch eher gering.

Für den Fall, dass Wasserstoff abseits der Raumwärmeversorgung in Zukunft eine massgebliche Rolle bei der Dekarbonisierung des Schweizer Energiesystems spielen wird, ist folglich sicherzustellen, dass neue Elektrolyseanlagen parallel zu zusätzlichen Anlagen zur erneuerbaren Stromproduktion erstellt werden – unabhängig davon, ob dieser Wasserstoff in der Schweiz produziert oder importiert wird.

- Aus Klima- und Umweltperspektive ist die direkte Nutzung von Wasserstoff einer Umwandlung in synthetische Kohlenwasserstoffe und deren Verwendung als Brenn- oder Treibstoff vorzuziehen, da so keine zusätzlichen Prozessschritte – insbesondere die Abscheidung von CO₂ – nötig sind.
- Synthetisches Erdgas weist im Vergleich zu synthetischem Methanol die bessere Klima- und Umweltbilanz auf.

Wasserstoff sowie wasserstoffbasierte, synthetische Kohlenwasserstoffe sollten folglich nur für jene Anwendungen eingesetzt werden, bei denen eine direkte Nutzung von Strom aus technologischen, praktischen bzw. logistischen Gründen nicht möglich ist. Bei schwer elektrifizierbaren Anwendungen (bspw. Hochtemperaturprozesse in der Industrie), die auch mittelfristig nicht auf Verbrennungstechnologien verzichten können, sind Wasserstoff und seine Derivate neben auf Biomasse basierenden Brennstoffen denkbare Alternativen zu fossilen Brennstoffen. In der Praxis ist hier auch der Umstand zu bedenken, dass synthetisches Erdgas und Methanol (oder andere Kohlenwasserstoffe) einfacher und günstiger zu speichern sind als Wasserstoff – vor allem über längere Zeiträume. Dadurch eignen sich diese besser als Wasserstoff zur Umwandlung von saisonal auftretenden Produktions spitzen der Fotovoltaik in flexibel einsetzbare Energieträger.

3 Hintergrund

Um die Ziele zur Reduktion der CO₂-Emissionen der Schweiz – Netto-Null bis 2050 – zu erreichen, ist eine Reduktion dieser Emissionen im Haushaltssektor auf nahe Null notwendig (Kirchner *et al.*, 2020; Panos *et al.*, 2023). Im Haushaltssektor entstehen CO₂-Emissionen derzeit vor allem bei der Wärmeerzeugung zum Heizen und für die Bereitstellung von Warmwasser sowie durch Stromverbrauch. Um diese Emissionen markant zu reduzieren, ist einerseits eine Reduktion des Energieverbrauchs der Haushalte erforderlich, was vor allem durch eine verbesserte Isolation von Gebäudehüllen erreicht werden kann.

Andererseits müssen Heizöl und Erdgas – heute oft als Brennstoffe im Einsatz – durch nicht fossile Energieträger ersetzt werden. In Frage kommen dazu eine Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen, aber auch eine Verwendung von flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, die aus erneuerbaren Ressourcen erzeugt wurden. Neben aus organischen Reststoffen erzeugtem Biomethan und Holz, welche beide bereits heute zum Einsatz kommen, aber nur in begrenzten Mengen verfügbar sind, ist auch der Einsatz so genannter «strombasierter» Energieträger⁴ eine Option.

Bei strombasierten Energieträgern wird Elektrizität genutzt, indem zur Produktion solcher Brenn- und Treibstoffe Wasser mittels Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Dieser Wasserstoff kann direkt genutzt werden, oder mit CO₂ zu flüssigen oder gasförmigen Kohlenwasserstoffen – beispielsweise Methan oder Methanol – weiterverarbeitet werden. Aus all diesen strombasierten Energieträgern kann Niedertemperaturwärme für den Haushaltssektor produziert werden, sei es in Brennstoffzellen oder mittels Verbrennung in Heizkesseln.

Sofern der Strom zur Wasserelektrolyse aus erneuerbaren Ressourcen stammt, versprechen derartige strombasierte Energieträger sehr geringe CO₂-Emissionen. Solche Energieträger, vor allem Kohlenwasserstoffe, versprechen im Vergleich zu Strom, der für Wärmepumpen gebraucht wird, eine einfachere Speicherung und eventuell einen einfacheren Transport. Weiter können sie in den heute verbreiteten Erdgas- und Ölheizungen direkt genutzt werden. Demgegenüber steht eine weniger effiziente Nutzung von Energie, da bei der Erzeugung und Nutzung strombasierter Energieträger vergleichsweise hohe Verluste entlang der Produktions-, Transport- und Nutzungskette auftreten (Ueckerdt *et al.*, 2021).

Ob strombasierte Energieträger (und andere Arten der Wasserstoffproduktion) wirkungsvoll zu einer Reduktion der CO₂- und Treibhausgasemissionen des Schweizer Haushaltsektors – inklusive indirekter Emissionen – beitragen können, gleichzeitig keine unerwünschten Umweltbelastungen anderer Art verursachen, und ob diese Energieträger anderen Arten der Raumwärmeversorgung aus Umweltperspektive vorzuziehen sind, kann mit dem Werkzeug der Ökobilanzierung (englisch: Life Cycle Assessment, LCA) beantwortet werden. Solch eine Ökobilanz wurde für eine Vielzahl an Arten der Produktion von strombasierten Energieträgern und deren Nutzung zur Raumwärmeversorgung in der Schweiz erstellt (Details in «Rahmen und Methodik dieser Arbeit»). Auf diese Weise wurden sowohl die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung (nach der Methode der ökologischen Knaptheit (BAFU, 2021)) und der Bedarf an erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieressourcen als Mass der Energieeffizienz gemessen.

⁴ Oft auch als «Power-to-X» (PtX) Energieträger bezeichnet.

4 Rahmen und Methodik dieser Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Umweltbelastungen folgender drei synthetischer Energieträger quantifiziert:

1. Wasserstoff
2. Synthetisches Erdgas («Synthetic Natural Gas», SNG)
3. Methanol

Sie kommen jeweils zur Wärme- und gekoppelten Stromproduktion in der Schweiz im Haushaltsbereich zum Einsatz. Dazu werden verschiedene Endnutzungstechnologien abgebildet:

- Wasserstoff-Feuerung (Heizkessel)
- Wasserstoff-Blockheizkraftwerk (BHKW)
- Wasserstoff-Brennstoffzelle
- SNG-Feuerung
- Methanol-Feuerung
- Methanol-Brennstoffzelle

Für Wasserstoff, SNG und Methanol sind jeweils verschiedene Produktionspfade und -technologien erfasst. Zur Herstellung von Wasserstoff wurden folgende Optionen bilanziert:

- Elektrolyse (Drei Elektrolysetechnologien): alkalische Elektrolyse, Protonen-Austauschmembran (PEM) Elektrolyse, Festoxid-Elektrolyse (SOEC)
- Erdgasreformierung mit und ohne CO₂-Abscheidung und -speicherung: konventionelle Dampfreformierung (SMR) und autothermale Reformierung (ATR)
- Erdgas-Pyrolyse

Elektrolyse-Anlagen werden mit Strom aus unterschiedlichen Quellen bilanziert, nämlich Strom aus PV- und/oder Windkraftanlagen oder Schweizer Netzstrom. Neben der Produktion in der Schweiz wird auch eine Produktion in Dänemark mit Windstrom sowie mit autonomen Anlagen in Marokko mit Strom aus PV- und/oder Windkraftanlagen bilanziert.

Zur Produktion von SNG sind katalytische und biologische Methanisierung abgebildet, für die Herstellung von Methanol ein katalytisches Verfahren. Als CO₂-Quellen für diese synthetischen Kohlenwasserstoffe können direkte Abscheidung aus der Luft, bei Abfallverbrennungs- und Zementproduktionsanlagen dienen (siehe auch Abschnitt «Exkurs: Ökobilanz der Nutzung von CO₂ zur Herstellung von Treib- und Brennstoffen»). Für die CO₂-Abscheidung wird Energie in Form von Strom und Wärme benötigt. Diese Energie kann auf unterschiedliche Arten bereitgestellt werden: aus externen Quellen, also beispielsweise der Verbrennung von zusätzlichen (fossilen) Energieträgern, oder aus KVA- oder Zementwerk-internen Energieflüssen, etwa Abwärme. Hierfür wurden verschiedene exemplarische Fälle bilanziert – Details dazu sind im Hauptbericht zu finden (Sacchi and Bauer, 2024).

