


Wasserstoffeinsatz in der Industrie



Die EU bezeichnet Wasserstoff in Ergänzung zu erneuerbarem Strom als einen der wichtigsten Energieträger der Zukunft. In den Schweizer Energieperspektiven 2050+ spielt dagegen grüner Wasserstoff, auch für Industrieprozesse, aktuell keine wesentliche Rolle. In dieser Ausgabe sind die wichtigsten Fakten zur Wärmenutzung in der Industrie zusammengefasst.

Wasserstoff als Energieträger

Grundlagen

Die Industrieproduktion zeichnet sich durch energieintensive und teilweise auch hohe Prozesswärmertemperaturen aus. In der Industrie gilt der Energieträger Wasserstoff als ein zentraler Baustein, um die Klimaziele überhaupt zu erreichen. Denn Wasserstoff ist nicht nur vielseitig einsetzbar, er ist bei hohen Prozesswärmertemperaturen von über 1000 °C eine relevante klimaneutrale Alternative zu erneuerbarem Strom. Zudem ist Wasserstoff frei von Kohlenstoff (C), er emittiert daher bei der Verbrennung auch kein Kohlendioxid (CO₂).

Wasserstoff kommt in allen lebenden Organismen vor, ist nahezu unbegrenzt, aber nicht frei verfügbar. Um Wasserstoff als Energieträger zu nutzen, muss dieser zuerst mit Energieaufwand erzeugt werden. Die im Wasserstoff chemisch gebundene Energie (33 kWh/kg Heizwert) kann auf vielfältige Weise genutzt werden. Wasserstoff kann als Treibstoff für die Mobilität und als Brennstoff zur Stromerzeugung oder Wärmegewinnung eingesetzt werden. Im Unterschied zu Methan emittiert Wasserstoff

bei der Verbrennung kein CO₂, da er keinen Kohlenstoff enthält (siehe Tabelle unten). Wasserstoff kann daher vor allem bei der Dekarbonisierung der Industrie als vielfältig einsetzbarer Energieträger eine Schlüsselrolle einnehmen. Denn klimafreundlich hergestellter Wasserstoff ermöglicht es der Industrie, ihre CO₂-Emissionen deutlich zu reduzieren, dort, wo die Energieeffizienz sowie die Nutzung anderer erneuerbarer Energien wie beispielsweise Strom nicht ausreichen.

Die wichtigsten Eigenschaften von Wasserstoff

- frei von Kohlenstoff (CO₂-frei)
- ungiftig und nicht ätzend oder reizend
- umweltneutral, nicht wassergefährdend
- geruchlos, geschmacksneutral
- unsichtbar (verbrennt mit nicht sichtbarer Flamme)
- flüchtig, leichter als Luft
- wirkt auf einige Materialien versprödhend
- nicht korrosiv
- nicht radioaktiv
- nicht krebserregend

Kenndaten von Wasserstoff und Erdgas

	Einheit	¹ Wasserstoff H ₂	² Methan CH ₄
Heizwert	kWh/m ³	2,995	10,13
Brennwert	kWh/m ³	3,54	11,24
Unterer Wobbe-Index	kWh/m ³	11,359	13,37
Oberer Wobbe-Index	kWh/m ³	13,427	14,82
Normdichte	kg/m ³	0,08989	0,743
Methanzahl (MZ)	–	0	91
Untere Zündgrenze in Luft	Vol.-%	4	4
Obere Zündgrenze in Luft	Vol.-%	77	17
Luftbedarf (bei 21 Vol.-% O ₂)	m ³ Luft / m ³ Gas	2,38	9,71
Selbstentzündungstemperatur gemäss DIN 51794	°C	560	570 ... 670
Zündverzugszeit	ms	0,04613	46,16
Maximale laminare Flammengeschwindigkeit	cm/s	346	43
Adiabate Verbrennungstemperatur der Flamme mit Luft bei Lambda 1	°C	2050	1950
Flammenfarbe	–	farblos	blau

