



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

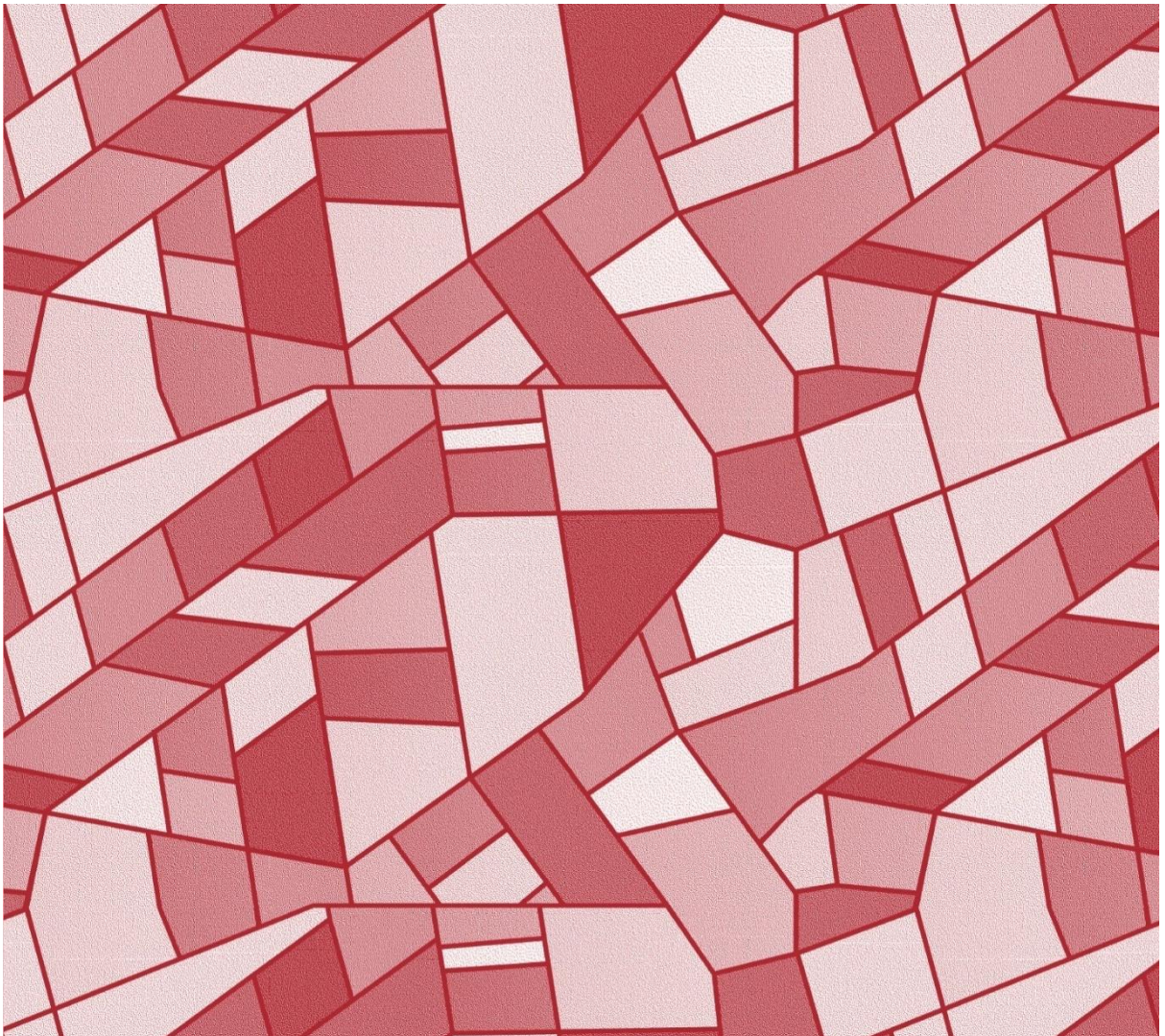
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht

H2-IND

Zukünftiger Wasserstoffverbrauch in der Schweizer Industrie

:





Datum: 25. Januar 2024

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
BFE-Forschungsprogramm Wasserstoff
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
CH-8032 Zürich

Autorinnen:

Mercedes Rittmann-Frank, EBP, Mercedes.Rittmann-Frank@ebp.ch
Sabine Perch-Nielsen, EBP, Sabine.Perch-Nielsen@ebp.ch
Dominique Steverlynck, EBP, dominique.steverlynck@ebp.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502635-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

In der Schweiz gewinnt Wasserstoff H_2 als potenzieller Energieträger zunehmend an Bedeutung, insbesondere als Ersatz für fossile Brennstoffe bei der industriellen Wärmeerzeugung. Diese Studie prognostiziert den zukünftigen Bedarf an grünem Wasserstoff in Schweizer Industrien bis zum Jahr 2050. Der Bedarf wird zwischen 2.4 und 5.4 TWh (72'000 bis 162'000 Tonnen H_2) liegen. Der Wasserstoff wird hauptsächlich für die Bereitstellung von Prozesswärme und geringfügig, als Prozessgas verwendet werden.

Die Studie nutzt eine Kombination aus Studien und Experteninterviews, um Daten zur Erhebung von Prozessgasen zu validieren und Szenarien für das zukünftige Potenzial von grünem Wasserstoff in der Schweizer Industrie zu entwickeln. Der Bedarf an Wasserstoff als Prozessgas in der Schweiz ist derzeit mit 0.4 TWh (13'000 Tonnen) gering, und Experten prognostizieren keinen signifikanten Anstieg in der Zukunft. Die Schliessung der Raffinerie in Cressier 2044 ist die einzige bedeutende Veränderung in Bezug auf den Wasserstoffbedarf als Prozessgas.

Bezüglich des Brennstoffbedarfs gestaltet sich die Erhebung komplex, da keine spezifischen Daten zum Energieverbrauch nach Temperaturen vorliegen. Es wird ein kombinierter Ansatz aus quantitativen und qualitativen Methoden verwendet, der auf vorhandenen Statistiken und Studien basiert. Diese Daten werden mittels Experteninterviews validiert und Szenarien für das zukünftige Potenzial von grünem Wasserstoff in der Schweizer Industrie erstellt. Zusätzlich werden existierende oder geplante Umsetzungen von grünen Wasserstoffprojekten in der Industrie recherchiert und durch Gespräche mit Betreibern ergänzt.

Der aktuelle thermische Energieverbrauch der Schweizer Industrie beträgt insgesamt 26 TWh. Es wird angenommen, dass klimafreundliche Technologien fossile Brennstoffe bis zu einer Temperatur von $200^{\circ}C$ ersetzen können. Oberhalb von $200^{\circ}C$ wird der Einsatz von Brennstoffen wahrscheinlich weiterhin notwendig sein. Daher ist von besonderem Interesse, wie hoch der Anteil des Energieverbrauchs über $200^{\circ}C$ ist und in welchen Sektoren er anfällt. Dabei werden drei Industriegruppen identifiziert: Niedertemperaturgruppe mit Prozesswärmebedarf in den Temperaturbereichen unter $200^{\circ}C$. Mitteltemperaturgruppe mit Prozesswärmebedarf zwischen $200^{\circ}C$ und $500^{\circ}C$ und Hochtemperaturgruppe mit Prozesswärmebedarf von Temperaturen über $500^{\circ}C$: Diese Gruppe umfasst energieintensive Branchen wie Chemie/Pharma, Zement, Mineralien, Nichteisenmetalle, Metalle und teilweise die Metall- und Geräteindustrie. Ihr Wärmeverbrauch liegt bei ca. 15 TWh, wovon 47% durch fossile Energieträger bereitgestellt werden.

Die Abschätzung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs erfolgt in dieser Studie unter Berücksichtigung des Prozesswärmebedarfs bis 2050. Der Prozesswärmebedarf wird unter den Annahmen einer unveränderten Industriestruktur, d.h. ohne Abwanderung von Unternehmen, und einer Effizienzsteigerung von 25% bis 2050 auf ca. 17 TWh geschätzt. Abzüglich der bisherigen Nutzung anderer Brennstoffe wie Biomasse und Abfall verbleibt ein noch fossil bereitgestellter Prozesswärmebedarf von 9.4 TWh, der dekarbonisiert werden muss. Bei vollständiger Elektrifizierung der Niedertemperaturindustrie

verbleibt ein Restbedarf von ca. 7 TWh in der Mittel- und Hochtemperaturgruppe, die weiterhin fossile Brennstoffe zur Wärmebereitstellung benötigen.

Der Anteil der Energieerzeugung von 7 TWh, der durch Wasserstoff gedeckt wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel den Wasserstoffpreisen, der Technologieentwicklung und der Infrastruktur. Eine Möglichkeit wäre, die derzeitige Gasversorgung von 4 TWh auf grünen Wasserstoff umzustellen und dabei die bestehende Gasnetzinfrastruktur zu nutzen. Ein möglicher Wasserstoffbedarf für die Wärmeversorgung im Jahr 2050 hängt auch vom Anteil alternativer Brennstoffe ab. In dieser Studie wird angenommen, dass dieser Anteil zwischen 25% und 75% liegt, was zu einem Bedarf von 2 bis 5 TWh führt. Zusätzlich werden 0.4 TWh für den Prozessgasbedarf benötigt.

Bei einer künftigen Verfügbarkeit von Wasserstoff in grossen Mengen und zu wettbewerbsfähigen Preisen würde das Potenzial über die bisherigen Erwartungen hinausgehen. Die Fallstudien verdeutlichen zudem, dass nicht nur der Temperaturbereich entscheidend ist, sondern auch standortbezogene Gegebenheiten eine Rolle spielen. Daher könnten auch Unternehmen aus den Niedertemperaturgruppen von den Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung profitieren, was das Potenzial erhöhen könnte.

Summary

In Switzerland, hydrogen (H₂) is gaining increasing interest as a potential energy carrier, especially as a substitute for fossil fuels in industrial heat generation. This study forecasts the future demand for green hydrogen in Swiss industry up to the year 2050, which is estimated to be between 2.4 TWh and 5.4 TWh (72'000 to 162'000 tons of H₂). Hydrogen will primarily be used to provide process heat and, to a lesser extent, as a process gas.

The study combines a literature review and expert interviews to validate the process gas estimation data and develop scenarios for the future potential of green hydrogen in Swiss industry. Currently, the demand for hydrogen as a process gas in Switzerland is low at 0.4 TWh (13'000 tons), and experts do not expect a significant increase in the future, with the closure of the Cressier refinery in 2044 being the only notable change.

Estimating the future amount as a fuel for process heat is complicated by the lack of specific data on energy consumption by temperature. A combined approach of quantitative and qualitative methods is used, based on existing statistics and studies. In addition, existing or planned implementations of green hydrogen projects in the industry are reviewed.

The current thermal energy consumption of Swiss industry is 26 TWh. Various climate-friendly technologies already exist to replace fossil fuels up to a temperature of 200°C. Above 200°C, fuel use is likely to remain necessary, particularly in energy-intensive sectors such as chemicals/pharmaceuticals,

cement, minerals, non-ferrous metals, metals, and partially in the metal and equipment industries.

The estimation of future hydrogen demand in this study considers process heat demand until 2050. Assuming an unchanged industrial structure and an efficiency increase of 25% by 2050, the process heat demand is estimated to be about 17 TWh. After subtracting the current use of other fuels such as biomass and waste, there remains a fossil derived process heat demand of 9.4 TWh that needs to be decarbonized.

Take-home messages

- Wasserstoff gewinnt in der Schweiz zunehmend an Bedeutung als potenzieller Energieträger, insbesondere als Ersatz für fossile Brennstoffe bei der industriellen Wärmeerzeugung.
- Die prognostizierte zukünftige Nachfrage nach grünem Wasserstoff in Schweizer Industrien bis zum Jahr 2050 wird zwischen 2.4 und 5.4 TWh (entsprechend 73'000 bis 163'000 Tonnen H₂) liegen, wobei der Hauptverwendungszweck die Bereitstellung von Prozesswärme ist.
- Wie hoch der Anteil der Energieerzeugung durch Wasserstoff sein wird, hängt von Faktoren wie Wasserstoffpreis, Technologieentwicklung und Infrastruktur ab.

1.	Ausgangslage	8
2.	Vorgehen	10
3.	Heutiger und künftiger H ₂ -Bedarf als Prozessgas	13
3.1	H ₂ -Prozessgasbedarf in der Schweiz	13
4.	Heutiger Bedarf von H ₂ als Brennstoff für Prozesswärme	16
4.1	Alternative Technologien	16
4.2	Aktueller Wärmeverbrauch Industriesektor	19
5.	Fallbeispiele	25
5.1	Fallbeispiel 1: Emaillierungsanlage VZUG	26
5.2	Fallbeispiel 2: Belags- und Strassenbau	28
5.3	Fallbeispiel 3: Wunsiedel	30
5.4	Fallbeispiel 4: H ₂ Bois	32
6.	Künftiger H ₂ -Bedarf als Brennstoff für Prozesswärme	33
6.1	Künftiger Bedarf an Wasserstoff	34
6.2	Einordnung mit Referenzszenarien	36
7.	Zusammenfassung	38
8.	Ausblick	40
A1	Prozesse	42

1. Ausgangslage

Grüner Wasserstoff (H_2) wird als der vielversprechendsten molekülbasierter Energieträger für ein zukünftiges klimafreundliches Energiesystem angesehen. Die eher unbestrittenen Einsatzbereiche sind als Ersatz für fossile Brennstoffe, die heute für industrielle Wärmeerzeugung verwendet werden, als Treibstoff für den Schwerverkehr, als Prozessgas in der Produktion oder auch als Speicher, um die Stromnachfrage in der Zukunft zu stabilisieren.

Grüner Wasserstoff als klimafreundliches Schlüsselement im Energiesystem der Zukunft

Die Vielfalt der potenziellen Anwendungsbereiche zeigt, wie vielfältig und komplex die Thematik rund um das H_2 -Molekül ist, das eines der Schlüsselemente im zukünftigen Energiesystem sein kann. Komplex deshalb, weil Akteure aus verschiedenen Bereichen und mit unterschiedlichen Interessen zusammengebracht werden müssen, um die zukünftige Infrastruktur und das System so zu gestalten, dass eine energetisch und wirtschaftlich effiziente und erfolgreiche Energiewende möglich wird. Dafür werden Rahmenbedingungen durch Strategien in der EU gesetzt. Der Plan REPowerEU¹ hat das Ziel, die EU unabhängig von fossilen Brennstoffen zu machen und den Übergang zu erneuerbaren Energien zu beschleunigen. Für das Jahr 2030 prognostiziert REPowerEU eine Produktion von 10 Millionen Tonnen sowie den Import weiterer 10 Millionen Tonnen, um industrielle Prozesse und den Verkehr zu dekarbonisieren. Um die Erzeugung sicherzustellen, laufen derzeit Projekte, Verhandlungen und Roadmaps. Potenzielle Erzeugerländer erstrecken sich von Spanien über Skandinavien und Südamerika (Chile, Brasilien) bis nach Nordafrika.