Speicherung und Transport der Energieträger beinhalten folgende Optionen:

- Wasserstoff-Speicherung: unterirdische Kavernen und Drucktanks
- SNG-Speicherung: Drucktank
- Methanol-Speicherung: Tank
- Wasserstoff-Transport: via Pipeline und in Druckbehältern per Lastwagen
- Erdgas-Transport per Pipeline und per Schiff als Flüssiggas (LNG)
- SNG-Transport per Erdgas-Pipeline
- Methanol-Transport per Lastwagen zum Endverbraucher

Bei allen Prozessen und Infrastrukturkomponenten werden geringe Wasserstoffverluste bilanziert, da diese Wasserstoffemissionen klimawirksam sind (Sand *et al.*, 2023).

Umweltbelastungen der gekoppelten Wärme- und Stromproduktion werden zur Berechnung von produktsspezifischen Umweltbelastungen anhand ihrer Exergiegehalte den einzelnen Produkten (Wärme und Strom) angerechnet. Zusätzlich erfolgt eine so genannte Systemerweiterung, bei der die Umweltbelastungen der gleichzeitigen Wärme- und Stromproduktion in Brennstoffzellen und BHKW mit Umweltbelastungen spezifischer Arten der Wärme- und Stromproduktion verglichen werden – hier mit Wärmepumpen, welche entweder mit Schweizer Netzstrom oder Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden und einer entsprechenden Menge an wiederum Schweizer Netzstrom oder Strom aus erneuerbaren Quellen.

Sämtliche Details zu den Verfahren und Technologien, welche in dieser Ökobilanz abgebildet sind, sind im Hauptbericht dokumentiert (Sacchi and Bauer, 2024).

Als Vergleichs- oder Referenztechnologien zur Wärmeversorgung dienen folgende Optionen:

- Wärmepumpen (WP) (Luft-Wasser WP, betrieben mit Strom ab Schweizer Netz oder aus erneuerbaren Quellen in der Schweiz)
- Holzschnitzelheizung
- Biomethanheizung
- Erdgasheizung

Die Umweltbelastungen der Stromproduktion mittels synthetischer Energieträger wird verglichen mit jener von Strom aus dem Schweizer Netz, mit Strom aus durchschnittlichen PV-Anlagen in der Schweiz sowie Erdgaskraftwerken.

Die Vergleiche der verschiedenen Arten Raumwärme und Strom bereitzustellen, erfolgt auf Basis einzelner Technologien mit den funktionellen Einheiten «1 MJ Nutzwärme» bzw. «1 kWh Elektrizität» bei isolierter Betrachtung von Wärme und Strom. Bei der gekoppelten Strom- und Wärmeproduktion in BHKW und Brennstoffzellen setzen sich die funktionellen Einheiten aus 1 MJ Nutzwärme und der technologiespezifischen, entsprechenden gleichzeitig erzeugten Menge an Strom zusammen (Brennstoffzellen: 0.167 kWh Strom je MJ Wärme, BHKW 0.22 kWh je MJ Wärme).

Ergänzend werden Ökobilanzergebnisse für die synthetischen Energieträger (Produktion bzw. Bereitstellung beim Endnutzer) ausgewiesen, und zwar pro Kilogramm Brennstoff (siehe Abschnitt «Weitere Ergebnisse»).

4.1 Exkurs: Ökobilanz der Nutzung von CO₂ zur Herstellung von Treib- und Brennstoffen

Zur Produktion von strombasierten, synthetischen Kohlenwasserstoffen (hier: Erdgas und Methanol), welche in Syntheseprozessen aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt werden, bedarf es einer CO₂-Quelle. Prozessketten dieser Art stellen Fälle von so genanntem «Carbon Capture and Utilization (CCU)» dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende drei mögliche CO₂-Quellen betrachtet:

1. Direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft
2. CO₂-Abscheidung bei Zementwerken
3. CO₂-Abscheidung bei Abfallverbrennungsanlagen (Kehrichtverbrennungsanlagen – KVA)

Das CO₂ aus diesen Quellen liefert den Kohlenstoff der synthetischen Kohlenwasserstoffe. Werden synthetisches Erdgas und Methanol verbrannt, wird dieser Kohlenstoff wiederum in Form von CO₂-Emissionen freigesetzt. Stammt der Kohlenstoff direkt aus der Atmosphäre oder aus Biomasse, wird ein quasi CO₂- oder klimaneutraler Kreislauf geschaffen, da die Zeitspanne zwischen CO₂-Entfernung bzw. -Aufnahme aus der Atmosphäre und CO₂-Emission durch die SNG- oder Methanol-Verbrennung kurz ist und kein zusätzliches CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Stammt das CO₂ jedoch aus fossilen oder

geogenen Quellen, wie im Fall von KVA und Zementwerken teilweise der Fall, dann sind diese CO₂-Emissionen klimawirksam, da sie einen zusätzlichen CO₂-Eintrag in die Atmosphäre darstellen.

Für diese Art der CO₂-Emissionen stellt sich – sofern die Umweltbelastungen der einzelnen Prozesse zur Wärme- (und Strom-)Produktion ausgewiesen werden sollen⁵ – im Rahmen einer Ökobilanz die Frage, welchen Prozessen sie angerechnet werden: A) den Endnutzern der synthetischen Brennstoffe, die durch deren Verbrennung diese CO₂-Emissionen physisch verursachen, oder B) den ursprünglichen Verursachern, also den KVA und Zementwerken. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Optionen bilanziert (siehe Abbildung 9):

1. CO₂-Emissionen werden den ursprünglichen Verursachern («System B») angerechnet («100:0 Allokation»)
2. CO₂-Emissionen werden den tatsächlichen Stoffflüssen entsprechend den Brennstoffnutzern («System A») angerechnet («0:100 Allokation»)
3. CO₂-Emissionen werden je zur Hälfte den ursprünglichen Verursachern und den tatsächlichen Emittenten angerechnet («50:50 Allokation»)

Option 1) repräsentiert die Perspektive, dass das zur Brennstoffproduktion genutzte CO₂ eine Art von Abfall der KVA bzw. des Zementwerks darstellt, für dessen Entstehung die ursprünglichen Emittenten verantwortlich sind und der unabhängig davon entsteht, ob das CO₂ genutzt wird oder nicht. Brennstoff-Nutzer betreiben quasi «CO₂-Recycling», haben dementsprechend jene Umweltbelastungen zu tragen, welche durch die CO₂-Abscheidung verursacht werden.⁶ Option 2) entspricht einer Bilanzierung der physischen Stoffflüsse, bei der die Umweltbelastungen der CO₂-Abscheidung der CO₂-Punktquelle, bei der das CO₂ abgeschieden wird, angerechnet werden. Option 3) repräsentiert eine Art von geteilter Verantwortung («burden sharing»), bei der sowohl die CO₂-Emissionen der Brennstoffnutzung als auch die Umweltbelastungen der CO₂-Abscheidung je hälftig aufgeteilt werden.