¹ Kenndaten von Wasserstoff bei einer Reinheit von 99,9 Vol.-%

² Erdgas, Biomethan, synthetisches Methan

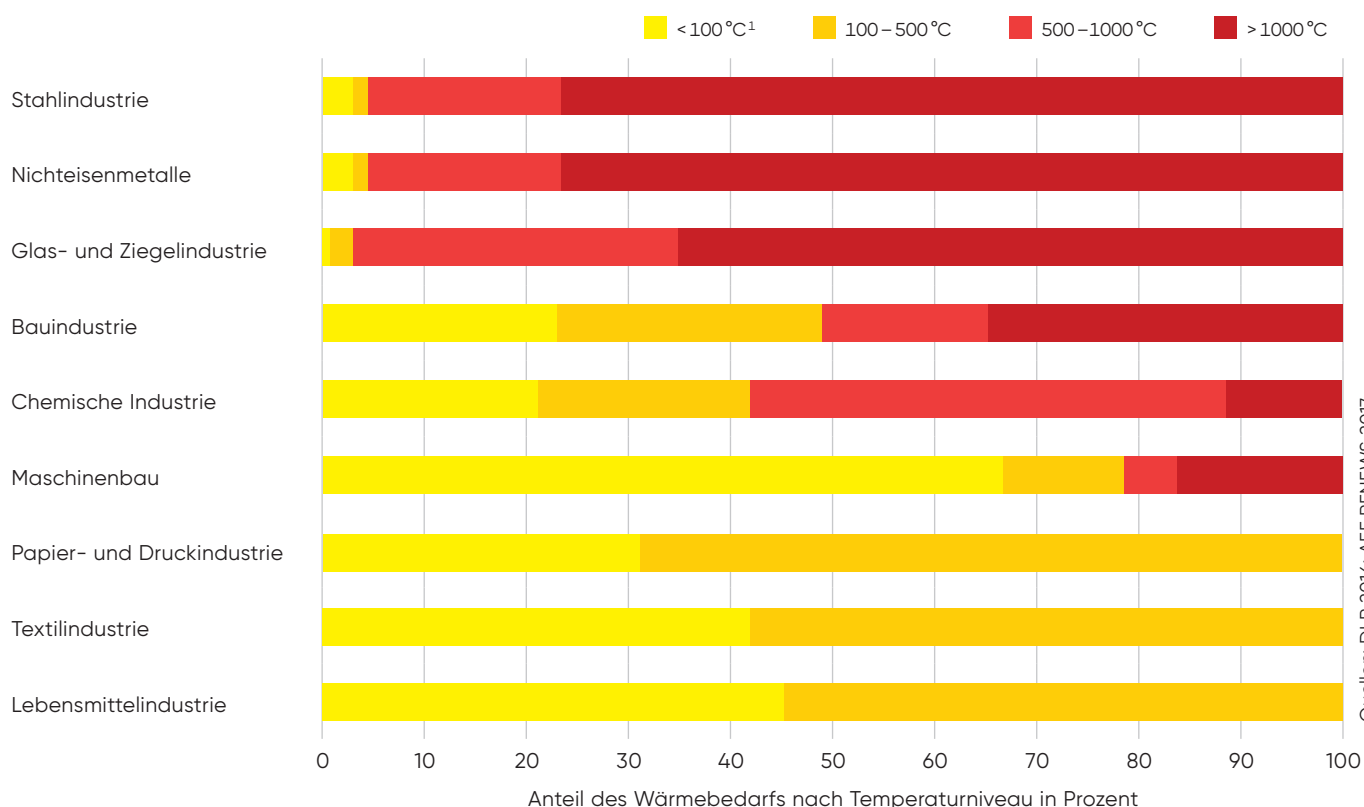
Prozesswärmebedarf nach Temperaturniveau

Industrielle Prozesse benötigen grosse Mengen an Wärme auf unterschiedlich hohen Temperaturniveaus, wie die untenstehende Darstellung verschiedener Industriebranchen aufzeigt. Als Prozesswärme bezeichnet man im Allgemeinen diejenige Wärme, die für den Ablauf eines bestimmten technischen Prozesses notwendig ist. Die Bereitstellung von Prozesswärme stellt einen bedeutenden Anteil am gesamten Energieverbrauch der Industrie dar.