Wasserstoff muss sektorübergreifend behandelt werden

Es ist klar, dass Wasserstoff grosses Potenzial hat, aber es gibt noch viele Fragen zu Produktion, Machbarkeit, Transport und Kosten zu beantworten. Und auch die Nachfrageseite wirft viele Fragen auf. Wie viel wird in Zukunft benötigt werden, wer wird es brauchen und wo wird die zukünftige Nachfrage sein? Es ist zunächst notwendig, diese Fragen für die potenziellen Nutzer zu klären, um aus einer techno-ökonomischen Perspektive zu ermitteln, wie Wasserstoff am effektivsten zu den zukünftigen Verbrauchern gebracht werden kann. Hierbei gilt es zu analysieren, ob eine Anpassung der bestehenden oder der Aufbau einer neuen Infrastruktur möglich und sinnvoll ist. Des Weiteren ist zu klären, aus welchen Quellen der Wasserstoff bezogen werden soll.

Viele offene Fragen von Produktion, Transport, Nachfrage zu Kosten

Diese Studie konzentriert sich auf die potenziellen Nutzer von grünem Wasserstoff in der Schweizer Industrie und zielt darauf ab, die grundlegende Frage zu beantworten: Wie viel grünen Wasserstoff wird die Schweizer Industrie in Zukunft benötigen? Unser Fokus liegt dabei auf den Bedarf in der industriellen Produktion und schliesst die Mobilität aus.

Studie untersucht das Potenzial von grünem Wasserstoff in der Schweizer Industrie

Einerseits analysieren wir, wie viel grüner Wasserstoff zukünftig für die Substitution von grauem Wasserstoff, der gegenwärtig als Prozessgas verwendet wird, benötigt wird. Andererseits liegt der Hauptfokus der Studie darauf zu ermitteln, in welchem Umfang künftig grüner Wasserstoff als umweltfreundlicher Brennstoff nachgefragt werden könnte, da hier eine wesentlich

1 https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

grössere Menge erwartet wird. Dafür analysieren wir, in welchem Umfang die aktuell für die Bereitstellung von Prozesswärme genutzten fossilen Brennstoffe durch Wasserstoff ersetzt werden könnten. Dabei gehen wir davon aus, dass Prozesswärme bis zu 200°C hauptsächlich durch Elektrifizierung dekarbonisiert werden kann. Daher liegt unser Hauptaugenmerk auf dem Energiebedarf von Hochtemperaturprozessen und auf Industriebranchen mit diesen Prozessen.

Ziel der Studie:

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs der Schweizer Industrie bis 2050. Der Fokus liegt dabei auf der differenzierten Betrachtung des Einsatzes von Wasserstoff als Brennstoff zur Bereitstellung von Prozesswärme und als Prozessgas in Produktionsanwendungen.

Dafür werden folgende Fragestellungen beantwortet:

- Wieviel und wofür wird aktuell Wasserstoff eingesetzt und in welchen Industriebranchen?
- Wie viele Industriebranchen mit Hochtemperaturwärmebedarf gibt es, bei denen Wasserstoff künftig als Brennstoff eingesetzt werden könnte?
- Wie könnten sich diese Industriebranchen und die Prozesse bis 2050 entwickeln?
- Welchen Anteil könnte Wasserstoff im Energiemix zur Erzeugung von Hochtemperatur Prozesswärme ausmachen?

2. Vorgehen

Wasserstoff als Prozessgas

Zur Erhebung der Menge von Wasserstoff als Prozessgas werden folgende Studien als Grundlage genutzt.

— Lehner et al., «Swiss Hydrogen Production and demand», BFE 2018

— «The future of Hydrogen» report prepared by IEA for G20, Japan, 2019

Aufgrund der begrenzten Datenlage und der damit verbundenen Unsicherheit werden die Daten aus den Studien im Anschluss durch Interviews mit neuen Expertinnen und Experten validiert.

Wasserstoff als Brennstoff

Die Erhebung des zukünftigen Energiebedarfs für industrielle Hochtemperatur-Wärme in der Schweiz ist anspruchsvoll, da keine Daten zum Energieverbrauch nach Temperaturen vorliegen. Obwohl Verbrauchsdaten nach Sektoren existieren und es Studien zu branchenspezifischen Temperaturverteilungen in Europa gibt, fehlen konkrete Daten für die Schweiz. Daher verwenden wir einen kombinierten Ansatz, bei dem quantitative datenbasierte Analysen mit qualitativen Ansätzen kombiniert werden. Dieser Ansatz ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

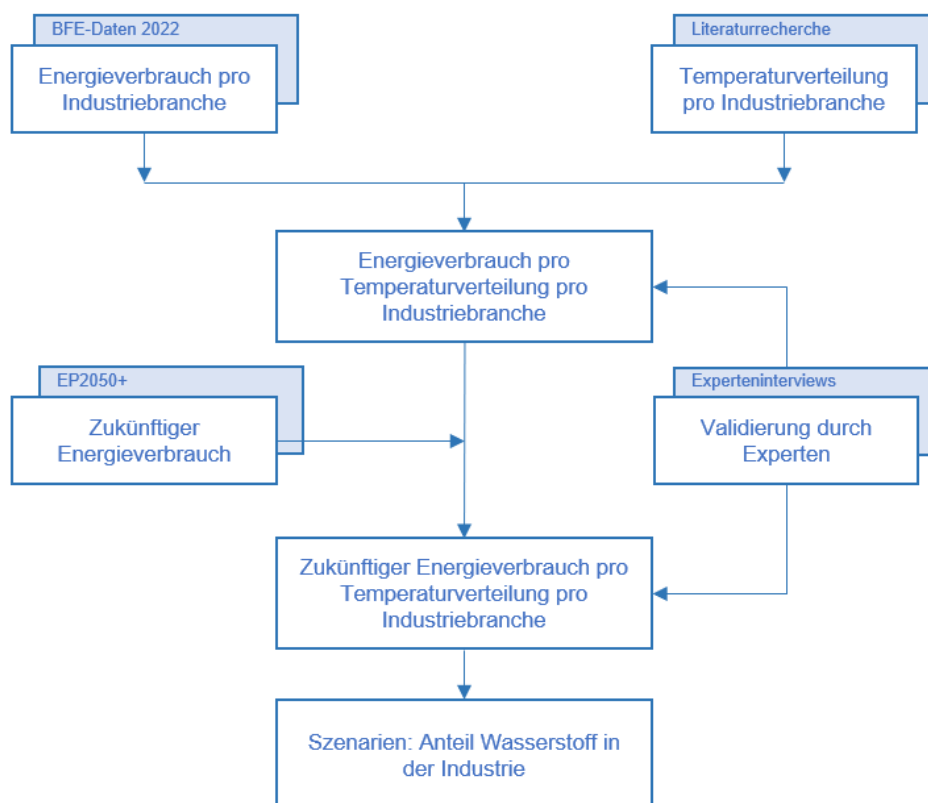


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Vorgehens, um den sektor- und temperaturspezifischen Energieverbrauch in der Schweiz zu ermitteln (hellblaue Rechtecke = zugrundeliegende Daten)

Im Weiteren werden diese Arbeitsschritte genauer erläutert:

Energieverbrauch pro Temperaturverteilung pro Industriebranche

Zur Ermittlung des thermischen Energieverbrauchs pro Industriebranche in verschiedenen Industriezweigen in der Schweiz wurden die Daten aus den Statistiken "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2022 nach Verwendungszwecken (Bundesamt für Energie BFE)" und "Endenergieverbrauch Industrie und Dienstleistung in den Jahren 1999 bis 2022" verwendet.

Temperaturverteilung pro Industriebranche

Die Temperaturverteilung pro Industriebranche wurde aus den folgenden Studien entnommen:

- T. Naegler et al. «Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level», Int. J. Energy Res. 2015; 9:2019-2030, DOI:10.1002/er.3436
- TU Wien, Ecpfys im Auftrag BMWFW «Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und effizienter fernwärme- und Fernkälteversorgung», 2015
- Weissbuch Fernwärme Schweiz –VFS Strategie, «Langfristperspektiven für erneuerbare und energieeffiziente Nah- und Fernwärme in der Schweiz» 2014
- S. Frisch et al. «Prozesswärme im Marktanreizprogramm» DLR, 2010

Die Temperaturverteilung wurde in Niedertemperatur ($<100^{\circ}\text{C}$), Mitteltemperatur (100°C - 500°C) und Hochtemperatur ($>500^{\circ}\text{C}$) unterteilt, basierend auf der Temperaturbetrachtung der zugrunde liegenden Studien. Die angegebenen Temperaturverteilungen für jede Branche durch die Studien wurden dann gemittelt. Die Mittelwerte wurden dann auf die branchenspezifischen Energieverbrauch für Wärme in der Schweiz übertragen, um den Energieverbrauch pro Temperaturbereich und für jede Industriebranche zu erhalten.

Künftiger Energieverbrauch pro Temperaturverteilung pro Industriebranche

Aus den Energieperspektiven 2050+ wurden die Werte für die Veränderung des Energieverbrauchs in der Industrie übernommen und auf den heutigen Energiebedarf angewendet.

Validierung durch Experteninterviews

Die Ergebnisse der Auswertungen des aktuellen und zukünftigen Energieverbrauchs nach Temperaturverteilung pro Industriesektor wurden durch Interviews mit acht Expertinnen und Experten validiert. Diese wurden zusätzlich um Hinweise für Fallstudien gebeten, die den Einsatz von grünem Wasserstoff in der Schweiz für industrielle Zwecke veranschaulichen.

Hierbei wurde ein Interviewleitfaden erstellt (Anhang A1), der als Grundlage für die Gespräche mit den Expertinnen und Experten diente (siehe Tabelle 1). Die Auswertung fokussierte sich auf die inhaltliche Qualität, Muster, Themen und Erkenntnisse, die aus den Antworten gewonnen werden konnten.

Themenbereich	Experte / Expertin
Scienceindustries Wirtschaftsverband Chemie Pharma Life Sciences	– Anna Bozzi, Leiterin Umwelt und Nachhaltigkeit – Michael Matthes, Stv. Direktor (Gesammelte Antworten von Mitgliedern)
Swissmem	– Dr. Jean-Philippe Kohl, Vizedirektor und Leiter Wirtschaftspolitik, – Philipp Bregy, Ressortleiter Energie
Metal.suisse	– Andreas Steffes
IGEB Interessengemeinschaft Energieintensive Branchen	– Carla Hirschburger-Schuler (Gesammelte Antwort der Verbands Mitglieder)
Verband H ₂ -Produzenten	– Hannesen Nafissa, Geschäftsführerin – Arthur Janssen, Präsident & Leiter Strategie und Innovation IWB
Forschung	– Prof. Beat Wellig, HSLU

Tabelle 1: Übersicht der Interviewpartner

Szenarien

Die Szenarien zum Wasserstoffpotenzial in der Schweizer Industrie basieren auf der zukünftigen Entwicklung des thermischen Energieverbrauchs. Es werden verschiedene Annahmen berücksichtigt, um präzise Einschätzungen darüber zu gewinnen, wie sich der Einsatz von Wasserstoff für die Bereitstellung industrieller Wärme unter unterschiedlichen Bedingungen entwickeln könnte.

Fallbeispiele

Mittels Desk-Research werden existierende oder zeitnah geplante Umsetzungen von grünen Wasserstofflösungen in der Industrie recherchiert. Es werden Steckbriefe erstellt mit Informationen zu Anwendung, Leistung, Investition- und Betriebskosten, H₂-Ursprung sowie Logistik und Transport. Die Informationen werden durch Gespräche mit Betreibern ergänzt.

3. Heutiger und künftiger H₂-Bedarf als Prozessgas

Die Studie legt den Fokus auf den Wasserstoffbedarf der Schweizer Industrie. Dennoch ist es von Interesse, den globalen Kontext zu verstehen, um zu erkennen, warum die Berücksichtigung von grünem Wasserstoff als Prozessgas weltweit in der Zukunft von Bedeutung ist.

H₂ als Prozessgas,
globale Perspektive

Seit 1970er Jahren hat sich der Bedarf an Wasserstoff als Prozessgas weltweit vervierfacht². Von den insgesamt 94 Millionen Tonnen Mt (2021) Wasserstoff, wurden 40 Mt in Raffinerien verwendet (einschliesslich der Produktion von Polymeren und Harzen), 31 Millionen Tonnen für die Ammoniakherstellung (Dünger) genutzt und um die 23 Millionen Tonnen in anderen Anwendungsgebieten eingesetzt.

In der chemischen Industrie wird Wasserstoff als Bestandteil für verschiedene Produkte eingesetzt, wobei 84% für die Ammoniakproduktion und 12% für Methanol verwendet werden. Der Rest teilt sich auf die Produktion von für Polyurethan und Nylon auf³.

Die Nachfrage nach Wasserstoff als Prozessgas steigt unvermindert an, doch die Versorgung beruht nach wie vor nahezu ausschliesslich auf fossilen Brennstoffen, vorrangig Erdgas und Kohle. Allerdings wird mit der zunehmenden Verfügbarkeit von kohlenstoffarmem Wasserstoff dieser zu einem Instrument für die Dekarbonisierung in neuen Prozessen. Wie zum Beispiel in der Stahlproduktion. Dort gibt es zwei Hauptwege für die Nutzung von Wasserstoff: Erstens kann Wasserstoff in bestehende Hochöfen eingeblasen werden, was jedoch nur zu einer begrenzten Emissionsreduktion von bis zu 20% führt⁴. Zweitens kann Wasserstoff als Hauptreduktionsmittel in der Herstellung von Schwamm-Eisen verwendet werden (DRI), was Emissionsreduktionen von etwa 90-95% ermöglicht, vorausgesetzt der Wasserstoff ist vollständig kohlenstoffneutral⁴. Bei Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff sind jedoch erhebliche Mengen an erneuerbarem Strom erforderlich.

Herstellung von dekarbonisiertem Stahl mit Wasserstoff als Prozessgas

3.1 H₂-Prozessgasbedarf in der Schweiz

In der Schweiz ist der Bedarf von Wasserstoff als Prozessgas im Vergleich zu den Nachbarländern sehr gering, da beispielsweise Metall recycelt wird und es keine Hochöfen gibt, wie in Deutschland. Im Jahr 2018 wurde der Bedarf an Wasserstoff als Prozessgas auf 13'000 Tonnen, äquivalent zu

In den letzten 5 Jahren blieb der Bedarf an Wasserstoff als Prozessgas stabil bei etwa 13'000 t oder 431 GWh.

2 «The future of Hydrogen» report prepared by IEA for G20, Japan, 07.2019 https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf

3 «Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas», CertifHy, 2015, <https://paperzz.com/doc/7899868/overview-of-the-market-segmentation-for-hydrogen-across>

4 Hydrogen: The Burning Question. Chemical Engineer. 2019. <https://www.thechemicalengineer.com/features/hydrogen-the-burning-question/>

431 GWh jährlich geschätzt⁵. Der grösste Verbrauch liegt bei der Raffinerie in Cressier, wie in der Tabelle 2 ersichtlich.

Industrie- branche	Raffinerie	Glas	Chemie Industrie		Metallverarbei- tung	Weitere	Total
Industrie- bereich		Uhrenin- dustrie	Chemie- und Pharma	Syntheti- sche Stein pro- duktion			
Ver- brauch 2018 [kt]	11	0.7	0.6	0.5	0.05	0.05	13
2023	→	→	→	→	→	→	→
Zukünftig 2040	↓	?	→	↓	→	→	↓

Tabelle 2: Übersicht von Wasserstoff als Prozessgas basierend auf [1]. Bedeutung der Pfeile
→ : gleichbleibender Bedarf, ↓ : sinkender Bedarf an H₂.