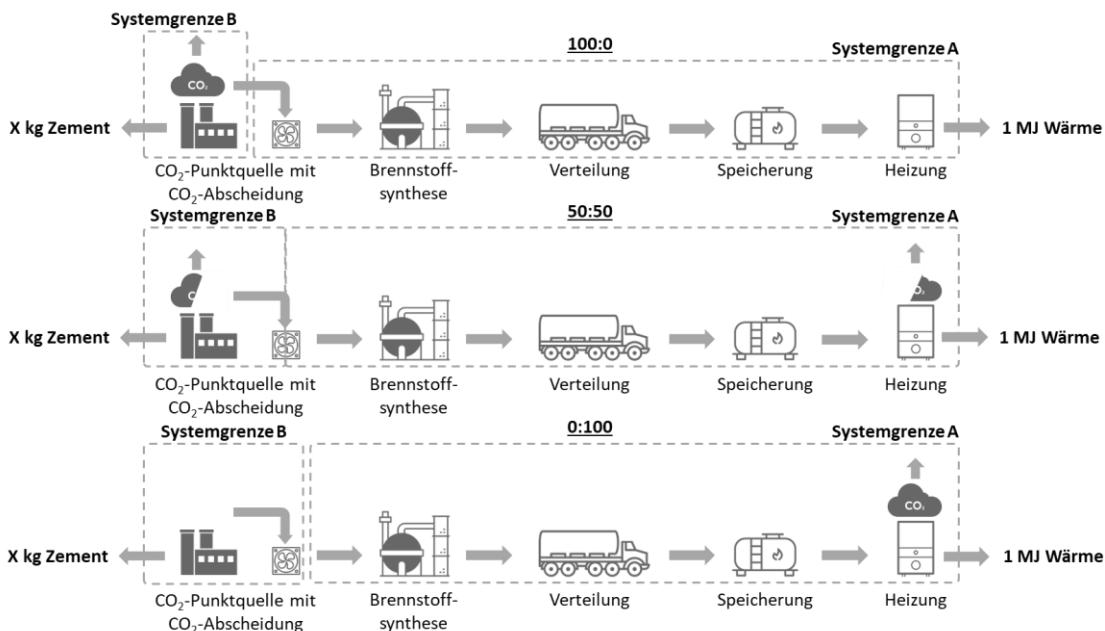


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Systemgrenzen bei der Nutzung von CO₂ aus fossilen/geogenen Quellen zur Produktion von synthetischen Brennstoffen sowie der Anrechnung der CO₂-Emissionen aus der Brennstoffnutzung für eine produktionsbezogene Ökobilanz. Oben: «100:0 Allokation» – CO₂-Emissionen werden dem ursprünglichen Emittenten (B) angerechnet, Umweltbelastungen der CO₂-Abscheidung der Brennstoffnutzung (A). Unten: «0:100 Allokation» – CO₂-Emissionen werden der Brennstoffnutzung (A) angerechnet, Umweltbelastungen der CO₂-Abscheidung dem ursprünglichen Emittenten (B).

⁵ Hier spricht man auch von so genannten «produktionsbezogenen» Ökobilanzergebnissen.

⁶ Diese Option entspricht der gegenwärtigen Perspektive der Schweizer Bundesverwaltung.

Um diese Art der willkürlichen Anrechnung der CO₂-Emissionen zu vermeiden, könnten alternativ die Umweltbelastungen der Gesamtsysteme aus Zementproduktion oder KVA («System B») sowie Brennstoffnutzung («System A») berechnet und verglichen werden mit beispielsweise den Umweltbelastungen einer Zementproduktion ohne CO₂-Abscheidung oder mit CO₂-Abscheidung und geologischer Speicherung sowie einer konventionellen Wärme- (und Strom-)Produktion. Darauf wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch verzichtet, da produktspezifische Ergebnisse im Fokus standen.

5 Weitere Ergebnisse

Im Folgenden werden weitere Ökobilanzergebnisse gezeigt und kurz diskutiert – dies für zusätzliche Varianten der Wärmeproduktion, für die Stromproduktion sowie für die Herstellung der synthetischen Energieträger Wasserstoff und synthetisches Erdgas⁷. Auf Methanol wird nicht weiter eingegangen, da aus den Ergebnissen zur Produktion von Raumwärme und Strom klar wird, dass die Nutzung von Methanol für diese Zwecke keine klima- und umweltfreundliche Option darstellt (Sacchi and Bauer, 2024).

5.1 Raumwärme

Abbildung 10 zeigt die Treibhausgasemissionen verschiedener Optionen zur RaumwärmeverSORGUNG: Wärmepumpe (WP) mit Strom aus Erneuerbaren bzw. durchschnittlichem Netzstrom in der Schweiz; konventionelle Holzschnitzel- und Erdgasheizungen; Wasserstoffverbrennung, wobei der Wasserstoff aus Elektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren oder Schweizer Netzstrom stammt; SNG-Verbrennung, wobei Wasserstoff aus Elektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren oder Netzstrom stammt und CO₂ entweder direkt aus der Luft gewonnen wird (DAC), oder in einer KVA, bei der die Energie zur CO₂-Abscheidung intern bereitgestellt wird.⁸

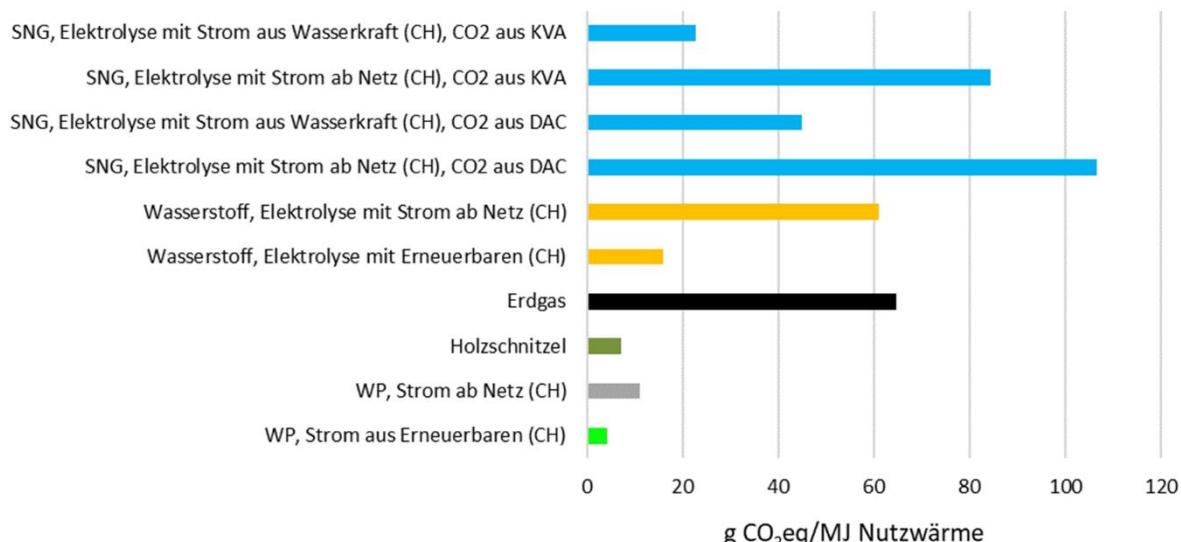


Abbildung 10: Treibhausgasemissionen der RaumwärmeverSORGUNG in g CO₂eq pro Megajoule (MJ) Nutzwärme. WP: Wärmepumpe; SNG: synthetisches Erdgas (Methan); DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; KVA: Kehrichtverbrennungsanlage, hier mit interner Energieversorgung der CO₂-Abscheidung. Die CO₂-Emissionen der SNG-Nutzung werden hier zu 100% der ursprünglichen Punktquelle, also der KVA, angerechnet⁹.

Die geringsten Treibhausgasemissionen werden von der WP, die mit Strom aus Erneuerbaren betrieben wird, verursacht. Die Emissionen der Holzschnitzelheizung sind nur geringfügig höher. Sämtliche hier untersuchte Varianten mit synthetischen, strombasierten Brennstoffen zu heizen, verursachen mindestens viermal höhere Emissionen als die WP, die mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird.

Im Vergleich zu Erdgasheizungen können Wasserstoff- und SNG-Heizungen die Treibhausgasemissionen unter bestimmten Bedingungen markant reduzieren. Im Fall der H₂-Heizung muss der

⁷ Hier werden ausschliesslich Ergebnisse der katalytischen Methanisierung dargestellt, da bezüglich der Ergebnisse keine grossen Unterschiede zur biologischen Methanisierung bestehen und die Datenqualität der Inventardaten zur katalytischen Methanisierung als besser einzuschätzen ist.

⁸ Zementwerke als CO₂-Quelle werden hier nicht dargestellt. Umweltbelastungen sind generell etwas höher als bei der Nutzung von CO₂ aus KVA – Details dazu in (Sacchi and Bauer, 2024).

⁹ Dies entspricht der «100:0 Allokation», wie beschrieben in Abschnitt 4.1.