Bei der Prozesswärme handelt es sich um Wärme, die in der Industrie bei chemischen, technischen oder anderen Prozessen benötigt wird. Diese Prozesse können sehr vielfältig sein und auf unterschiedlich hohen Temperaturniveaus ablaufen. Zu diesen Prozessen gehören unter anderem das Trocknen von Bauteilen, das Schmelzen und die Wärmebehandlung von Metallen oder das Bereitstellen von Dampf. Gleichzeitig wird der Begriff Prozesswärme auch bei der Nutzung der Abwärme aus thermischen Prozessen verwendet. So kann beispielsweise die Abwärme aus Industrieprozessen in Wärme-

netze eingespeist und zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt werden. Das Bereitstellen von Raumwärme und Warmwasser, das nicht aus der Nutzung von Abwärme stammt, fällt dagegen nicht unter den Begriff Prozesswärme. Der zentrale Parameter für die Bestimmung der Prozesswärme ist das Temperaturniveau, denn thermische Prozesse in der Industrie benötigen prozessspezifische Temperaturniveaus. Je höher das Temperaturniveau, desto grösser ist der Energieaufwand zur Erzeugung der Wärme. Der Energiebedarf ist somit in einem hohen Masse vom Temperaturniveau des Prozesses abhängig.

Industrieller Prozesswärmebedarf nach Branchen und Temperaturniveau



¹ Enthält teilweise auch die Raumwärme und den Warmwasserbedarf

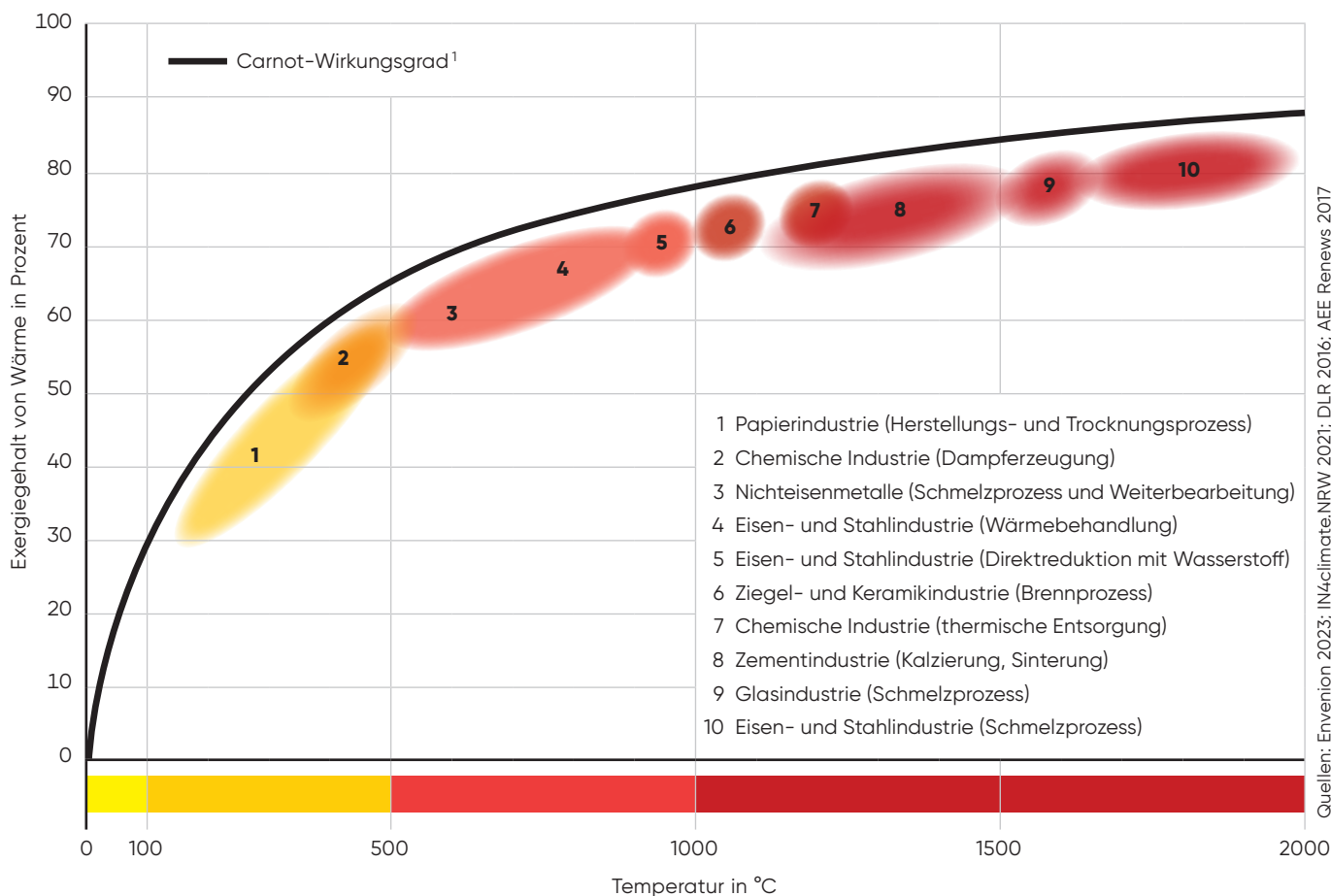
Wichtige Industrieprozesse nach Temperaturniveau