Die Experteninterviews mit den Industrieverbänden ergaben, dass die gegenwärtigen Zahlen sich weiterhin in den gleichen Grössenordnungen bewegen. Laut Expertenaussagen erscheint es plausibel, dass 600 Tonnen Wasserstoff in der Pharma- und Chemiebranche verwendet werden. Wasserstoff als Prozessgas findet beispielsweise Anwendung bei der Hydrierung in der Herstellung von Vitaminen. Es gibt jedoch Entwicklungen in der Biotechnologie, die das etablierte Verfahren ersetzen und den Verbrauch von Wasserstoff als Prozessgas reduzieren könnte. Welche Entwicklung sich durchsetzt, hängt wahrscheinlich von wirtschaftlichen Faktoren wie dem Preis ab.

Auch Experten in den metallverarbeitenden Branchen geben an, dass 50 Tonnen Wasserstoff pro Jahr durchaus plausibel sind. Allerdings wird auch betont, dass die Menge an Wasserstoff als Prozessgas vernachlässigbar ist. Die vielversprechende Anwendung des DRI-Prozesses (Direct Reduced Iron) in der Metallverarbeitung hat in der Schweiz keine Relevanz. Dies liegt daran, dass die Stahlproduktion in der Schweiz ausschliesslich auf recyceltem Metall basiert und dieser Prozess bereits weitgehend dekarbonisiert ist, da Elektroöfen eingesetzt werden.

Aus den Aussagen lässt sich schliessen, dass der Wasserstoffbedarf, der im Jahr 2018 auf 13'000 Tonnen geschätzt wurde, aktuell in der gleichen Grössenordnung liegt.

Die zukünftige Nachfrage der Verbrauchertypen wird grösstenteils als stabil eingeschätzt. Eine Ausnahme bildet dabei die Raffinerie in Cressier, die derzeit etwa 11'000 Tonnen Wasserstoff verbraucht. Gemäss den Energieperspektiven wird nach 2043 die einzige Raffinerie der Schweiz in Cressier geschlossen. Die Produktion von Benzin, Diesel, Flüssiggas und Heizöl wird auf dem heutigen Niveau von rund 120 PJ bis Ende der 2030er Jahre weitergeführt. Der sinkende Bedarf an Mineralölprodukten wird somit

Keine nennenswerte, steigende Nachfrage für Wasserstoff als Prozessgas erwartet.

5 Lehner et al., «Swiss Hydrogen Production and demand», BFE 2018

zunehmend im Inland gedeckt, bevor im Jahr 2044 die inländische Rohölraffination eingestellt wird, weil die Nachfrage dann unter 80 % der Raffineriekapazität fällt und ein Weiterbetrieb unwirtschaftlich wäre. Dies hat zur Folge, dass auch die damit verbundene Produktion und Nutzung von Wasserstoff in Cressier wegfallen wird⁶.

Insgesamt wird der zukünftige Bedarf von H₂ als Prozessgas im Vergleich zum Bedarf an Wasserstoff als Brennstoff als vernachlässigbar betrachtet.

6 Energieperspektiven 2050+, Exkurs Wasserstoff, 2022

4. Heutiger Bedarf von H₂ als Brennstoff für Prozesswärme

Die Bedeutung des grünen Wasserstoffs für die Zukunft liegt vor allem in der Substitution fossiler Brennstoffe in der industriellen Prozesswärmeanwendung, die in der Schweiz weit mehr erfordert als die Verwendung von Wasserstoff als Prozessgas.

Potenzial für Wasserstoff als Substitution von fossilen Energieträgern in der Industrie.

Der Fokus für industrielle Prozesswärme liegt besonders auf energieintensiven Branchen wie Stahl, Zement und Chemie. Obwohl Elektrifizierung einen Teil der aktuellen fossilen Brennstoffe ersetzen kann, zeigt eine EU Studie⁷ durchgeführt durch das Fraunhofer Institut ISI, dass in Europa weiterhin ein erheblicher Bedarf an klimafreundlichen Brennstoffen besteht.

4.1 Alternative Technologien

Aktuell gibt es Bestrebungen, alle Branchen zu dekarbonisieren. Neben der generellen Steigerung der Effizienz, die zu einem insgesamt geringeren Energieverbrauch führt, gibt es diverse klimafreundliche Technologien zur Bereitstellung von Prozesswärme, wie in Abbildung 2 dargestellt.

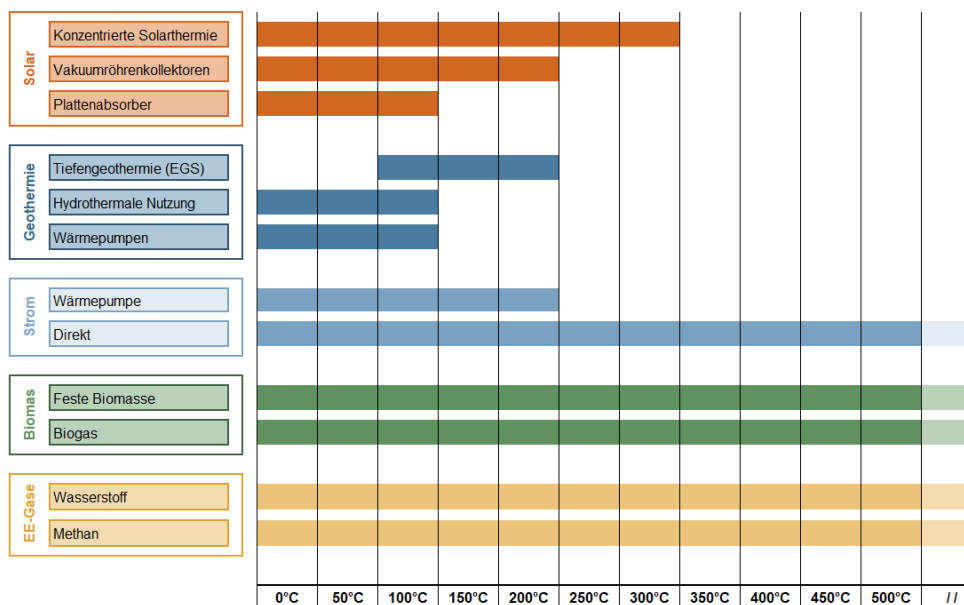


Abbildung 2 Übersicht der Technologien und Brennstoffe zur Bereitstellung von industrieller Wärme.

Eine effiziente und CO₂-neutrale Wärmequelle ist die Solarthermie, die in Kombination mit einem geeigneten Speicher durchaus attraktiv sein kann. Konzentrierende Solarthermie kann bis zu 300°C Wärme liefern, wenn genug Solareinstrahlung gegeben ist. In der Schweiz gibt es bereits erfolgreich

7 European Commission, Directorate-General for Energy, METIS 3, study S5 – The impact of industry transition on a CO₂-neutral European energy system, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/094502>

eingesetzte Solarprozesswärmeanlagen, die bis 180°C Wärme liefern. Diese Technologie wird in Kombination mit anderen Methoden zur Wärmebereitstellung eingesetzt und ist besonders attraktiv, wenn die Wärme gespeichert werden kann.

Wärme aus Geothermie zur industriellen Anwendung hat ebenfalls Potenzial, und mit Tiefengeothermie können sogar bis zu 200°C erreicht werden⁸. Dabei spielt auch hier der Standort und die vorhandene Geologie besonders entscheidend.

Die Elektrifizierung der Wärmeherzeugung durch den Einsatz von Wärmepumpen nimmt heutzutage stark zu. Ihr Einsatz wird durch Fortschritte von Hochtemperaturwärmepumpen bis zu 160-180°C weiter vorangetrieben. Die Herausforderung liegt hierbei in der Quellentemperatur, die für eine hohe Effizienz ebenfalls auf einem höheren Niveau sein muss und derzeit Gegenstand der Forschung ist. Für höhere Temperaturen kann die direkte Elektrifizierung eingebunden werden. Aktuell stehen verschiedene Möglichkeiten mit unterschiedlichen Reifegraden (TRL) zur Verfügung, wie z.B. die Widerstandserwärmung, die induktive Hochfrequenz- und die konduktive Erwärmung, die Dielektrische Hochfrequenzerwärmung sowie Infrarot-, Lichtbogen- und Plasma-Verfahren⁹.

Die Biomasse ist heutzutage ein weit verbreiteter Brennstoff und kann Temperaturen von 500°C bis 600°C erreichen. Biogas ist ebenfalls interessant als Brennstoff, welches aus der Vergärung von Biomasse gewonnen wird.

Um Temperaturen bis zu 1000°C zu erreichen können neben Strom auch erneuerbare Gase wie synthetisches Methan, Biogas und grüner Wasserstoff eingesetzt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es bis zu einer Temperatur von 200°C mehrere Alternativen für die Energieversorgung gibt. Oberhalb dieser Temperaturgrenze sind die nutzbaren Energieträger wie Biomasse und synthetische Gase wie Wasserstoff begrenzt. Deshalb ist es wichtig, diese wertvollen Energieträger dort sinnvoll einzusetzen, wo es keine anderen Möglichkeiten gibt. Liebrich¹⁰ hat versucht, die verschiedenen Anwendungen nach ihrer unwirtschaftlichen bis besten Eignung zu sortieren, die dadurch definiert ist, dass keine anderen Alternativen gefunden werden können (Abbildung 3). Anwendungen für Prozesswärme bei höheren Temperaturen sind sinnvoller als z.B. Anwendungen für Prozesswärme bei niedrigeren Temperaturen oder Raumwärme.

Bis zu 200°C gibt es viele Alternativen zu fossilen Brennstoffen, oberhalb dieser Temperatur sind die Alternativen begrenzt

8 Roadmap tiefe Geothermie für Deutschland, Fraunhofer-Gesellschaft und Helmholtz-Gemeinschaft, <https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf>

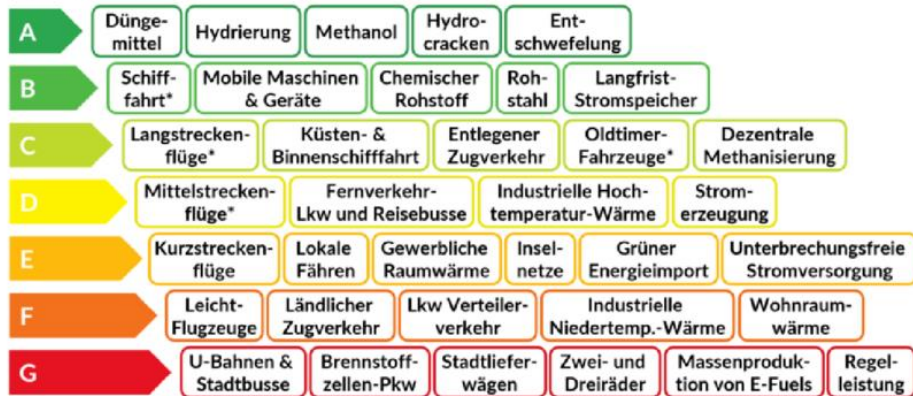
9 «Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System» Virtuelles Institut «Strom zu Gas und Wärme» Band II Pfadanalyse, 2018, <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2018/10/Virtuelles-Institut-SGW-Band-II-Pfadanalyse.pdf>

10 Hagedorn et al. (2021) in Anlehnung an Liebreich (2021). (CC BY 4.0, creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Schätzungen, nach Michael Liebreich, 2021)

Alternativlos



Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

© 2021 Hagedorn et al. (2021) & Liebreich (2021). Alle Rechte vorbehalten. Dieses Dokument ist eine Kopie des Originals. Es ist nicht für die Reproduktion oder Weiterverbreitung bestimmt.

Abbildung 3 Leiter der Einsatzbereiche grüner Wasserstoffs Quelle: Hagedorn et al. (2021) in Anlehnung an Liebreich (2021). (CC BY 4.0, creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Im Folgenden wird der Gesamtverbrauch an thermischer Energie im Zusammenhang mit der Temperaturverteilung in der Schweizer Industrie dargestellt. Diese Information ist wichtig, da wie erwähnt bereits heute Möglichkeiten bestehen, fossile Brennstoffe bis 200°C durch klimafreundliche Technologien zu ersetzen. Oberhalb von 200°C wird der Einsatz von Brennstoffen wahrscheinlich weiterhin notwendig sein. Daher ist von besonderem Interesse, wie hoch der Anteil des Energieverbrauchs über 200°C ist und in welchen Sektoren er anfällt.

4.2 Aktueller Wärmeverbrauch Industriesektor

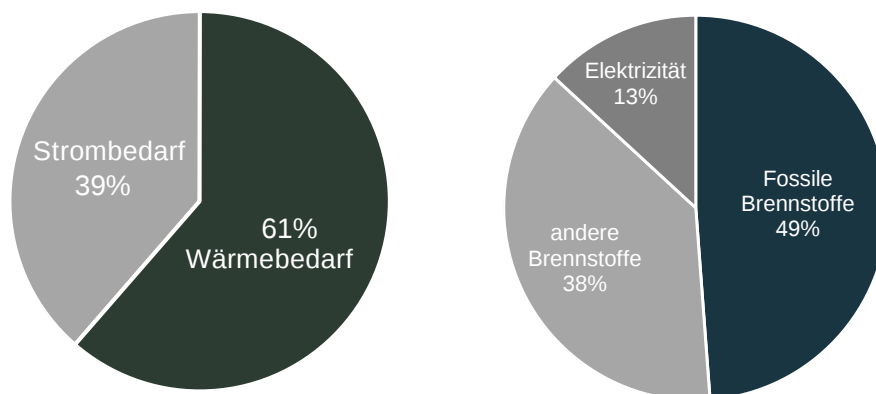


Abbildung 4 Gesamtenergieverbrauch¹¹ der Schweiz nach Strom- und Wärmebedarf (links) und Aufteilung nach Energieträger um den Wärmebedarf zu decken (rechts).

Der Gesamtenergieverbrauch der Schweizer Industrie liegt bei 41 TWh. Etwa 60% des Energieverbrauchs (26 TWh) in der Industrie wird für die Wärmeerstellung eingesetzt, wie in Abbildung 4 links dargestellt. Die Wärmeerstellung erfolgt derzeit vorwiegend durch den Einsatz fossiler Brennstoffe, wobei etwa 3 TWh aus Erdöl und 9 TWh aus Erdgas erzeugt werden¹¹ wie in Abbildung 4 rechts dargestellt. In der Annahme, dass alternative Brennstoffe wie Holz weiterhin in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen, müssten also 12 TWh an fossilen Brennstoffen ersetzt werden, um die Industrie zu dekarbonisieren. Eine detaillierte Analyse der Verbraucherstruktur nach Branchen ermöglicht es, gezielte Massnahmen in den Sektoren zu identifizieren, in denen der Ersatz fossiler Brennstoffe besonders relevant ist.