Wasserstoff via Elektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren hergestellt werden. Im Fall der SNG-Heizung ist dies ebenfalls erforderlich und zusätzlich muss das CO₂ aus einer KVA stammen, in welcher der Energieaufwand zur CO₂-Abscheidung intern gedeckt werden kann und gleichzeitig die extern genutzten Mengen an Strom und Wärme nicht nennenswert sinken. Dies muss in KVA-fallspezifischen Analysen verifiziert werden. Außerdem ist es nötig, dass die CO₂-Emissionen aus der SNG-Verbrennung der KVA angerechnet werden können («100:0 Allokation», wie beschrieben in Abschnitt 4.1).¹⁰ Wären all diese Bedingungen erfüllt, so wären Reduktionen der Treibhausgasemissionen von rund drei Viertel (H₂-Heizung) bzw. zwei Drittel (SNG-Heizung) gegenüber Erdgasheizungen machbar.

Die Wärmepumpe, die mit Strom aus Erneuerbaren betrieben wird, verursacht auch die geringste Gesamtumweltbelastung (Abbildung 11) – alle anderen Systeme liegen um einen Faktor von mindestens rund vier darüber. Im Vergleich zur konventionellen Erdgasheizung sind unter den gleichen Bedingungen wie bei den Treibhausgasemissionen Reduktionen der Gesamtumweltbelastung mit dem Einsatz von Wasserstoff- und SNG-Heizungen möglich. Diese Reduktionen fallen aber vergleichsweise gering aus und liegen im Bereich von 30-40%.

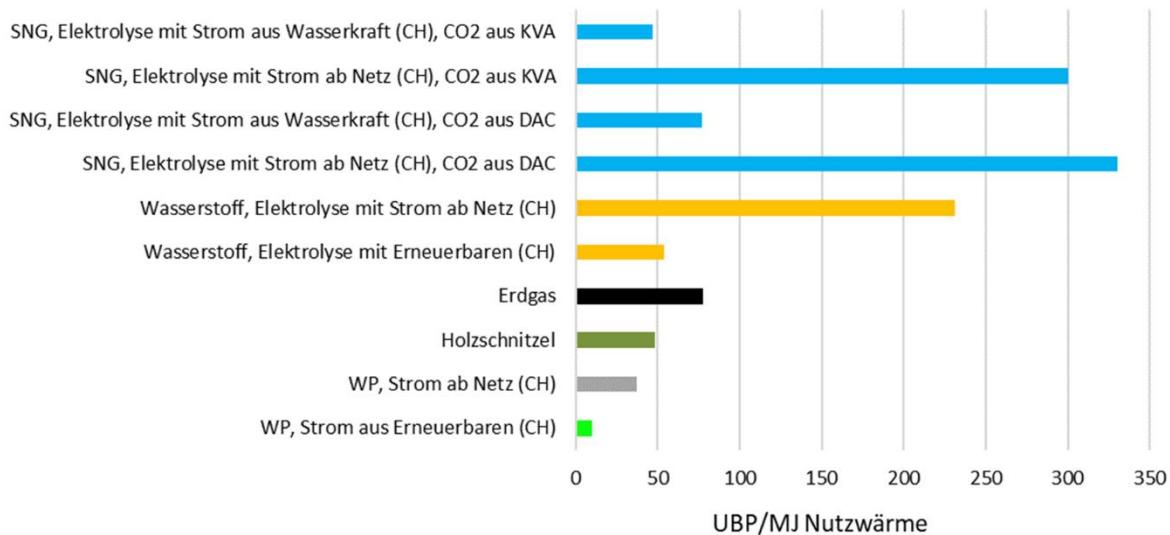


Abbildung 11: Gesamtumweltbelastung der Stromproduktion nach der Methode der ökologischen Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro MJ Nutzwärme. WP: Wärmepumpe; SNG: synthetisches Erdgas (Methan); DAC: direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; KVA: Kehrichtverbrennungsanlage, hier mit interner Energieversorgung der CO₂-Abscheidung. Die CO₂-Emissionen der SNG-Nutzung werden hier zu 100% der ursprünglichen Punktquelle, also der KVA, angerechnet.

5.2 Strom

Hier werden die Umweltbelastungen von Strom aus dem Schweizer Netz (heutiger Durchschnittsstrommix), aus einem modernen Erdgaskraftwerk und aus durchschnittlichen Photovoltaikanlagen in der Schweiz verglichen mit Umweltbelastungen der Stromproduktion aus Wasserstoff-Brennstoffzellen, H₂-BHKW und Methanol-Brennstoffzellen. Da Brennstoffzellen und BHKW neben Strom auch Wärme erzeugen, werden die Umweltbelastungen dieser Systeme zwischen Wärme und Strom aufgeteilt, hier nach dem Exergiegehalt der beiden Produkte (Details zum Vorgehen: siehe (Sacchi and Bauer, 2024)).

Strom aus PV-Anlagen weist in diesem Vergleich die mit Abstand geringsten Treibhausgasemissionen auf (Abbildung 12). Etwas höhere Emissionen sind mit dem heutigen Schweizer Strommix verbunden. Unter den Systemen, die strombasierte Energieträger nutzen, weisen die H₂-Brennstoffzellen und H₂-BHKW, welche Wasserstoff aus mit Strom aus Windkraft- und PV-Anlagen (in Marokko) betriebener

¹⁰ Wird das CO₂ aus der KVA zur Produktion von SNG genutzt, so kann dieses CO₂ nicht dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt werden und steht somit nicht zur Erzeugung von Negativemissionen zur Verfügung.

Elektrolyse verstromen, die mit Abstand geringsten Treibhausgasemissionen auf. Diese Treibhausgasemissionen sind allerdings etwa ein Drittel höher als jene des Schweizer Strommix. Wird statt PV- und Windstrom in Marokko Schweizer Netzstrom für die Elektrolyse verwendet, so verdreifachen sich die Emissionen der Wasserstoff-Verstromung in etwa.

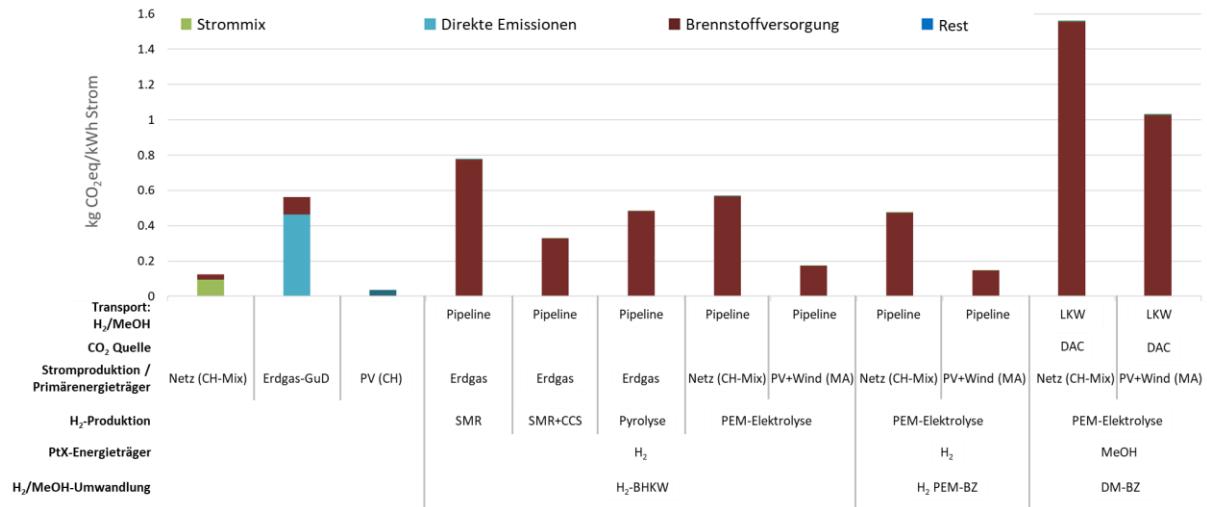


Abbildung 12: Treibhausgasemissionen der Stromproduktion in kg CO₂-eq pro Kilowattstunde Strom. GuD: Gas- und Dampfkraftwerk; PV: Fotovoltaik; SMR: Erdgasreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und -Speicherung; MA: Marokko; DAC: Direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; MeOH: Methanol; DM-: Direkt-Methanol; BZ: Brennstoffzelle.

Die Ergebnisse hinsichtlich Gesamtumweltbelastung (Abbildung 13) sind ähnlich: Strom aus PV-Anlagen verursacht die mit Abstand geringste Belastung und unter den Systemen, die strombasierte Energieträger nutzen, schneiden wiederum die H₂-Systeme am besten ab, die Wasserstoff aus Marokko nutzen. Auch bei der Gesamtumweltbelastung ist der Einfluss der Stromquelle, welche für die Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion genutzt wird, der dominierende. Schweizer Netzstrom statt erneuerbaren Stromquellen erhöht hier die Gesamtumweltbelastung um etwa einen Faktor vier. Die Verstromung von Methanol verursacht sowohl die höchsten Treibhausgasemissionen als auch Gesamtumweltbelastungen. Dies liegt zum einen an zusätzlichen Energieverlusten bei der Umwandlung von H₂ und CO₂ zu Methanol, zum anderen am Energieverbrauch der Anlage zur CO₂-Abscheidung aus der Luft, der hier zum Teil mit fossiler Energie gedeckt wird.

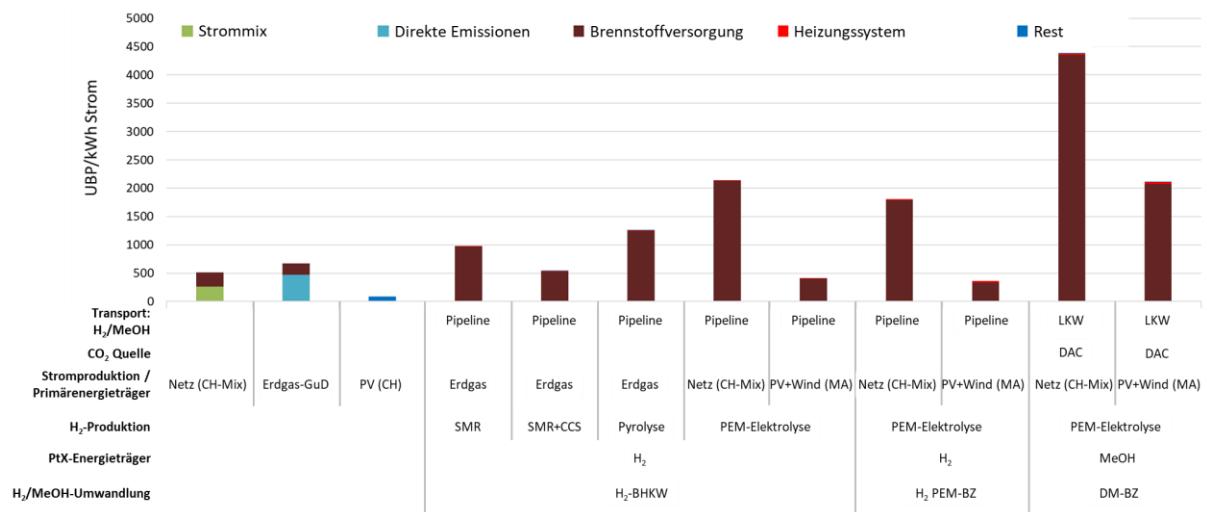


Abbildung 13: Gesamtumweltbelastung der Stromproduktion nach der Methode der ökologischen Knaptheit in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro Kilowattstunde Strom. GuD: Gas- und Dampfkraftwerk; PV: Fotovoltaik; SMR: Erdgasreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und -Speicherung; MA: Marokko; DAC: Direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; MeOH: Methanol; DM-: Direkt-Methanol; BZ: Brennstoffzelle.

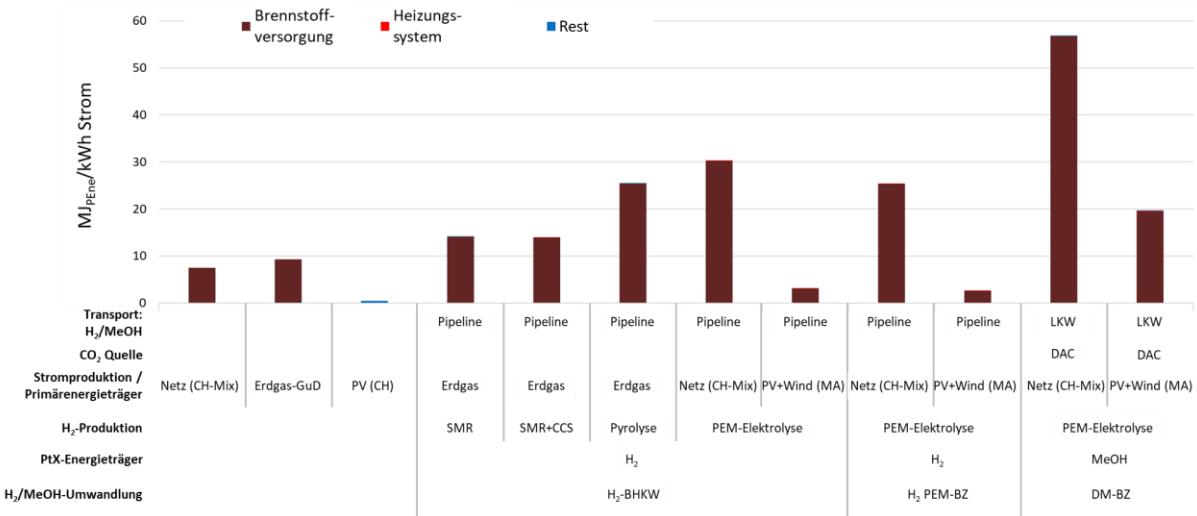


Abbildung 14: Nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand (PE_{ne}) der Stromproduktion, in MJ_{PEne} pro Kilowattstunde Strom. GuD: Gas- und Dampfkraftwerk; PV: Fotovoltaik; SMR: Erdgasreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und -Speicherung; MA: Marokko; DAC: Direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; MeOH: Methanol; DM-: Direkt-Methanol; BZ: Brennstoffzelle.

Hinsichtlich Energieeffizienz – nicht erneuerbarer Primärenergieaufwand (Abbildung 14) und Primärenergieaufwand insgesamt (Abbildung 15) – schneidet Strom aus PV-Anlagen ebenfalls am besten ab. Unter den Systemen, die Wasserstoff verstromen, weisen jene, die Wasserstoff aus Marokko nutzen, erzeugt mit PV- und Windstrom, den mit Abstand geringsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf auf – dieser liegt auch nur bei rund einem Drittel des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs des heutigen Schweizer Netzstroms. Der gesamte Primärenergiebedarf hingegen ist bei der Nutzung von Wasserstoff aus Erdgasreformierung ähnlich hoch wie jeder aus Elektrolyse mit Strom aus Erneuerbaren. Strom aus synthetischen Energieträgern weist in diesem Vergleich immer einen höheren gesamten Primärenergiebedarf auf als Netzstrom und auch Strom aus einem Erdgaskraftwerk, mindestens um etwa 30% was die vergleichsweise geringe Energieeffizienz der gesamten Produktions- und Nutzungskette der synthetischen Energieträger wiederspiegelt.