Aktuell 12 TWh
fossile Wärmever-
sorgung Schweizer
Industrie

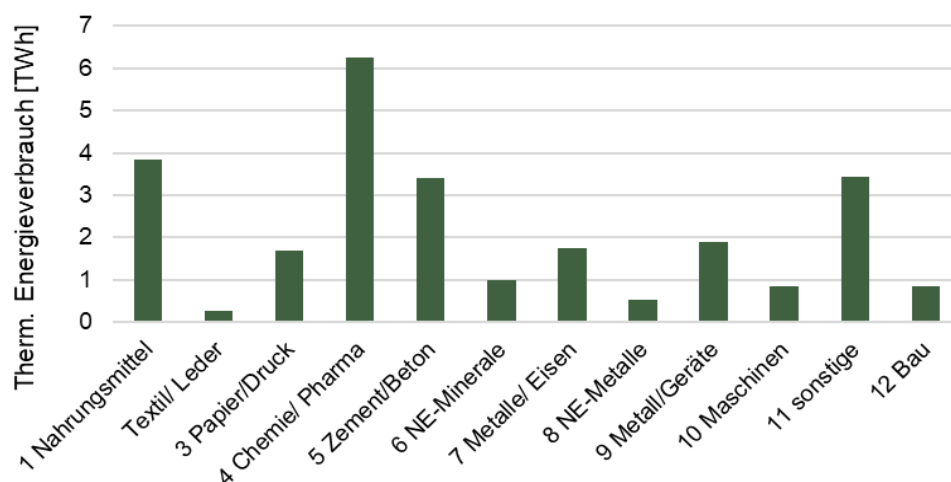


Abbildung 5 Energieverbrauch für die industrielle Prozesswärme nach Branche¹¹

¹¹ Bundesamt für Energie BFE, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2022 nach Verwendungszwecken

Der Energieverbrauch für die Bereitstellung der industriellen Prozesswärme nach Branche wird in Abbildung 5 dargestellt¹¹. Die Datentabelle zur Abbildung findet sich im Anhang A3. Es fällt auf, dass neben der Nahrungsmittelindustrie vor allem energieintensive Branchen wie die Chemie- und Pharmaindustrie, die Zementindustrie sowie die Metall-, Eisen- und Geräteindustrie erwartungsgemäss den höchsten Verbrauch aufweisen. In den energieintensiven Branchen verbrauchen Prozesse, wie das Schmelzen, Sintern, Trocknen von Materialien und das Beheizen grosser Öfen, alle erhebliche Mengen an Energie, die in der Regel in Form von Wärme bereitgestellt wird. Die Höhe Prozesswärmebedarfs allein reicht jedoch nicht aus, um etwas über das Dekarbonisierungspotenzial der Branche zu sagen; es ist notwendig, die verwendeten Energieträger zu betrachten.

Die Branchen mit dem höchsten Wärmebedarf sind die pharmazeutische/chemische Industrie, Nahrungsmittelindustrie und Beton/Zementindustrie.

In der Abbildung 6 werden die eingesetzten Energieträger für die Wärmebereitstellung dargestellt (Wärme insgesamt, inkl. Raumwärme). Die Datentabelle zur Abbildung findet sich im Anhang A3. Alle Branchen greifen auf fossile Brennstoffe zurück. Absolut betrachtet ist der Verbrauch fossiler Brennstoffe in den Sektoren Nahrungsmittel, Chemie/Pharma, Zement/Beton und Metall/Geräte am höchsten. In der Nahrungsmittelbranche macht der Anteil fossiler Brennstoffe mehr als 70% am Gesamtenergieträger aus, während er in den Branchen Chemie und Zement nur noch bei etwa 40% liegt. Hierbei spielen auch andere Brennstoffe wie Industrieabfälle eine bedeutende Rolle. In den Branchen nicht eisenhaltige (NE) Minerale, Metalle/Eisen, NE-Metalle und Metallgeräte ist der absolute Verbrauch fossiler Brennstoffe im Vergleich zu den zuvor genannten Sektoren zwar niedriger, jedoch tragen sie dennoch einen erheblichen Anteil von 60% bis 80% am Energieträgermix der jeweiligen Branchen bei.

Der Sektor Nahrungsmittel hat den höchsten Verbrauch von fossilen Brennstoffen, gefolgt von Pharma/Chemie und Zement/Beton.

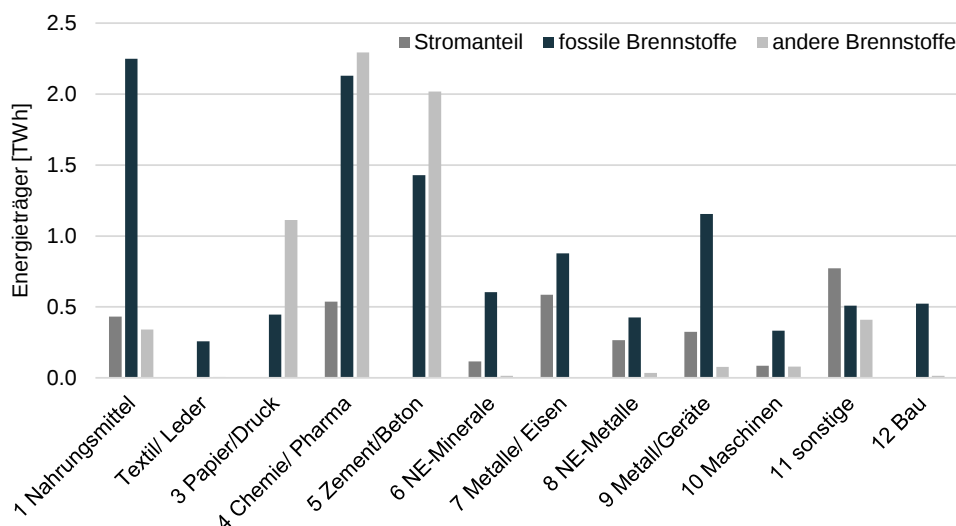


Abbildung 6 Anteiliger Verbrauch von Energieträgern für die Wärmebereitstellung in den schweizerischen Industriebranchen ¹²

Der Pfad zur Dekarbonisierung muss branchenspezifisch definiert werden, da jeder Industriesektor unterschiedliche Anforderungen hat. Die zentrale

¹² Bundesamt für Energie BFE, Endenergieverbrauch Industrie und Dienstleistung in den Jahren 1999 bis 2022

Frage bei der Dekarbonisierung lautet: Wie kann man fossile Brennstoffe durch alternative Technologien ersetzen, oder müssen klimafreundliche Brennstoffe eingesetzt werden, falls Alternativen ungeeignet sind? Um diese Frage zu beantworten, ist es entscheidend, die Temperaturverteilung in den verschiedenen Branchen zu untersuchen.

Wärmebedarf nach Temperatur

Die Aufteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturen zeigt, dass jeder Industriesektor eine spezifische Temperaturaufteilung aufweist, bedingt durch seine industriespezifischen Prozesse und Anforderungen. Die Temperaturverteilung wurde in Niedertemperatur ($<100^{\circ}\text{C}$), Mitteltemperatur (100°C - 500°C) und Hochtemperaturbereich ($>500^{\circ}\text{C}$) unterteilt, basierend auf der Temperaturbetrachtung der zugrunde liegenden Studien (siehe Kapitel 2). Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse aus den Studien in Form von Boxplots¹³.

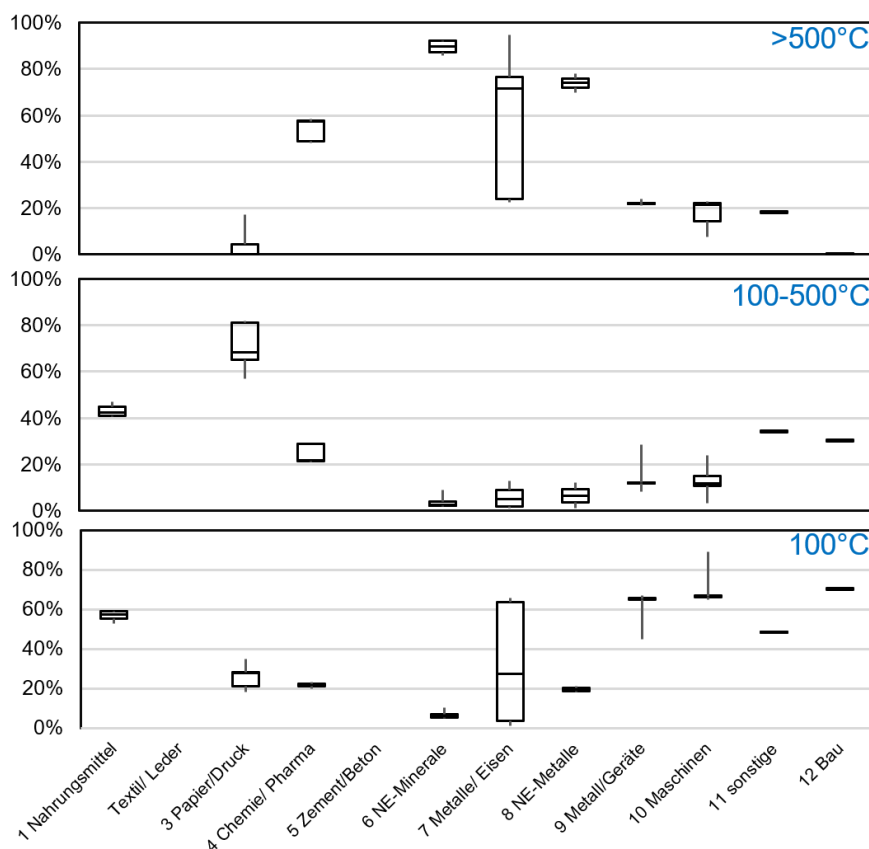


Abbildung 7 Darstellung der Einteilung des Wärmebedarfs in Temperaturbereiche in jeder Industriebranche.

Die erste Erkenntnis ist, dass nicht alle Daten pro Branche zusammenfallen, was darauf hinweist, dass die Literatur sich nicht gegenseitig referenziert. Gleichzeitig bedeutet die Spreizung, dass ohne Messungen keine eindeutige Zuordnung möglich ist und eine gewisse Unsicherheit besteht. Doch ist für

13 Exkurs: Wie liest man Boxplots?

Die Box definiert den Bereich, in dem die mittleren 50% aller Werte fallen. Das untere Ende der Box repräsentiert das erste Quartil, während das obere Ende das dritte Quartil darstellt. Daher befinden sich 25% der Daten unterhalb von Q1 und 25% über Q3. Innerhalb der Box liegen 50% deiner Daten.

fast alle Branchen die Spreizung recht schmal und somit in guter Übereinstimmung. Einzige Ausnahme ist die Branche Metall/Eisen, bei der Hochtemperaturprozesse wie Hochöfen in manchen Referenzen mitgezählt werden und in anderen nicht.

Die ermittelten Temperatúraufteilungen aus Abbildung 7 wurden durch Experteninterviews validiert und angepasst und anschliessend auf die Wärmebedarfsdaten der Schweizer Industrie aus Abbildung 5 übertragen. Die resultierende Aufteilung des Wärmebedarfs in die drei Temperaturbereiche pro Branche ist Abbildung 8 dargestellt. Die Datentabelle zur Abbildung findet sich im Anhang A3. Die Nahrungsindustrie weist den zweithöchsten Wärmebedarf auf, jedoch vor allem im Temperaturbereich, der nach Expertenaussagen 200°C nicht überschreitet. Hohe Temperaturen werden hauptsächlich in den energieintensiven Branchen benötigt, nämlich in den Sektoren Chemie/Pharma, Zement/Beton, NE-Mineralien, Metall/Eisen und NE-Metalle.

Temperaturverteilung Wärmebedarf in der Schweiz

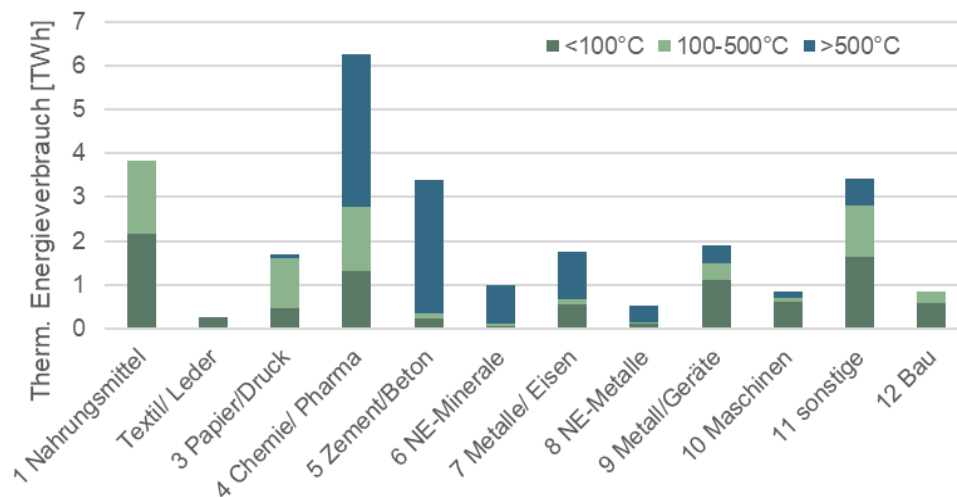


Abbildung 8 Aufteilung des Wärmebedarfs nach Temperaturniveaus in der Schweizer Industrie

Im Bereich der Chemie und Pharma werden unter anderem hohe Temperaturen in Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) erzeugt. Bei dieser Methode erfolgt die Verbrennung von Erdgas (60%) und Sondermüll (40%) bei 1000°C, um Dampf für die Stromerzeugung zu erzeugen. Die dabei erzeugte Abwärme wird dann den chemischen Prozessen zugeführt, die Temperaturen unter 200°C erfordern. Grosse Unternehmen haben eigene Anlagen für die WKK und eigene Kesselhäuser. Kleinere Unternehmen hingegen nutzen die erzeugte Wärme bis 200°C.

Der Hochtemperaturverbrauch in den Branchen NE-Metall und Metall/Geräte wurde nach unten korrigiert, um dem spezifischen Kontext der Schweiz gerecht zu werden. Dies resultiert daraus, dass in den betrachteten europäischen Studien Hochöfen und Aluminiumschmelzen berücksichtigt wurden, welche Temperaturen von über 1000°C erfordern. In der Metall und NE-Metall Branche brauchen Stahlwerke, Aluminiumwerken, Zinkereien Temperaturen um die 1000°C. In Stahlwerke werden jedoch zum grösstenteils Elektrolichtöfen eingesetzt um den Metallschrott zu schmelzen, welches abgossen wird und gekühlt wird. Nach dem Abkühlen kommen die Metalle in das Walzwerk, die mit Erdgas zwischen 700°C bis 1300°C beheizt werden.

In der Metall und NE-Metall Branche brauchen Stahlwerke, Aluminiumwerken, Zinkereien Temperaturen um die 1000°C.

Diese Öfen sind bereits «H2-ready», was besagt, dass sie für eine zukünftige Umstellung auf Wasserstoff als Brennstoff umgerüstet sind und einfach umgestellt werden können. Experten bestätigten in den Interviews, dass der Anteil für Hochtemperaturen über 500°C im Bereich Metall/ Geräte vernachlässigbar klein ist.

Für die weitere Betrachtung werden die verschiedenen Industriebranchen in drei Gruppen unterteilt, wobei die Einteilung auf der Grundlage der jeweils höchsten erforderlichen Temperatur erfolgt. Der thermische Energieverbrauch der Industriegruppen ist in Abbildung 9 und der dazugehörige Energiemix in Abbildung 10 dargestellt.