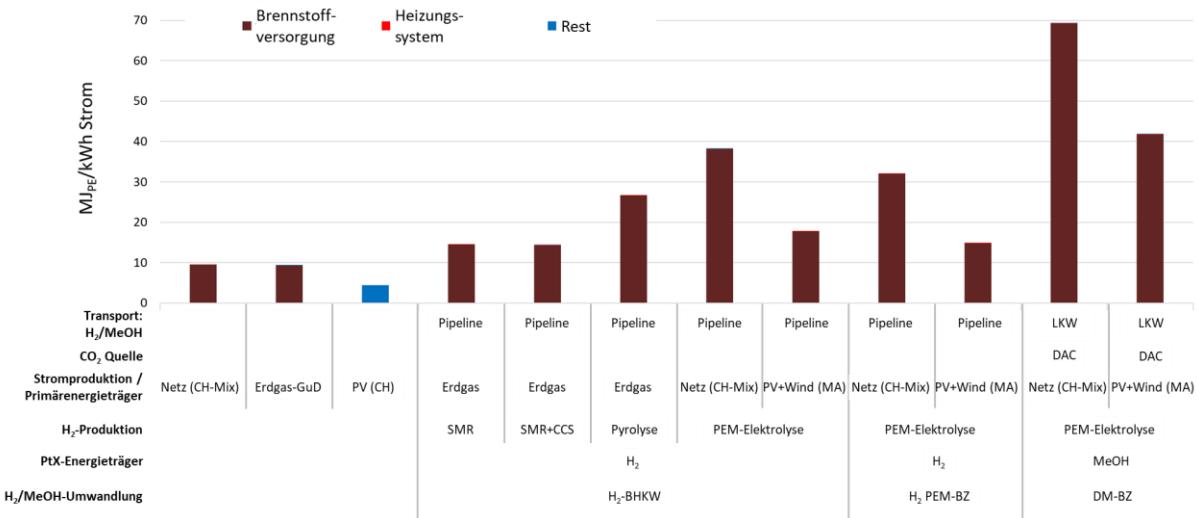


Abbildung 15: Primärenergieaufwand (erneuerbar + nicht erneuerbar) der Stromproduktion, in MJ_{PE} pro Kilowattstunde Strom. GuD: Gas- und Dampfkraftwerk; PV: Fotovoltaik; SMR: Erdgasreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und -Speicherung; MA: Marokko; DAC: Direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft; MeOH: Methanol; DM-: Direkt-Methanol; BZ: Brennstoffzelle.

5.3 Energieträger

Im Folgenden sind ausgewählte Ökobilanzergebnisse zur Herstellung der Energieträger Wasserstoff und synthetisches Erdgas (SNG) dargestellt. Vollständige Ergebnisse sind in (Sacchi and Bauer, 2024) zu finden.

5.3.1 Wasserstoff

Abbildung 16 zeigt die Treibhausgasemissionen der Wasserstoffproduktion aus verschiedenen Primär-energieträgern und mit unterschiedlichen Produktionsverfahren (Erdgasreformierung (mit und ohne CCS) und -pyrolyse¹¹ sowie Wasserelektrolyse¹²).

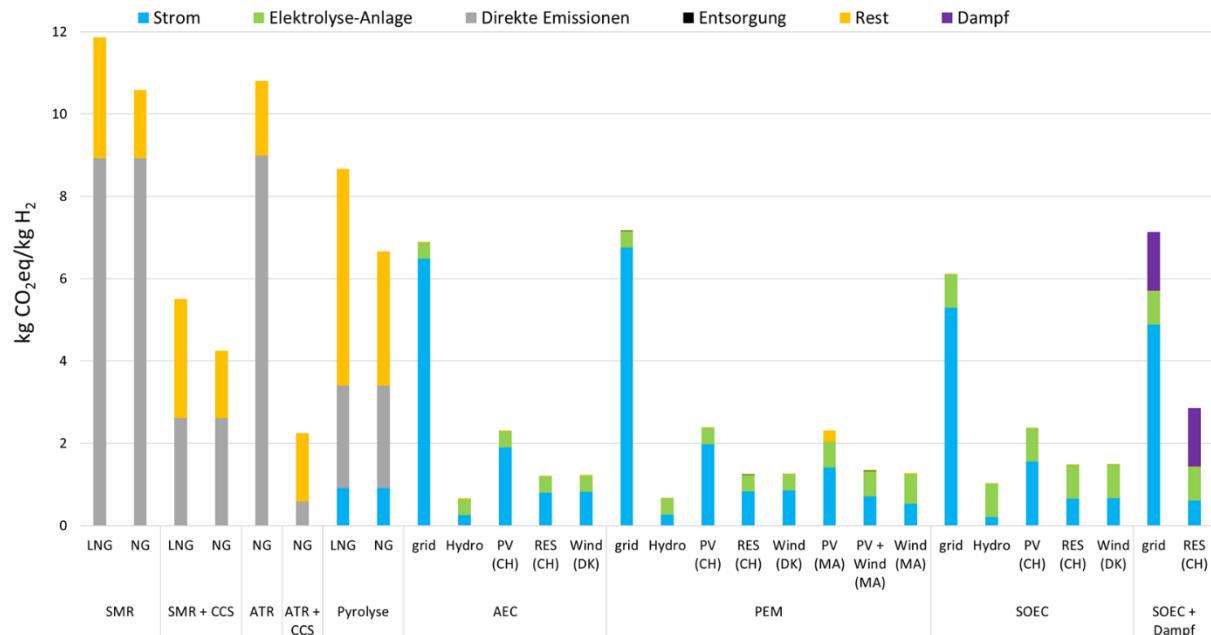


Abbildung 16: Treibhausgasemissionen der Wasserstoffproduktion mit verschiedenen Produktionsverfahren und Primär-energieträgern. LNG: Flüssig-Erdgas. NG: Erdgas (gasförmig); SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und -speicherung; ATR: Autothermale Erdgasreformierung; AEC: Alkalische Elektrolyse; PEM: Protonenaustauschmembran-Elektrolyse; SOEC: Feststoffoxid-Elektrolyse; «grid»: durchschnittlicher Netzstrom Schweiz; «Hydro» Wasserkraft Schweiz; RES: Strom aus Erneuerbaren in der Schweiz; PV: Fotovoltaik; DK: Dänemark; MA: Marokko. «Rest» beinhaltet bei den Erdgas-Technologien vor allem die Treibhausgasemissionen, die mit der Erdgasproduktion und -versorgung verbunden sind.

Die geringsten Emissionen werden verursacht, wenn Wasserkraft zur Elektrolyse genutzt wird. Gegenüber dem heutigen Standardverfahren der Wasserstoffproduktion, der Erdgas-Dampfreformierung (SMR), lassen sich die Emissionen um mehr als 90% reduzieren. Die Nutzung von PV-Strom in der Schweiz bringt eine Reduktion von etwa drei Viertel. Nur bei fortgeschrittenen Erdgasreformierungsverfahren mit CO₂-Abscheidung und -speicherung ist eine ähnlich hohe Emissionsreduktion möglich («ATR+CCS»). Alle anderen Verfahren, die Erdgas nutzen, verursachen deutlich höhere Emissionen als Elektrolyse unter Verwendung von Strom aus Erneuerbaren. Wird allerdings Elektrolyse mit dem Schweizer Strommix betrieben, so führt das zu eher hohen Treibhausgas-

¹¹ Bei der Erdgaspyrolyse entsteht neben Wasserstoff auch Kohlenstoff in fester Form, welcher unter Umständen als Produkt verkauft werden könnte. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass dies generell der Fall ist – dementsprechend werden sämtliche Umweltbelastungen der Pyrolyse (sowie der vorgelagerten Prozesse) dem Wasserstoff angerechnet.

¹² Bei der Elektrolyse von Wasser entsteht neben Wasserstoff auch Sauerstoff. Im Rahmen dieser Arbeit werden sämtliche Umweltbelastungen der Elektrolyse (sowie der vorgelagerten Prozesse) dem Wasserstoff angerechnet, da im Allgemeinen nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Sauerstoff als Produkt genutzt werden kann. Details zu Allokationsverfahren sind generell in (Sacchi and Bauer, 2024) zu finden.

emissionen – die Reduktion gegenüber Erdgas-Dampfreformierung liegt bei rund 30-40%. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Elektrolyseverfahren sind gering, es sei denn es wird fossile Energie genutzt, um den Dampf für die Feststoffoxid-Elektrolyse zu erzeugen («SOEC+Dampf», Abbildung 16).

Abbildung 17 zeigt die Gesamtumweltbelastung der Wasserstoffproduktion aus verschiedenen Primärenergieträgern und mit unterschiedlichen Produktionsverfahren (Erdgasreformierung und Erdgaspyrolyse sowie Wasserelektrolyse) nach der Methode der ökologischen Knappheit (BAFU, 2021). Qualitativ sind diese Ergebnisse jenen für die Treibhausgasemissionen sehr ähnlich. Wasserstoffproduktion per Elektrolyse macht aus ökologischer Perspektive nur Sinn, wenn Strom aus erneuerbaren Quellen genutzt wird; und für die Nutzung von Erdgas gilt dies ausschliesslich für fortgeschrittene Verfahren, bei denen der allergrösste Teil des produzierten CO₂ dauerhaft geologisch gespeichert wird («ATR+CCS») – hier ist die Gesamtumweltbelastung ähnlich hoch wie bei der Wasserelektrolyse unter Verwendung von Strom aus PV-Anlagen oder einem Mix aus Erneuerbaren («RES CH»).

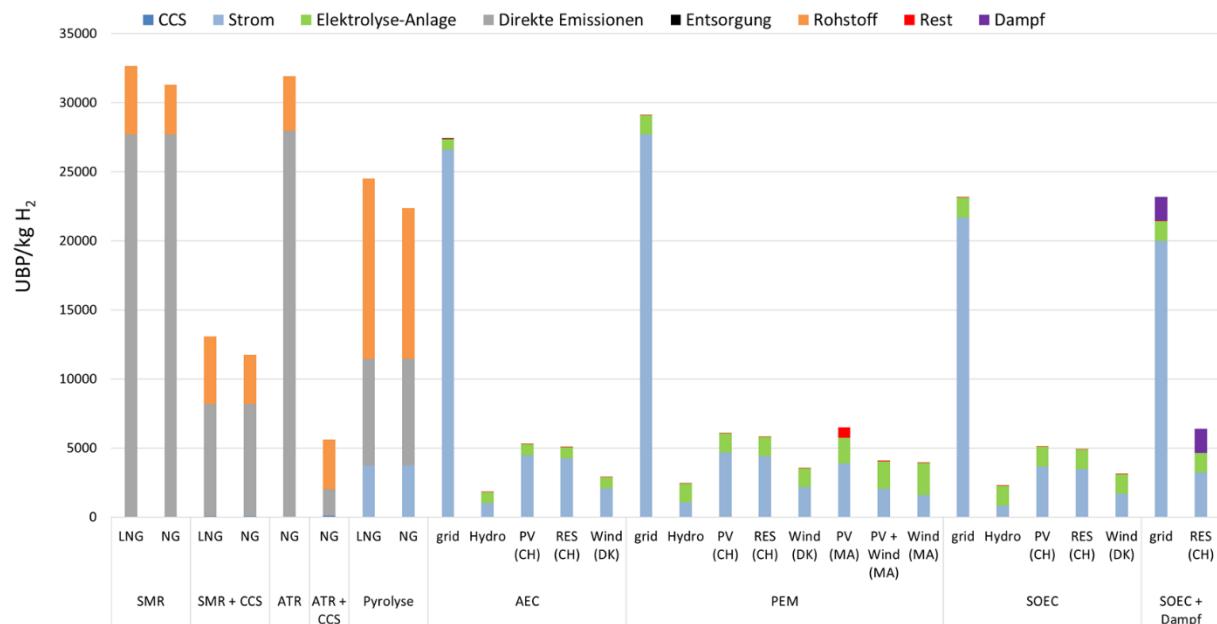


Abbildung 17: Gesamtumweltbelastung der Wasserstoffproduktion mit verschiedenen Produktionsverfahren und Primärenergieträgern in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro kg H₂. LNG: Flüssig-Erdgas. NG: Erdgas (gasförmig); SMR: Erdgas-Dampfreformierung; CCS: CO₂-Abscheidung und -speicherung; ATR: Autothermale Erdgasreformierung; AEC: Alkalische Elektrolyse; PEM: Protonenaustauschmembran-Elektrolyse; SOEC: Feststoffoxid-Elektrolyse; «grid»: durchschnittlicher Netzstrom Schweiz; «Hydro» Wasserkraft Schweiz; RES: Strom aus Erneuerbaren in der Schweiz; PV: Photovoltaik; DK: Dänemark; MA: Marokko. «Rohstoff» beinhaltet bei Erdgastechnologien vor allem die Umweltbelastungen, welche bei der Erdgasförderung und -versorgung anfallen.

5.3.2 Synthetisches Erdgas

Abbildung 18 zeigt die Treibhausgasemissionen, welche durch die Produktion von synthetischem Erdgas (SNG) aus Wasserstoff und CO₂ entstehen¹³, bzw. jene, die von der Erdgasversorgung in der Schweiz verursacht werden, inklusive verbrennungsbedingter CO₂-Emissionen¹⁴. Die CO₂-Emissionen aus der SNG-Verbrennung werden hier den ursprünglichen Verursachern – Zementwerken und KVAs – angerechnet. Die Reduktionen der Treibhausgasemissionen gegenüber Erdgas hängen vor allem von

¹³ Hier werden ausschliesslich die Ergebnisse für die katalytische Methanisierung dargestellt; diese unterscheiden sich nicht massgeblich von jenen der biologischen Methanisierung. Die Qualität der Sachbilanzdaten wird bei der katalytischen Methanisierung allerdings als höher eingeschätzt.

¹⁴ Nur die Berücksichtigung dieser verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen von fossilem Erdgas erlaubt einen sinnvollen Vergleich mit SNG, da diese Emissionen in jedem Fall eine Klima- und Umweltbelastung darstellen. Stammt beim SNG das CO₂ direkt aus der Atmosphäre (DAC), oder werden die verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen nicht den SNG-Nutzern angerechnet, so entfällt diese Klima- und Umweltbelastung in der Bilanz von synthetischem Erdgas.

der Art der Stromversorgung der Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion ab: Wird CO₂-arme Wasserkraft genutzt, dann ist eine Reduktion der Emissionen um etwa 70% möglich, sofern die Energie zur CO₂-Abscheidung in der KVA intern bereitgestellt werden kann («heat recovery») und sich dadurch die an Verbraucher gelieferten Mengen an Strom und Wärme nicht reduzieren¹⁵. Dies stellt quasi den «Optimalfall» für synthetisches Erdgas dar.