Die Gruppe der Niedertemperaturen (NT) umfasst die Industriezweige, deren Prozesse vor allem Temperaturen um 100°C erfordern. Zu dieser Gruppe gehören: Lebensmittel-, Textil-/Leder- und Papier-/Druckindustrie (NOGA 1-3). Heutzutage heizen viele Unternehmen in dieser Gruppe mit zu hohen Temperaturen auf der Versorgungsebene und erzeugen Dampf, aber der tatsächliche Temperaturbedarf der meisten Prozesse liegt meist um oder unter 100°C, d.h. der Dampf wird oft abgekühlt. Immer mehr Unternehmen erkennen, dass, wenn sie das Versorgungssystem auf niedrigere Temperaturen umstellen und ggf. hohe Temperaturen für einzelne spezifische Prozesse erzeugen, dies zu einem wesentlich effizienteren System führt, das z.B. mit Wärmepumpen klimafreundlich betrieben werden kann. Laut Experteninterviews besteht in dieser Gruppe noch viel Potenzial für Energieeinsparungen durch Effizienzmassnahmen und Betriebsoptimierungen.

Aufteilung in Industriegruppen, je nach dem maximalen Temperaturbereich

Niedertemperaturgruppe hat noch viel Potenzial für Energieeinsparungen durch Effizienzmassnahmen und Betriebsoptimierungen.

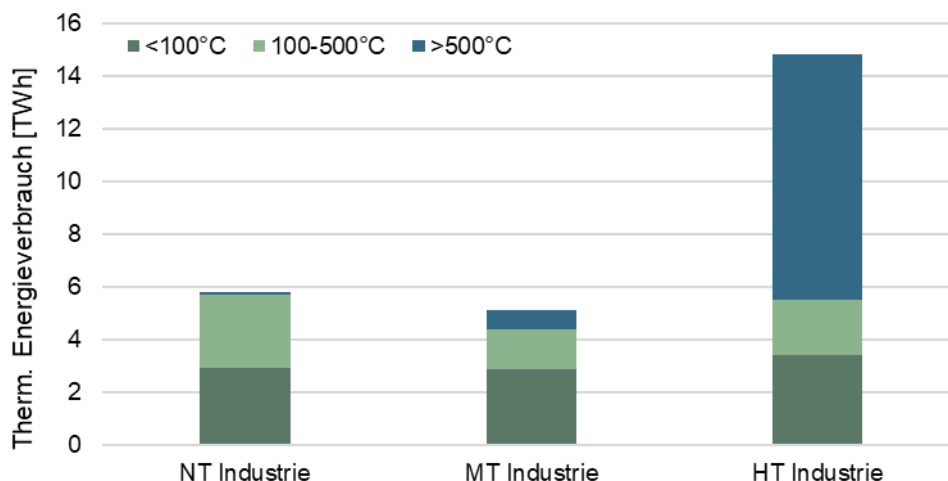


Abbildung 9 Darstellung der Temperaturverteilung in den Industriegruppen: Niedertemperatur NT: Nahrungsmittel, Mitteltemperatur und Hochtemperatur

Die Hochtemperaturgruppe (HT) umfasst die energieintensiven Industrien: Chemie/Pharma, Zement, Mineralien, Nichteisenmetalle, Metalle und teilweise auch die Metall- und Geräteindustrie (NOGA 4-8). Die Industrien dieser Gruppe benötigen Prozesstemperaturen von über 500°C. Die Gruppe weist den höchsten thermischen Energieverbrauch und den höchsten fossilen Brennstoffverbrauch aus. In dieser Gruppe sind die Energiekosten von entscheidender Bedeutung, z. B. schlägt sich im Metallsektor etwa ein Drittel der Energiekosten im Produkt nieder, was ein Vielfaches der Kosten in der

Hochtemperaturgruppe hat den höchsten Energieverbrauch

NT-Gruppe ist. Die Unternehmen dieser HT Gruppe sind sich daher ihres Energieverbrauchs typischerweise bewusst und haben oft bereits umfangreiche Effizienzmassnahmen durchgeführt, um wettbewerbsfähig zu sein. Insbesondere werden die Produkte überwiegend exportiert, so dass sie unter starkem Wettbewerbsdruck aus dem Ausland stehen. Hier wird von den Experten kein grosses Potenzial an Energieeinsparungen durch Effizienzmassnahmen gesehen. Für die Dekarbonisierung könnte ein Teil des thermischen Energieverbrauchs elektrifiziert werden. Doch laut Aussage der Branchenverbände setzen viele Unternehmen statt dessen auf klimafreundliche Brennstoffe, um die bestehenden Anlagen weiter nutzen zu können.

Die restlichen Industriebranchen werden in der Mitteltemperaturgruppe (MT) zusammengefasst. Diese Gruppe ist sehr heterogen und umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Branchen mit verschiedenen Anforderungen an die Temperatur.

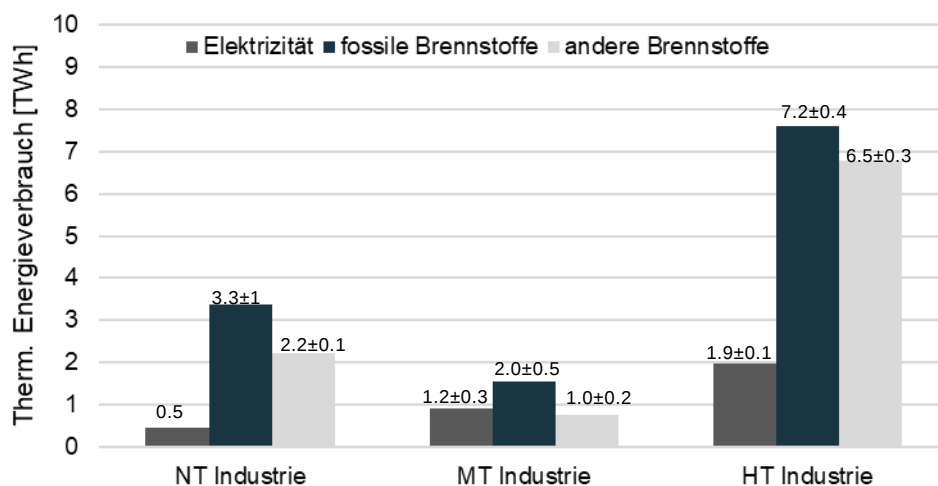


Abbildung 10 Verteilung der Energieträger für die Wärmebereitstellung durch Aufteilung der Branchen nach Bedarf an primär Temperaturbereich in den Industriegruppen: Niedertemperatur NT, Mitteltemperatur MT und Hochtemperatur

Zusammenfassend könnte die NT-Gruppe bereits mit vorhandenen klimafreundlichen Technologien für Prozesswärme dekarbonisiert werden, insbesondere wenn die Unternehmen in dieser Gruppe die Temperatur auf Versorgungsebene an die tatsächliche Prozesstemperaturanforderung senken würden.

Herausfordernder gestaltet sich die Dekarbonisierung der HT-Gruppe, die höhere Prozesstemperaturen benötigt. Hier werden wahrscheinlich alternative Brennstoffe erforderlich sein, um die fossilen Brennstoffe zu ersetzen. Dies ist auch die Gruppe mit dem höchsten Verbrauch an fossilen Brennstoffen, der derzeit bei etwa 7 TWh liegt und in Zukunft ersetzt werden muss. Wird der Bedarf an fossilen Brennstoffen aus der MT-Gruppe hinzugerechnet, summiert sich der Bedarf auf 9 TWh.

Niedertemperaturgruppe kann durch Alternativen Technologien dekarbonisiert werden, die Hochtemperaturgruppe ist auf alternative Brennstoffe angewiesen.

5. Fallbeispiele

Ziel der Fallbeispiele war es, eine Übersicht für die Anwendung von grünem Wasserstoff als Brennstoff oder Prozessgas in der Schweizer Industrie und im benachbarten Ausland zusammenzustellen.

Eine Herausforderung bei der Suche nach Fallbeispielen bestand darin, dass es in der Schweiz bisher keine konkreten Anwendungen gibt, bei denen grüner Wasserstoff speziell für industrielle Anwendungen hergestellt und genutzt wird. Es gibt ein paar Beispiele für die Produktion und den Einsatz von grünem Wasserstoff, doch sind sie meist für den Einsatz im Transportsektor und für Lastwagen. Wir präsentieren hier die unserer Ansicht nach vier relevanten Beispiele von geplanten und umgesetzten Projekten.

Betreiber	Einsatz / Temperatur	Bisheriger Energieträger
V-ZUG	Emaillierungsöfen (800-900°C)	Erdgas
Käppeli Strassen- und Tiefbau AG	Herstellung Strassenbelag (200°C)	Erdöl und Erdgas
WUN H ₂ GmbH	Keramik-, Glas-, Textil- & Plastikindustrie (Temp. unbekannt) / Mobilität	Keiner (Neuer Energiepark)
H ₂ bois SA	Prozessgas in lokalen Industrien / Mobilität	Grauer Wasserstoff

Tabelle 3: Übersicht Fallbeispiele

Die Übersicht in der Tabelle 3 zeigt, dass die in den Fallbeispielen genannten Branchen mit den Einschätzungen dieser Studie bezüglich des Potenzials für grünen Wasserstoff in den Hochtemperatur- und Mitteltemperatur Industriegruppen übereinstimmen. Dies trifft insbesondere auf die Metallverarbeitung (V-ZUG), NE-Minerale, die chemische Industrie (WUN H₂ GmbH) und das Baugewerbe (Käppeli Strassenbau) zu, wobei letzteres in dieser Studie der Mitteltemperatur-Industriegruppe zugeordnet wird.

Die Fallbeispiele zeigen auch, dass Industrien mit Prozessen unter 200°C, wie z.B. die Textilindustrie, von den Möglichkeiten profitieren können, die sich durch die Bereitstellung von Wasserstoff als Energieträger eröffnen.

Die genannten Fallbeispiele befinden sich allerdings noch in der Phase kostenintensiver Demonstrationsprojekte, die auf eine wirtschaftliche Reproduzierbarkeit hinarbeiten müssen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der sich aus den Fallstudien ableiten lässt, ist die Bedeutung des Zusammenschlusses verschiedener Akteure. Sowohl Produzenten als auch Konsumenten sind in diesen Fällen beteiligt. Insbesondere die WUN H₂ GmbH zeigt, wie ein Energiepark gestaltet sein könnte und unterstreicht die Bedeutung des Austausches und der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren in der Zukunft.

Fallbeispiele zeigen Anwendungen in allen Industriegruppen.

5.1 Fallbeispiel 1: Emaillierungsanlage VZUG

Einsatz Emaillierungsöfen



Branche	Verarbeitendes Gewerbe / Herstellung von Waren, Grosshandel, Erbringung von sonstigen Dienstleis- tungen	Standort	Zug
Betreiber	V-ZUG	Geplante Inbetrieb- nahme	Anfang 2025



[2]

Beschreibung	Der Verein zur Dekarbonisierung der Industrie plant in Zug eine Demonstrationsanlage zur Herstellung von Wasserstoff aus (importiertem) Methan, die sogenannte Methan-Pyrolyse. Das Verfahren wurde an der EMPA entwickelt und soll nun in der Industrie eingesetzt werden. Der erzeugte Wasserstoff soll das Erdgas in den Emaillierungsöfen der V-ZUG ersetzen. Zusätzlich dient die Anlage den Vereinsmitgliedern als Testobjekt für Abklärungen zur Dekarbonisierung ihrer Anwendungen. Der bei der Pyrolyse anfallende feste Kohlenstoff findet Anwendungen in der Baubranche und in der Landwirtschaft. [1], [3]
Industrieller Prozess	Beim Emaillieren werden die Ausgangsstoffe gemeinsam mit Farboxiden fein gemahlen und anschliessend bei hohen Temperaturen geschmolzen. Nach weiteren Zwischenschritten wird der Grundemail durch Tauchen oder Spritzen auf die Oberfläche appliziert und bei einer Temperatur von 850°C bis 900 °C eingebrannt. Anschliessend werden Deckemailschichten aufgetragen und ebenfalls bei Temperaturen zwischen 800°C und 850 °C eingebrannt. [4]
Leistung	Pyrolyse: 330 kW (2 Module, die pro Stunde je 5 kg Wasserstoff herstellen) Brennerleistung: 1'100 kW zur Initialisierung, 600 – 700 kW im Normbetrieb

Investitionskosten	Entwicklung und Forschung, Anlagen und Bau: CHF 17 Mio. [2]	Betriebskosten	Betrieb von 2024 - 2030: CHF 14 Mio. [2]
Finanzierungsmodell	Die Kosten sollen zu $\frac{3}{4}$ aus dem Verkauf des H ₂ und dem Restwert per Ende 2030 gedeckt werden. $\frac{1}{4}$ der Kosten wird durch die Förderpartner übernommen. Zu den Förderpartnern gehören: TCZ / V-ZUG, Empa, WWZ, Plustherm, Kanton Zug, AVAG, ABB Turbo Systems, Amag, Partners Group, Siemens, VZ Depotbank. Die Trägerschaft ist im «Verein zur Dekarbonisierung der Industrie» organisiert [2]. Ausserdem generiert der Verkauf des festen Kohlenstoffs Erlöse. Zur Zeit wird auch geprüft, ob CO ₂ -Zertifikate für die Einsparungen generiert werden können.		
Herkunft H₂	Eigene pyrolytische Erzeugung aus Erdgas	Logistik und Transport	Der Wasserstoff wird direkt auf dem Gelände erzeugt. Das Methan wird angeliefert. In einer Übergangsphase wird Erdgas verwendet.
Quellen	[1] Eine Industrie ohne CO₂-Emissionen im Visier, EMPA, 2022. https://www.sciena.ch/de/research/aiming-at-an-industry-without-co2-emissions.html [2] Zuger Initiative zur Dekarbonisierung der Industrie, 2022. https://kr-ge-schaeften.zug.ch/dokumente/10869/3417-3-17049_Beilage2-Papier.pdf [3] Wasserstoff zur Dekarbonisierung der Industrie, EMPA, 2022. https://www.energiebuendel.li/application/files/7616/7704/8569/Wasserstoff_zur_Dekarbonisierung_der_Industrie.pdf [4] Email, Wikipedia, 2023. https://de.wikipedia.org/wiki/Email		

5.2 Fallbeispiel 2: Belags- und Strassenbau

Herstellung von Strassenbelag



Branche	Strassen- und Tiefbau	Standort	Seewen
Betreiber	Käppeli Strassen- und Tiefbau AG	Geplante Inbetriebnahme	Noch nicht bekannt



[2]

Beschreibung	Die Käppeli Strassen- und Tiefbau AG plant zusammen mit dem lokalen Energieversorger (ebs) und der IWB aus Basel eine Elektrolyseanlage zur Herstellung von Wasserstoff inklusive Speicher. Der erzeugte Wasserstoff soll einerseits das Erdgas im Belagswerk ersetzen, andererseits für Mobilitätsanwendungen zur Verfügung stehen. Anstoss für das Projekt gab der Energieversorger ebs, der eine Anwendung für den Strom aus Laufwasserkraft im Sommer suchte. Der Strassenbau ist dafür besonders geeignet, da der Betrieb wetterbedingt im Winter pausiert.		
Industrieller Prozess	Für die Herstellung des Strassenbelags wird Kies durch eine Trommel geführt, die mittels Flamme erhitzt wird. Der Kies erreicht Ende des Aufwärmprozesses eine Temperatur von ca. 200 °C. Bei den Brennern handelt es sich meist um Zweistoffanlagen (Erdöl und Erdgas). Der Prozess kann entweder über Verwendung Wasserstoff dekarbonisiert werden, oder durch die Verwendung von Holzstaub, wie es das Belagswerk Oberland seit diesem Jahr tut [2]. Eine Möglichkeit, elektrisch zu dekarbonisieren ist nicht bekannt.		
Leistung	Für den neuen Brenner im Belagswerk ist eine Leistung von 20 MW vorgesehen. Pro Stunde werden ca. 500 kg Wasserstoff benötigt.		
Investitionskosten	Nicht bekannt	Betriebskosten	Nicht bekannt

Finanzierungsmodell	Die Kosten werden von der Käppeli Strassen- und Tiefbau AG sowie dem Energieversorger getragen. Insbesondere die Anwendung für die Mobilität soll das Projekt rentabel machen. Ausserdem wird geprüft, ob CO ₂ -Zertifikate das Projekt unterstützen können.		
Herkunft H2	Eigene elektrolytische Erzeugung.	Logistik und Transport	Der Wasserstoff wird direkt auf dem Gelände erzeugt.
Quellen	[1] Gespräch Lukas Käppeli, Käppeli Strassen- und Tiefbau AG, 2023 [2] Belagswerk in Wimmis, Berner Oberländer, 2023. https://www.berneroberlander.ch/belagswerk-in-wimmis-neue-anlage-mit-45-meter-turm-801356385544		

5.3 Fallbeispiel 3: Wunsiedel

Energiepark Wunsiedel



Branche	Verarbeitende Industrie	Standort	Wunsiedel (Bayern), Deutschland
Betreiber	WUN H2 GmbH	Inbetriebnahme	September 2022



[3]

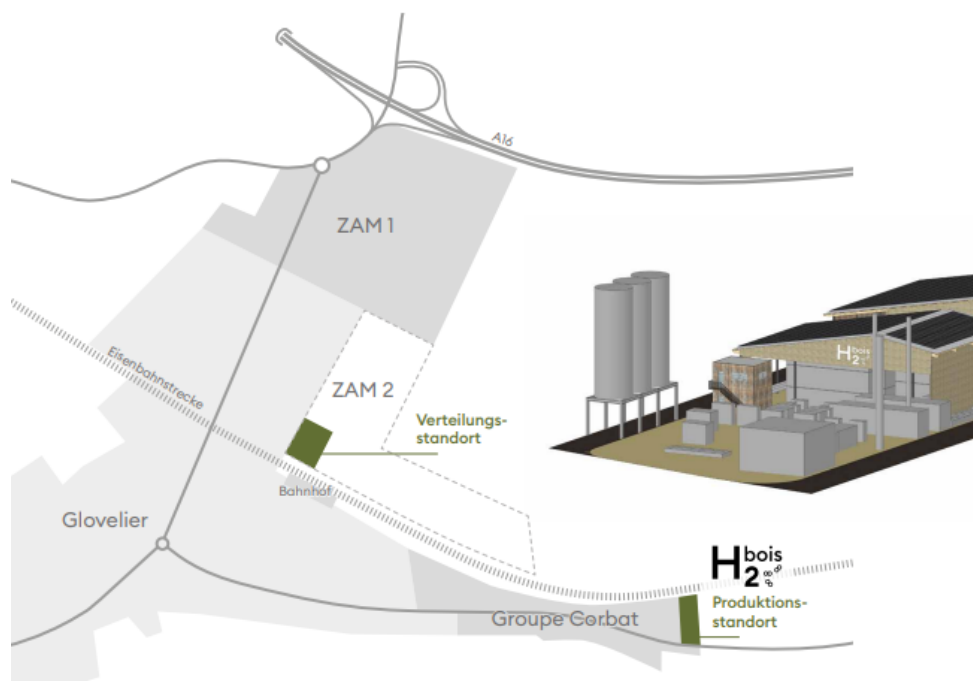
Beschreibung	Die WUN H2 GmbH wurde 2021 als Joint Venture von Riessner-Gase GmbH, Siemens Project Ventures GmbH und den Stadtwerken Wunsiedel gegründet. Der <i>Energiepark Wunsiedel</i> wurde von der Region vorangetrieben, um sich als attraktiver grüner Wirtschaftsstandort zu positionieren. Auf dem Gelände wird Wasserstoff erzeugt, der Strom stammt aus dem Netz (Bezug Wind- und Solarenergie) sowie einer Holzverstromungsanlage. Die bei der Wasserstoffproduktion entstehende Abwärme wird für die Holz Trocknung sowie in einem Nahwärmenetz in Wunsiedel genutzt. Der produzierte Wasserstoff wird von der Forschung sowie von Unternehmen in der Keramik-, Glas-, Textil- und Plastikindustrie abgenommen. Der Transport des Wasserstoffs stellt eine Herausforderung dar; alle drei Stunden transportiert ein LKW den Wasserstoff ab. Aktuell werden auch Projekte im Bereich Wasserstoff-Pipeline diskutiert. Künftig soll der Wasserstoff über eine Tankstelle auch der Mobilität zur Verfügung stehen.
Industrieller Prozess	Je nach Abnehmer unterschiedlich.
Leistung	PEM-Elektrolyse: 8.75 MW. Produziert bis zu 1'300t H ₂ im Jahr (im Vollastbetrieb); aktuell ca. 900t H ₂ im Jahr. Durch den modularen Aufbau ist eine Erweiterung auf bis zu 2'700t H ₂ im Jahr möglich.

Zusätzlich wurde ein Batteriespeicher von 8.4 MW installiert.			
Investitionskosten	EUR 20 Mio. 0.84 EUR / kg	Betriebskosten	3.92 EUR / kg ¹⁴
Finanzierungsmodell	Unbekannt		
Herkunft H₂	PEM-Elektrolyse, Strom aus dem Netz (PV, Wind) und Holzverstromung	Logistik und Transport	Abtransport über LKW
Quellen	[1] Grüner Wasserstoff «made in Wunsiedel» spart 98 Prozent CO₂ ein, Siemens, 2021. https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d124dfba-ad9c-4c68-9e68-dcae18f22893/20210323-siemens-referenz-wunsiedel.pdf [2] Wasserstoff-Modellregion Fichtelgebirge, Landratsamt Wunsiedel i. Fichtelgebirge, 2022. https://www.hy.land/wp-content/uploads/2022/02/2022-02-24-HyLunch-WUN_compressed.pdf [3] Grüner Wasserstoff in Wunsiedel in Betrieb genommen: Wir finanzieren das Leuchtturmprojekt, UmweltBank, 2023. https://www.umweltbank.de/aktuelles/news/newsmeldungen/gruener-wasserstoff-in-wunsiedel-in-betrieb-genommen		

14 5 MW PEM-Elektrolyse, 1000 €/kW, 5000 VLS, 0 % EEG-Umlage für Elektrolyse

5.4 Fallbeispiel 4: H₂ Bois

H2Bois			
Branche	Holzverarbeitung	Standort	Jura
Betreiber	H ₂ bois SA (Groupe Corbat)	Geplante Inbetriebnahme	2025



Beschreibung	Der Wasserstoff wird mittels Thermolyse aus Holz gewonnen. Der Wasserstoff soll als Prozessgas in bereits bestehenden lokalen Industrien verwendet werden (bisher grauer Wasserstoff) sowie der privaten und öffentlichen Mobilität dienen. Die durch die Thermolyse entstehende Pflanzenkohle (2'500 t p.a.) soll in der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie abgesetzt werden. Der Energiebedarf soll durch Holzverstromung gedeckt werden (14'000t p.a.).		
Industrieller Prozess	Die Prozesse der ansässigen Industrie sind unbekannt.		
Leistung	450 t H ₂ p.a.		
Investitionskosten	Unbekannt	Betriebskosten	Unbekannt
Finanzierungsmodell	Unbekannt		
Herkunft H₂	Thermolyse von Holz auf dem Gelände (Hynoca® von Haffner Energy)	Logistik und Transport	Der Wasserstoff soll über Niederdruck-Pipelines in die nahegelegene Industrie verteilt werden (ca. 1km lang)
Quellen	https://www.h2holz.ch/files/1856/09-HOLZWASSERSTOFF-V02-PP.pdf		

6. Künftiger H₂-Bedarf als Brennstoff für Prozesswärme

In dieser Studie wurden die Annahmen der Energieperspektive 2050+¹⁵ als Referenz für die künftige Effizienzentwicklung verwendet. Darin wird angenommen, dass die Struktur der Schweizer Industrie weitgehend unverändert bleibt. Es wird also keine wesentliche Zu- oder Abwanderung angenommen.

2050 Reduktion
des Prozesswär-
mebedarfs von
25% angenommen

Laut EP2050+ sinkt der Prozesswärmebedarf von 23 TWh auf 17 TWh bis 2050, d.h. es ist für netto null ein Gesamtrückgang des Wärmeenergieverbrauchs von 25% nötig. Diese Zahl kann höher ausfallen, wenn in der Schweiz noch stärker die Energieeffizienz verfolgt wird, als dies im EP2050+ vorgesehen ist.

In Interviews wurden Experten um eine Einschätzung gebeten, für wie realistisch sie einen Rückgang des Wärmeenergieverbrauchs von 25% halten. Es ergaben sich folgende Einschätzungen:

- 1) Die meisten Befragten halten diese Annahme als umsetzbar, da sie weiteres Potenzial für Energieeffizienzmassnahmen sehen. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass in Branchen mit einem hohen Energiepreisanteil bereits viele Effizienzmassnahmen umgesetzt wurden, um die Kosten zu minimieren und wettbewerbsfähig zu bleiben. Ein Beispiel ist die Metallindustrie, welche einen hohen Exportanteil hat und in der der hohe Energiepreis ein Drittel der Produktionskosten ausmacht. Daher ist die effiziente Nutzung von Energie für diese Branche von grosser Bedeutung. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Niedertemperaturgruppe ein höheres Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz aufweist als die Hochtemperaturgruppe.
- 2) Durch Prozessoptimierung und Innovation, wie beispielsweise Fortschritte in der Verfahrenstechnik oder in der Pharmaindustrie, werden einige Einsparungen erwartet. Die dadurch erzielte Energiereduktion wird dennoch weder in dieser Studie noch in den EP2050+ berücksichtigt, da es aktuell schwierig ist, die Auswirkungen zu quantifizieren.
- 3) Es wurde von einem Experten darauf hingewiesen, dass die von EP2050+ abgeschätzte Effizienzsteigerung von minus 6 TWh sehr pessimistisch erscheint. Es sollten höhere Ziele angestrebt werden.

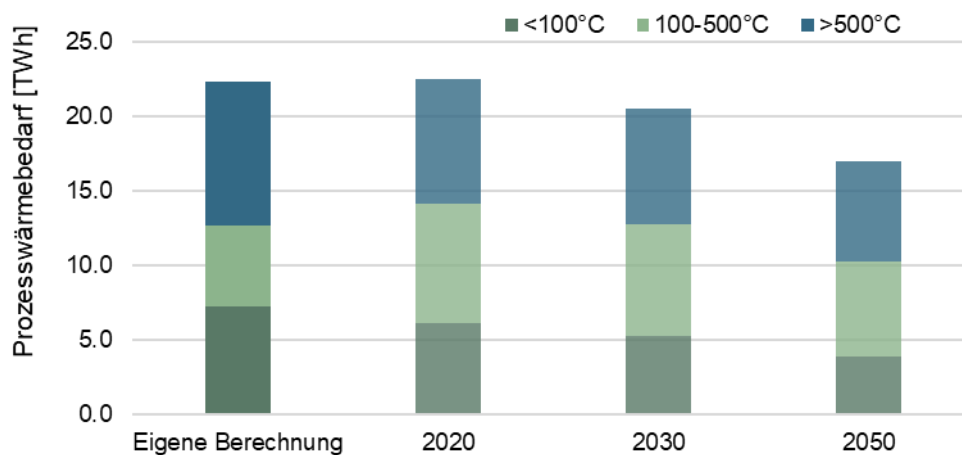


Abbildung 11 Heutiger Prozesswärmebedarf nach Industriegruppen und Entwicklung bis 2050 basierend auf den Energieperspektiven 2050+.

Abbildung 11 zeigt den Prozesswärmebedarf der gesamten Industrie, aufgeschlüsselt nach Temperaturbereichen und nicht nach Industriegruppe. Deshalb wurden die hier erarbeiteten Ergebnisse für den Vergleich auch in Temperaturgruppen aufgeteilt. Der linke Balken zeigt den heutigen Bedarf ohne Raumwärme und Warmwasser, die etwa 4 TWh ausmachen. Die drei rechten Balken basieren auf EP2050+ (ZERO Szenarien) für die Jahre 2020, 2030 und 2050. Die prognostizierte Reduktion des Energiebedarfs entspricht den Einsparungen bezogen auf 2020 durch Energieeffizienz, angefangen bei 9% Einsparung im Jahr 2030 zu 25% Einsparung bis 2050. Im Folgenden wird der Prozesswärmebedarf nicht wie in den Energieperspektiven2050+ nach Temperaturbereichen, sondern nach Industriegruppen (siehe 4.2)

6.1 Künftiger Bedarf an Wasserstoff

Im Folgenden wird der künftige Bedarf an Wasserstoff grob abgeschätzt. Dabei wird nicht das maximale Potenzial berechnet, wo Wasserstoff theoretisch eingesetzt werden könnte, sondern umgekehrt in welchem Umfang es kaum Alternativen gibt. Dazu wird der zukünftige Prozesswärmebedarf abgeschätzt, der bisherige Einsatz anderer Brennstoffe abgezogen und angenommen, dass die Niedertemperaturindustrie elektrifiziert werden kann (siehe Herleitung der Schritte auch in Abbildung 12).

Es wird das Potenzial 2050 berechnet indem es kaum Alternativen für die Wärmebereitstellung gibt.

Bedarf Prozesswärme: Als Grundlage zur Herleitung des künftigen Bedarfs an Wasserstoff dient der oben hergeleitete Bedarf an Prozesswärme 2050 von ca. 17 TWh (Annahmen: unveränderte Industriestruktur und Einsparungen in der Effizienz von 25% bis 2050). Wir wenden dabei die Reduktion auf die Niedertemperatur (NT), Mitteltemperatur (MT) und Hochtemperatur (HT) Industriegruppen an.

Abzug bisheriger andere Brennstoffe: Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Teil dieses Bedarfs bereits heute mit anderen Brennstoffen wie z.B. Biomasse und Abfällen gedeckt wird. Zur Abschätzung des künftigen Bedarfs an Wasserstoff wurde angenommen, dass diese alternativen Brennstoffe

Geschätzte 9.5 TWh noch fossil bereitgestellte Prozesswärme im Industriesektor 2050

auch weiter verfügbar sind und eingesetzt werden. Daraus resultiert künftig 9.5 TWh noch fossil bereitgestellter Prozesswärme, die es zu dekarbonisieren gilt.

Elektrifizierung Niedertemperatur: In einem nächsten Schritt werden die Niedertemperatur Industrien ausgeschlossen, da es in diesem Bereich effiziente Alternativen wie Wärmepumpen gibt und sich die Technologien weiterentwickeln. Wird der Bedarf der Niedertemperaturgruppe vollständig elektrifiziert, bleibt ein Restbedarf von etwa 7 TWh in den Industriegruppen Mitteltemperatur und Hochtemperatur übrig, der weiterhin fossile Brennstoffe für die Wärmebereitstellung erfordert. Hierbei ist noch nicht berücksichtigt, dass es auch in den MT- und HT-Gruppen Prozesse unter 200°C gibt, die elektrifiziert werden könnten. Aufgrund der fehlenden Datenbasis sind dazu derzeit leider keine Aussagen möglich. Die verbleibenden 7 TWh sind daher zu hoch geschätzt.