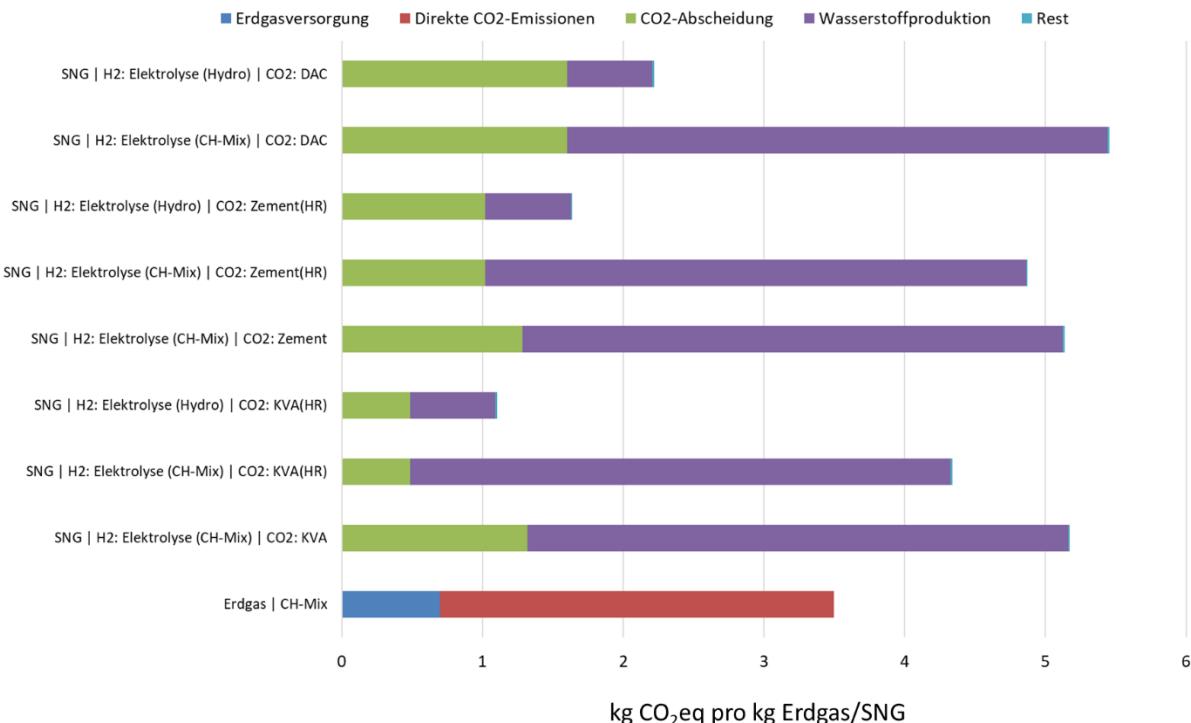


Abbildung 18: Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung von synthetischem Erdgas (SNG), erzeugt aus Wasserstoff und CO₂, bzw. fossilem Erdgas (beim Endverbraucher) inkl. der verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen. Wasserstoff wird hier mittels Elektrolyse erzeugt, entweder mit dem Schweizer Strommix (CH-Mix), oder Strom aus Wasserkraft («Hydro») in der Schweiz. CO₂ stammt entweder aus direkter Luftabscheidung (DAC), einem Zementwerk, oder einer KVA (mit oder ohne «Heat Recovery» (HR)). Emissionen aus der SNG-Verbrennung werden hier den CO₂-Punktquellen angerechnet (Zementwerk oder KVA).

Die Ergebnisse zur Gesamtumweltbelastung (Abbildung 19) sind qualitativ wiederum sehr ähnlich wie die Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen. Nur im Optimalfall, bei einer Nutzung von Strom aus CO₂-armen Quellen wie insbesondere Wasserkraft, Nutzung von KVA- (oder Zementwerk-) intern verfügbarer Energie zur CO₂-Abscheidung ohne nennenswerte Reduktion der für externe Abnehmer produzierten Mengen an Strom und Wärme, sowie die Anrechnung der verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen an die ursprünglichen Produzenten (KVA oder Zementwerk) erlaubt eine wirksame Reduktion der Gesamtumweltbelastung im Vergleich zu Erdgas.

¹⁵ Solch allfällige Reduktionen der Mengen an Strom und Wärme, die von der KVA mit CO₂-Abscheidung produziert werden, sind hier nicht berücksichtigt, da sie von der spezifischen Auslegung der einzelnen KVAs abhängen.

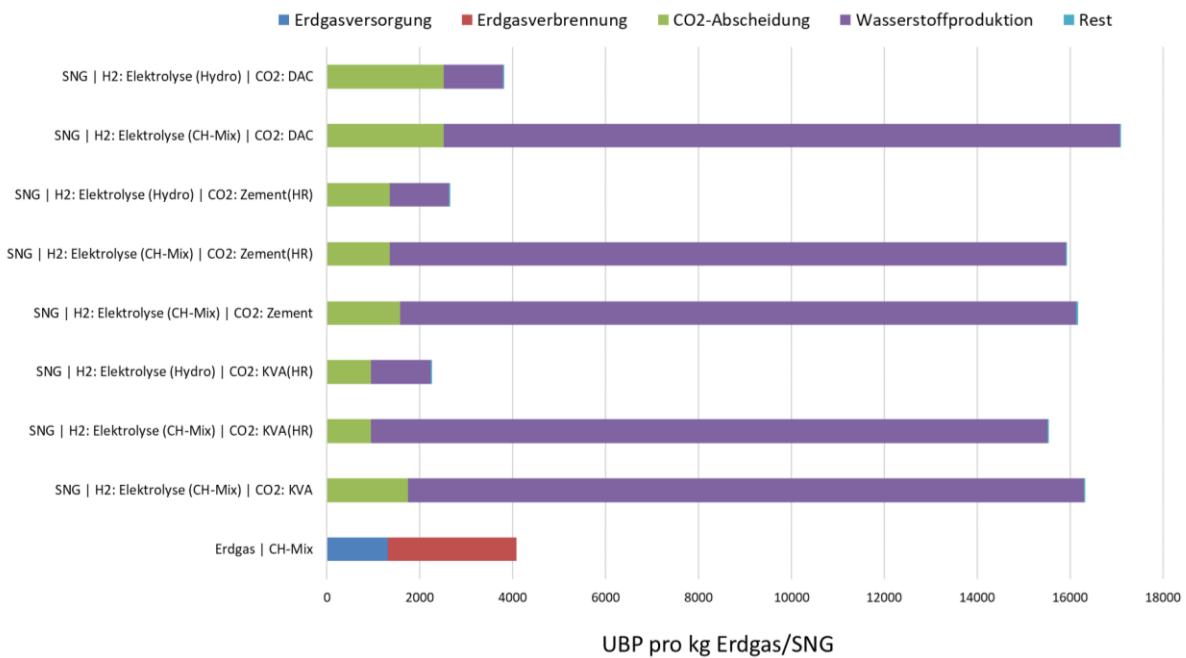


Abbildung 19: Gesamtumweltbelastung aus der Bereitstellung von synthetischem Erdgas (SNG), erzeugt aus Wasserstoff und CO₂, bzw. fossilem Erdgas (beim Endverbraucher) inkl. UBP der verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen, in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro kg SNG/Erdgas. Wasserstoff wird hier mittels Elektrolyse erzeugt, entweder mit dem Schweizer Strommix (CH-Mix), oder Strom aus Wasserkraft («Hydro») in der Schweiz. CO₂ stammt entweder aus direkter Luftabscheidung (DAC), einem Zementwerk, oder einer KVA (mit oder ohne «Heat Recovery») (HR)).

6 Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass synthetische, strombasierte Energieträger (und auch Wasserstoff aus Verfahren mit vergleichsweise geringen Treibhausgasemissionen) aus ökologischer Perspektive im Allgemeinen nicht im Bereich Raumwärmeversorgung eingesetzt werden sollten, da dort mit Wärmepumpen und der damit direkten Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen eine deutlich effizientere, klima- und umweltfreundlichere Option existiert. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund von beschränkten Ausbaupotenzialen bei der erneuerbaren Stromproduktion relevant – knappe Ressourcen sollten möglichst sparsam und sinnvoll eingesetzt werden.

Offene Fragen, welchen sich die Forschung in Zukunft im Zusammenhang mit synthetischen Treib- und Brennstoffen widmen sollte, sind vor allem im systemischen Zusammenhang zu finden. Beispielsweise, in welchem Umfang diese Brenn- und Treibstoffe in Zukunft gebraucht werden, wie die Produktion solcher Energieträger bei einem zukünftigen massiven Ausbau von Solar- und Windenergie zur Sektorkopplung und Steigerung der Gesamteffizienz im Energiesystem beitragen kann, welche Umweltauswirkungen aus einer Produktion in grossem Stil resultieren, welches die Anwendungssektoren mit dem grössten ökologischen Nutzen sein werden, und wo die Produktion solcher Energieträger vorzugsweise stattfinden soll. All diese offenen Fragen können nicht mit Ökobilanzen (allein) beantwortet werden, sondern erfordern darüber hinaus die Anwendung von Systemmodellen, in denen alle Energieverbrauchssektoren sowie Faktoren wie technische Machbarkeit, Kosten, erforderliche Umsetzungszeiten, internationale Zusammenhänge und beschränkte Ressourcenpotenziale berücksichtigt werden.

7 Literatur

- BAFU (2021) *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit*. Bern, Switzerland. Available at: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wirtschaftskonsum/publikationen-studien/publikationen/oekofaktoren-schweiz.html>.
- Kirchner, A. et al. (2020) *Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht*. Bern, Switzerland.
- Panos, E. et al. (2023) 'An assessment of energy system transformation pathways to achieve net-zero carbon dioxide emissions in Switzerland', *Communications Earth and Environment*, pp. 1–18. doi: 10.1038/s43247-023-00813-6.
- Sacchi, R. and Bauer, C. (2024) *LCA of Power-to-X processes and applications in the residential sector*. Villigen PSI.
- Sand, M. et al. (2023) 'A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen', *Communications Earth & Environment*, 4(1), p. 203. doi: 10.1038/s43247-023-00857-8.
- Ueckerdt, F. et al. (2021) 'Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation', *Nature Climate Change*, 11, pp. 384–393. doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>.