7 TWh fossil bereitgestellte Prozesswärme nach Elektrifizierung der Niedertemperatur

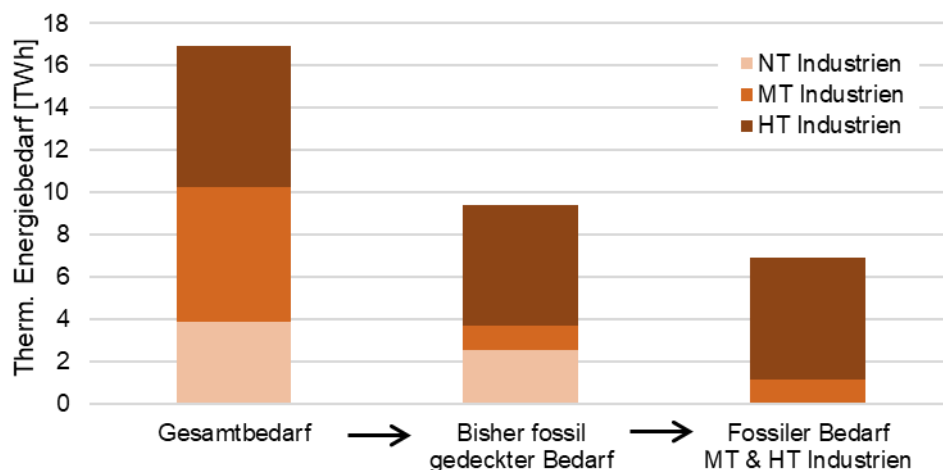


Abbildung 12 Geschätzter Bedarf an thermischer Energie 2050 (NT = Niedertemperatur, MT = Mitteltemperatur, HT = Hochtemperatur)

Zuletzt stellt sich die Frage, welcher Anteil der 7 TWh durch Wasserstoff gedeckt werden könnte. Die Antwort hängt von diversen Faktoren ab, wie bspw. der künftigen Verfügbarkeit und Preisen von Strom, Wasserstoff und anderen Brennstoffen wie Biomethan und Holz, dem elektrisch deckbaren Anteil des Bedarfs der MT- und HT-Industrien, den technologischen Entwicklungen oder der künftigen Wasserstoff-Transport-Infrastruktur. So sind beispielsweise von den 7 TWh fossil gedecktem Bedarf der MT und HT Industriegruppen heute 4 TWh von Gas (und nicht Heizöl) gedeckt. Für diese kann ein Anschluss an das bestehende Gasnetz angenommen werden. Abbildung 13 zeigt den möglichen Wasserstoffbedarf im Jahr 2050 in Abhängigkeit vom Anteil alternativer Brennstoffe zwischen 25 % und 75 %. Der Bedarf liegt bei diesen Annahmen zwischen 2 und 5 TWh.

Je nach Anteil alternativer Brennstoffe, der zwischen 25 % und 75 % variiert, entspricht der Wasserstoffbedarf einem Bereich von 2 bis 5 TWh.

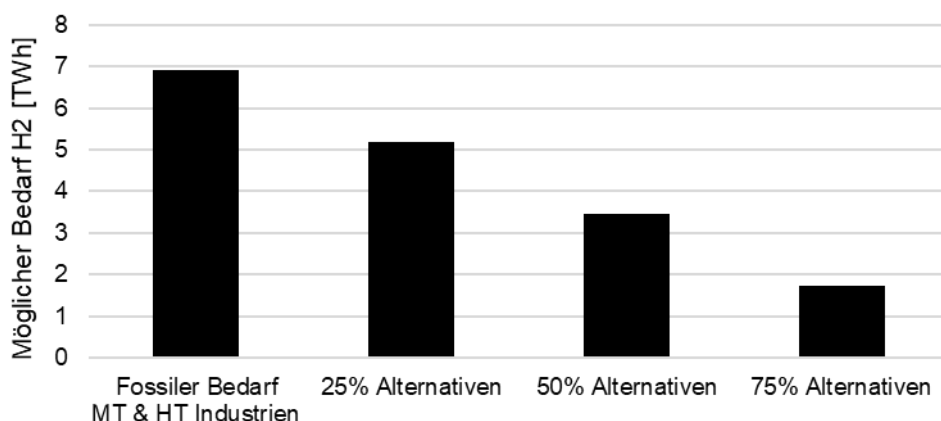


Abbildung 13: Möglicher Bedarf an Wasserstoff 2050 für die Industrie in Abhängigkeit vom Einsatz von alternativen Brennstoffen (Abfälle, Strom, Holz, Biomethan, etc.).

Wie oben erwähnt, gehen diese Abschätzungen davon aus, dass die Struktur der Schweizer Industrie weitgehend stabil bleibt. In den Interviews mit den Verbänden der energieintensiven Industrien äusserten diese die Befürchtung der Abwanderung von Unternehmen unter anderem aufgrund von hohen Energiepreisen.

Wie eingangs erwähnt, wurde im Rahmen dieser Studie nicht das maximale Potenzial an Wasserstoff abgeschätzt. Stattdessen wurde geschätzt, in welchen Bereichen so wenige Alternativen bestehen, dass der Einsatz von Wasserstoff stark im Vordergrund steht. Sollte also künftig Wasserstoff in grossen Mengen und günstig verfügbar sein, liegt das Potenzial höher als in Abbildung 13 skizziert. Die Arbeiten haben aber auch gezeigt, dass es heute auch Interesse an Wasserstoff von Unternehmen der Niedertemperaturgruppen gibt. Der geschätzte, heute noch fossil gedeckte, Bedarf an Prozesswärme 2050 dieser Niedertemperatur-Industrien liegt bei gut 2 TWh.

6.2 Einordnung mit Referenzszenarien

Wasserstoff spielt in den Energieperspektiven 2050+¹⁵ eine untergeordnete Rolle und wird lediglich im Szenario ZERO-B verstärkt berücksichtigt. Dort werden insgesamt 5 TWh grüner Wasserstoff im Jahr 2050 für Anwendungen wie Prozessgas, Stromerzeugung und im Verkehr betrachtet. In keiner der ZERO-Varianten wird Wasserstoff aufgrund der hohen Preise für Energieträger als Brennstoff in der Industrie verwendet. Die Kosten für importierten Wasserstoff werden auf etwa 20% höher als für importiertes Biogas, Biomethan und feste Biomasse geschätzt. Die Dekarbonisierung der Industrie erfolgt vorrangig durch Elektrifizierung sowie durch den Einsatz von Biomasse und Biogas.

Wasserstoff in der Energieperspektive 2050+ des BFE

Die Studie «Energiezukunft 2050»¹⁶ des Verbands Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE skizziert eine andere Energiezukunft mit einem viel stärkeren Fokus auf Wasserstoff. Insbesondere ab 2040 wird Wasserstoff zu

Energiezukunft 2050 vom VSE

¹⁵ Energieperspektiven2050+, BFE, 2020, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>

¹⁶ Energiezukunft 2050, VSE, 2022, <https://www.strom.ch/de/energiezukunft-2050/startseite>

einem wesentlichen Element der Schweizer Energieversorgung mit erwarteten Importmengen zwischen 13.5 bis 27 TWh im Jahr 2050. Die wichtigsten Anwendungsbereiche für Wasserstoff in den integrierten Szenarien sind die Stromerzeugung, gefolgt von der Mobilität und der Prozesswärme in der Industrie. Die genauen Mengen für den Einsatz von Wasserstoff in der Industrie werden nicht explizit genannt, aber die Studie schlägt verschiedene Optionen für die Dekarbonisierung vor: für Temperaturen unter 200°C Wärmepumpen und Fernwärme, zwischen 200-400°C Fernwärme und Holz und für Temperaturen über 400°C Strom, Wasserstoff, Abfall, Holz.

Im Auftrag des Verbandes der Schweizerischen Gasindustrie VSG und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE wurde eine Studie zu den Rahmenbedingungen für Wasserstoff in der Schweiz erstellt¹⁷. Insgesamt geht die Studie von einem Bedarf von bis zu 40 TWh Wasserstoff in der Schweiz aus und betrachtet den Einsatz von Wasserstoff in vier Szenarien. Wasserstoff wird in folgenden Anwendungsbereichen gesehen: Im Verkehr, als Prozessgas und Brennstoff in der Industrie, für die Gebäudeheizung indirekt über Fernwärme und im High-Szenario für die Stromerzeugung. Die Studie sieht in allen Szenarien ausser im Low-Szenario Wasserstoff als Brennstoff in der Industrie vor. Im Low-Szenario wird kein Wasserstoff für die Industrie benötigt, da die Hochtemperaturindustrie abwandert. Wärmepumpen, Geothermie und Solarthermie sollen Prozesswärme bis 200°C liefern. Bei Temperaturen über 200°C ist die direkte Elektrifizierung oder Nutzung von Wasserstoff vorgesehen. Die Studie berücksichtigt die Energiereduktion durch Energieeffizienz nicht. Der Prozesswärmebedarf wird auf ca. 5 TWh geschätzt.

Rahmenbedingungen für Wasserstoff in der Schweiz

17 «Rahmenbedingungen für Wasserstoff in der Schweiz» Polynomics, E-Bridge, EPFL im Auftrag vom VSG und VSE, 2023, <https://www.strom.ch/system/files/media/documents/20230914-rahmenbedingungen-wasserstoff-schweiz-schlussbericht.pdf>

7. Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, das Potenzial für den Einsatz von grünem Wasserstoff als Prozessgas und Brennstoff in der Schweizer Industrie zu ermitteln, mit dem Hauptziel, die Industrie zu dekarbonisieren. Die Ergebnisse deuten auf einen Gesamtbedarf zwischen 2.4 und 5.4 TWh (73'000 bis 163'000 Tonnen H₂) Wasserstoff bis 2050 hin.

	Total	Niedertemperaturgruppe (<200°C)	Mitteltemperaturgruppe (200°C-500°C)	Hochtemperaturgruppe (>500°C)
Energieverbrauch für Prozesswärme	17 TWh	7.3 TWh	5.4 TWh	9.7 TWh
Fossiler Brennstoff 2022	12.6 TWh	3.4 TWh	1.6 TWh	7.6 TWh
Fossiler Brennstoff 2050	9.4 TWh	2.5 TWh	1.18 TWh	5.70 TWh

Tabelle 4 Übersicht des aktuellen und des zukünftigen Energieverbrauchs für die Prozesswärmebereitstellung.

Wasserstoff als Prozessgas: Der Prozessgasbedarf an Wasserstoff in der Schweiz liegt aktuell bei rund 13'000 Tonnen oder 0.4 TWh. Im Vergleich zu den Nachbarländern ist der heutige Bedarf gering, da Metall recycelt wird und keine Hochöfen betrieben werden. Wasserstoff wird derzeit hauptsächlich in der Raffinerie Cressier eingesetzt. Die Experteninterviews bestätigen den aktuellen Bedarf in der pharmazeutischen, chemischen und metallverarbeitenden Industrie. Der künftige Bedarf wird in diesen Branchen als konstant angesehen, bei der Raffinerie eher abnehmend.

Keine Zunahme in der Prozessgasanwendungen erwartet

Heutiger Bedarf von Brennstoffen in der Industrie: Der aktuelle thermischen Energieverbrauch der Schweizer Industrie beträgt 26 TWh. Die Industriebranchen wurden im Rahmen der vorliegenden Studie in Gruppen unterteilt, um mögliche gruppenspezifische Dekarbonisierungslösungen zu identifizieren. Eine Zusammenfassung verschiedener Branchen wurde durch die Gruppierung nach dem Energieverbrauch zugehörigen Temperaturbereichen ermöglicht, wobei die Gruppierung nach Temperaturbereichen unter 200°C, zwischen 200°C und 500°C und über 500°C erfolgte. Hauptkriterium für die Zusammenfassung verschiedener Branchen in eine Gruppe ist der jeweils maximale Temperaturbedarf.

Zur Gruppe der Niedertemperaturindustrien (maximaler Temperaturbedarf unter 200°C) gehören: Lebensmittel-, Textil-/Leder- und Papier-/Druckindustrie. Diese Gruppe hat einen thermischen Energieverbrauch von knapp 6 TWh, der zu fast 60% durch fossile Brennstoffe bereitgestellt wird. Die Industriebranchen in der Mitteltemperaturgruppe (maximaler Temperaturbedarf zwischen 200°C und 500°C) umfassen die Metallverarbeitung/Geräte, Maschinen-, Bau- und sonstige Industrie. Diese Gruppe hat einen thermischen Energieverbrauch von knapp 5 TWh, der knapp zur Hälfte von fossilen

Höchster Wärmeverbrauch und intensive Nutzung fossiler Brennstoffe durch Hochtemperatur Gruppe

Brennstoffen bereitgestellt wird. Die Hochtemperaturgruppe (maximaler Temperaturbedarf oberhalb 500°C) umfasst die energieintensiven Industrien: Chemie/Pharma, Zement, Mineralien, Nichteisenmetalle, Metalle und teilweise auch die Metall- und Geräteindustrie. Die Gruppe hat den höchsten Wärmeverbrauch von ca. 15 TWh, der zu 47% von fossilen Brennstoffen bereitgestellt wird.

Fallbeispiele geplanter Wasserstoffprojekte: In dieser Studie wurden vier Fallstudien für den Einsatz von grünem Wasserstoff in der Industrie beschrieben, drei davon in der Schweiz und eine in Deutschland. Diese kleine Auswahl an Beispielen zeigt, dass wasserstoffbezogene Aktivitäten in diesem Bereich noch gering sind, verglichen mit dem Bereich Wasserstoff in Logistik und Verkehr, der derzeit stärker im öffentlichen Fokus steht. Die Fallbeispiele zeigen, dass Industrien, die Prozesse unter 200 °C haben, wie z. B. die Textilindustrie, Wasserstoff nutzen könnten, wenn sie standortbedingte Vorteile haben, um Wasserstoff zu beziehen. Es wurde erkannt und explizit darauf hingewiesen, dass nicht nur die Prozesstemperatur, sondern auch der Standort eines Industriebetriebes ein Parameter ist, der bei der Abschätzung des Potenzials von Wasserstoff für die Industrie unbedingt berücksichtigt werden sollte.

Künftiger Bedarf von Brennstoffen und Wasserstoff in der Industrie:

Die Abschätzung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs erfolgt in dieser Studie unter Berücksichtigung des Prozesswärmebedarfs bis 2050. Dabei wird nicht das theoretisch maximale Potenzial von Wasserstoff berechnet, sondern vielmehr untersucht, inwieweit es kaum Alternativen gibt. Der Prozesswärmebedarf wird unter den Annahmen einer unveränderten Industriestruktur, d.h. ohne Abwanderung von Unternehmen, und einer Effizienzsteigerung von 25% bis 2050 auf ca. 17 TWh geschätzt. Abzüglich der bisherigen Nutzung anderer Brennstoffe wie Biomasse und Abfall verbleibt ein noch fossil bereitgestellter Prozesswärmebedarf von 9,5 TWh, der dekarbonisiert werden muss. Dabei wird die Elektrifizierung der Niedertemperaturindustrie betrachtet, wobei effiziente Alternativen wie Wärmepumpen eingesetzt werden können. Bei vollständiger Elektrifizierung der Niedertemperaturindustrie verbleibt jedoch ein Restbedarf von ca. 7 TWh in der Mittel- und Hochtemperaturgruppe, die weiterhin fossile Brennstoffe zur Wärmebereitstellung benötigen.

25% weniger Prozesswärmebedarf 2050 (insgesamt 17 TWh)

Die Frage des Wasserstoffanteils an den 7 TWh ist komplex und hängt von Faktoren wie Strom- und Wasserstoffpreisen, Technologieentwicklung und Industriestruktur ab. So sind heute beispielsweise 4 TWh des fossil gedeckten Bedarfs von 7 TWh der Mittel- und Hochtemperaturgruppe von Gas gedeckt. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass Wasserstoff die bestehende Anbindung an das Erdgasnetz nutzen könnte. Es wurde ein möglicher Wasserstoffbedarf für die Wärmebereitstellung im Jahr 2050 in Abhängigkeit vom Anteil alternativer Brennstoffe zwischen 25% und 75% ermittelt, der zu einem Bedarf von 2 bis 5 TWh führt. Hinzu kommen noch die bereits anfangs erwähnten 0.4 TWh für den Prozessgasbedarf.

Je nach Anteil alternativer Brennstoffe, der zwischen 25 % und 75 % variiert, entspricht der Wasserstoffbedarf einem Bereich von 2 bis 5 TWh.

Sollte Wasserstoff in Zukunft in grossen Mengen und zu günstigen Preisen zur Verfügung stehen, wird das Potenzial höher sein als erwartet. Es hat sich

auch gezeigt, dass es derzeit ein Interesse von Unternehmen aus den Niedertemperaturgruppen an Wasserstoff gibt, was das Potenzial um weitere 2 TWh gegenüber dem heutigen fossilen Bedarf erhöhen würde.

8. Ausblick

Um sich optimal auf die Herausforderungen und Chancen vorzubereiten, die sich aus der weiteren Entwicklung von grünem Wasserstoff in der Schweizer Industrie ergeben, sollten folgende Punkte bearbeitet werden:

Intensivierung des Dialogs mit den Stakeholdern:

- Vertiefung der Gespräche mit relevanten Stakeholdern, einschliesslich Vertretern aus Industrie, Behörden, Energieversorger.
- Ermittlung der Anliegen, Anforderungen und Perspektiven der Stakeholder, um eine ganzheitliche und umfassende Analyse zu gewährleisten und in der Wasserstoffstrategie berücksichtigen.

Geografische Lage in die Potenzialbewertung einbeziehen:

- Erweiterung der Potenzialbewertung unter Berücksichtigung der geografischen Lage und spezifischer regionaler Rahmenbedingungen.
- Identifizierung möglicher Standorte für die Entwicklung von Energieparks

Szenarien basierte Kostenanalysen für die gesamte Wertschöpfungskette von grünem Wasserstoff in der Schweiz:

- Detaillierte Kostenabschätzungen zu Aufbau der notwendigen Infrastruktur.
- Szenariobasierte Kostenanalysen, um unterschiedliche Entwicklungspfade zu berücksichtigen und fundierte wirtschaftliche Entscheidungen zu ermöglichen.

Hindernisse und Probleme identifizieren:

- Identifizierung potenzieller Hindernisse und Herausforderungen bei der Einführung von grünem Wasserstoff.
- Entwicklung von Strategien zum proaktiven Umgang mit diesen Hindernissen, um einen reibungslosen Fortschritt in zukünftigen Entwicklungsphasen zu gewährleisten.

Aktuelle Forschungsfrage, Bedarf Industrie:

- Heutiger Bedarf: Gezielte Befragung der Schweizer Industrie zum realen Temperaturniveau des heutigen Bedarfs
- Heutiger Bedarf: Alternativ Anpassung der bisherigen regelmässigen Befragung zum Energieverbrauch der Industrie und Ergänzung mit Fragen zum Temperaturniveau
- Künftiger Bedarf: Vertiefte Analyse des Temperaturbedarfs der Niedertemperaturgruppe (Technologien, Temperaturniveaus), Analyse der

Optionen zur Überprüfung der Hypothese, dass dieser einfach elektrifiziert werden kann

- Heutiger/künftiger Bedarf: Geographische Analyse, welche der heutigen Industrien in der Nähe des Gasnetz ansässig oder bereits an dieses angeschlossen sind, allenfalls mit einer genaueren Analyse ob der Industriebetrieb zentral am Ende eines Gasnetzstranges anliegt.
- Saisonale Aspekte: Wie wirken sich saisonale Schwankungen auf das den Wasserstoffimport oder auf die Produktion aus? Gibt es Speicherbedarf?

A1 Leitfaden Experteninterviews

Im Rahmen der Studie wurden gezielte Interviews mit Branchenverbänden, Energieversorgern, Energieexperten und Unternehmen durchgeführt.

Unser Ziel war dabei:

- Die Plausibilisierung der ersten Ergebnisse durchzuführen,
- die Rolle von Wasserstoff in der Branche zu bewerten,
- Einschätzungen zur zukünftigen Entwicklung der Industriebranche einzuholen.

A1.1 Potenzial Wasserstoff in der Industrie

Wasserstoff als Prozessgas

Eine Studie¹⁸ von 2018 schätzte den folgenden Bedarf in Tabelle 1 an Wasserstoff als Prozessgas in der Schweizer Industrie auf 13'000t / Jahr ein.

Industrie	Prozessgas (2018)
Raffinerie	11'000 t H ₂ / Jahr
Dünger	
Uhren	700 t H ₂ / Jahr
Chemie und Pharma	600 t H ₂ / Jahr
Synthetische Steinproduktion	550 t H ₂ / Jahr
Metallverarbeitung	50 t H ₂ / Jahr
Andere	50 t H ₂ / Jahr
Summe	13'000 t H₂ / Jahr

Tabelle 5 Übersicht Wasserstoff als Prozessgas

Fragen	Antworten
Finden Sie diesen Betrag von 13'000t plausibel?	
Wenn Sie die Entwicklung des Bedarfs von Wasserstoff als Prozessgas in der energieintensiven Branchen beobachten, meinen Sie, dass dieser bis 2030 eher gleich, weniger oder mehr als heute sein wird?	

18 [«Swiss Hydrogen Production and Demand” E4tech, BFE 2018](#)

A1.2 Potenzial Hochtemperatur Prozesse

Hintergrund: Das Ziel der Studie besteht darin, die Menge an Wasserstoff als Brennstoff zur Wärmebereitstellung in der Industrie abzuschätzen. Dabei basiert die Annahme darauf, dass Prozesstemperaturen bis 200°C in Zukunft grösstenteils elektrifiziert werden können, beispielsweise durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen. Daher wird das Potenzial von Wasserstoff als Brennstoff zur Bereitstellung von Temperaturen über 200°C betrachtet.

Fragen	Antworten
Sind sie einverstanden, dass es bis 200°C Alternativen geben wird und somit hier nur Hochtemperaturprozesse (>200°C) für die Studie relevant sind? Bitte die Antwort erläutern, falls Sie nicht einverstanden sind.	

Wärmebedarf und ihre Temperaturaufteilung

Hintergrund: Der Wärmebedarf wurde in dieser Studie für jede Branche aufgrund ihrer spezifischen Temperaturanforderungen aufgeteilt. Hierfür wurden Daten aus verschiedenen Studien¹⁹ zur Temperaturverteilung genutzt und auf die schweizerischen Branchen²⁰ übertragen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Unser Fokus in dieser Studie liegt auf dem Wärmebedarf der energieintensiven Branchen, zu denen die Bereiche Chemie/Pharma, Zement/Beton, Metall/Eisen und NE-Metalle gehören.

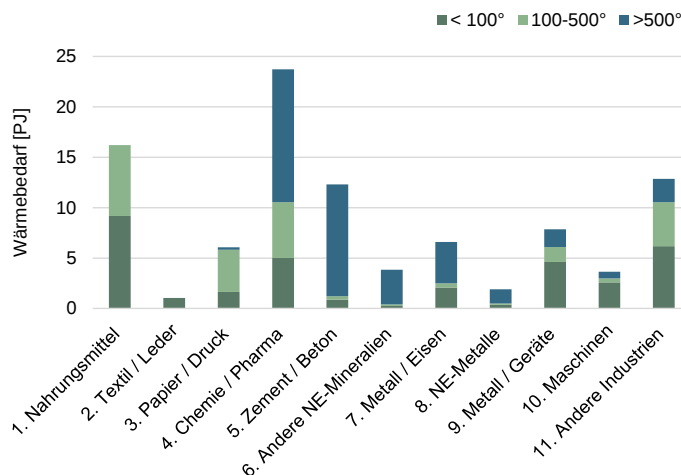


Abbildung 14 Darstellung des Wärmebedarf nach Branchen mit Temperaturverteilung. Vorläufige Ergebnis. Bitte nicht weiterleiten ohne Einverständnis von EBP

19 Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level - Naegler - 2015 - International Journal of Energy Research - Wiley Online Library....

20 Endenergieverbrauch Industrie und Dienstleistung; BFE, Resultate 2020

Fragen	Antworten
Sind Sie mit der Abschätzung der Temperaturverteilung der Branchen einverstanden?	
Können Sie mir bitte die energieintensivsten (Wärme) Prozesse der Branchen in der Schweiz nennen (>200°C)?	
Wie viele Mitglieder haben schon einen Dekarbonisierungspfad erarbeitet?	
Auf welche Lösungen setzen die Industrieunternehmen, um ihren Energieverbrauch zu dekarbonisieren?	
Welche Rolle spielt Wasserstoff und Elektrifizierung bei den Dekarbonisierungspfaden?	
<i>Wenn H2 Rolle spielt:</i> Was sind dabei die Voraussetzungen, die erfüllt werden müssen, damit H2 tatsächlich eingesetzt wird?	
Spielt Wasserstoff für die Notfallversorgung oder Speichersysteme eine Rolle?	
Ein Teil unsere Studie ist es Fallbeispiele für die Anwendung von grünem Wasserstoff in der Schweizer Industrie zu sammeln. Können Sie uns bitte ein Beispiel von bestehenden oder geplanten Anlagen nennen?	

A2 Prozesse

Beschreibung	
Niedertemperatur <100°C	Branchen Food/beverage, Metal (Metallerzeugung und -bearbeitung, Metallerzeugnisse), Textile industry (Textilien, Bekleidung, Leder/Lederwaren/Schuhe), Wood (Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren), Paper industry (Papier, Pappe und Waren daraus; Druckerzeugnisse; Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern, Verlags- und Druckgewerbe), Chemicals (Chemische und pharmazeutische Erzeugnisse), Gummi- und Kunststoffwaren, Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse, Elektrische Ausrüstungen, Maschinenbau, Kraftwagen und Kraftwagenteile, Sonstiger Fahrzeugbau, Möbel und sonstige Waren, Zementindustrie, Tabakindustrie, Rundfunk-, Fernseh- u. Nachrichtentechnik, Medizin-, Mess-, Steuer-, Regelungstechnik, Optik
	Prozesse waschen, vorwärmen, Kesselspeise oder -zusatzwasser, pasteurizing, thickening, heat-treatment, blanchieren, brühen, eindampfen, kochen, räuchern, reinigen, temperieren, trocknen, waschen, entlacken, galvanizing, chromatieren, entfetten, phosphatieren, spülen, trocknen, washing, dyeing, bleaching, trocknen, drying, pickling (beizen), dämpfen, kochen, bleaching, de-inking, biochemische Reaktionen, kochen, allg. Oberflächenbehandlung, reinigen, Granulattrocknung, vorwärmen
Mittlere Temperatur 100°C – 500°C	Branchen Food/beverage, Metal (Metallerzeugung und -bearbeitung, Metallerzeugnisse), Textile industry, Wood (Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren), Chemicals (Chemische und pharmazeutische Erzeugnisse), Paper industry (Papier, Pappe und Waren daraus; Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern, Verlags- und Druckgewerbe), Gummi- und Kunststoffwaren, Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse, Elektrische Ausrüstungen, Maschinenbau, Kraftwagen und Kraftwagenteile, Sonstiger Fahrzeugbau, Möbel und sonstige Waren, Zementindustrie, Tabakindustrie, Rundfunk-, Fernseh- u. Nachrichtentechnik, Medizin-, Mess-, Steuer-, Regelungstechnik, Optik
	Prozesse Boiling, pasteurizing, sterilizing, baking, trocknen, galvanizing, trocknen, dyeing, pressing, var. processes, distilling, pressing, boiling, thickening, bleaching, boiling, drying, allg. Oberflächenbehandlung, reinigen, Granulattrocknung
Hohe Temperatur >500°C	Branchen Chemicals (Chemische und pharmazeutische Erzeugnisse), Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, Metal (Metallerzeugung und -bearbeitung, Metallerzeugnisse), Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse, Elektrische Ausrüstungen, Maschinenbau, Kraftwagen und Kraftwagenteile, Sonstiger Fahrzeugbau, Rundfunk-, Fernseh- u. Nachrichtentechnik, Medizin-, Mess-, Steuer-, Regelungstechnik, Optik
	Prozesse Hochtemperaturen über 500°C: Schmelzöfen werden Metall-Legierungen geschmolzenen, je nach Legierung liegt der zwischen 450°C (Zink) bis zu 660°C bei Aluminium.

Tabelle 6: Übersicht Prozesse nach Temperaturbereich in allen Branchen, Branchen nach NOGA²¹: 1-Nahrungsmittel, 2-Textil/Leder, 3-Papier, 4-Chemie/Pharma, 5-Zement, 6-NE-Mineraie, 7-Metall/Eisen, 8-NE-Metall, 9-Metall/Geräte, 10-Maschinenbau, 11-andere Industrie

21. Abk. von Nomenclature Générale des Activités économiques, Deutsch: Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige

A3 Datentabellen Abbildungen

GWh	1 Nahrungs- mittel	2 Textil / Leder	3 Papier / Druck	4 Chemie / Pharma	5 Zement / Beton	6 NE - Minerale	7 Metalle / Eisen	8 NE - Metalle	9 Metall / Geräte	10 Maschinen	11 Sonstige	12 Bau
<100°C	2.17	0.27	0.46	1.32	0.24	0.07	0.55	0.10	1.12	0.61	1.64	0.59
100-500°C	1.66	0.00	1.16	1.46	0.10	0.04	0.11	0.03	0.36	0.10	1.16	0.25
>500°C	0.00	0.00	0.07	3.47	3.05	0.89	1.08	0.39	0.42	0.15	0.62	0.00
Total	3.83	0.27	1.69	6.25	3.39	0.99	1.75	0.53	1.90	0.86	3.42	0.84

Tabelle 7: Daten zu Abbildung 5 (Zeile «Total») und Abbildung 8 (Aufteilung nach Temperatur)

TWh	1 Nahrungs- mittel	2 Textil / Leder	3 Papier / Druck	4 Chemie / Pharma	5 Zement / Beton	6 NE - Minerale	7 Metalle / Eisen	8 NE - Metalle	9 Metall / Geräte	10 Maschinen	11 Sonstige	12 Bau
Stromanteil	0.4	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	0.6	0.3	0.3	0.1	0.8	0.0
fossile Brennstoffe	2.3	0.3	0.4	2.1	1.4	0.6	0.9	0.4	1.2	0.3	0.5	0.5
andere Brennstoffe	0.3	0.0	1.1	2.3	2.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.4	0.0

Tabelle 8: Daten zu Abbildung 5Abbildung 6