Wärmeenergie besteht aus Exergie und Anergie. Exergie ist der Teil der Energie, der technisch genutzt werden kann. Anergie ist die verbleibende Energiemenge, die aufgrund der Bedingung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik nicht genutzt werden kann. Das Verhältnis von Anergie zu Exergie wird durch die Temperatur der Wärme und die Temperatur der Umgebung definiert. Der Carnot-Wirkungsgrad beschreibt das theoretisch nutzbare Maximum. Je höher die Prozesstemperaturen sind, desto höher ist auch der Exergiegehalt.

Der erreichbare Exergiegehalt wird durch die in Industrieprozessen auftretenden Wärmeverluste bestimmt. Bei industriellen Prozesswärmeanforderungen, die oberhalb von 1000 °C liegen und aus Verbrennungsprozessen mit Methan oder Wasserstoff entstehen, ist ein hoher Anteil der Exergie aus der Wärmeenergie nutzbar (siehe Grafik unten). Zudem stehen die hohen Flammtemperaturen, die beim Verbrennungsprozess von Methan und Wasserstoff bei rund 2000 °C liegen, direkt und ohne Zeitverzögerung

den Industrieprozessen zur Verfügung. Viele industrielle Prozesse wie die thermische Entsorgung, das Glühen oder das Schmelzen sind somit vor allem auf der Basis der Verbrennung von Methan und Wasserstoff effizient zu betreiben. Bei Industrieprozessen, die Temperaturen zwischen 100 °C und 500 °C benötigen, werden in Zukunft mehrheitlich neue Energiebereitstellungstechniken, wie beispielsweise die Hochtemperaturwärmepumpe, bereitgestellt.

Industrieprozesse nach Temperaturniveau



Quellen: Envention 2023; IN4climate.NRW 2021; DLR 2016; AEE Renewts 2017

¹ Der Carnot-Wirkungsgrad ist der theoretisch höchstmögliche Wirkungsgrad für die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische bzw. elektrische Energie in einer Wärmekraftmaschine (z.B. Dampfturbine, Gasturbine, Verbrennungsmotor).

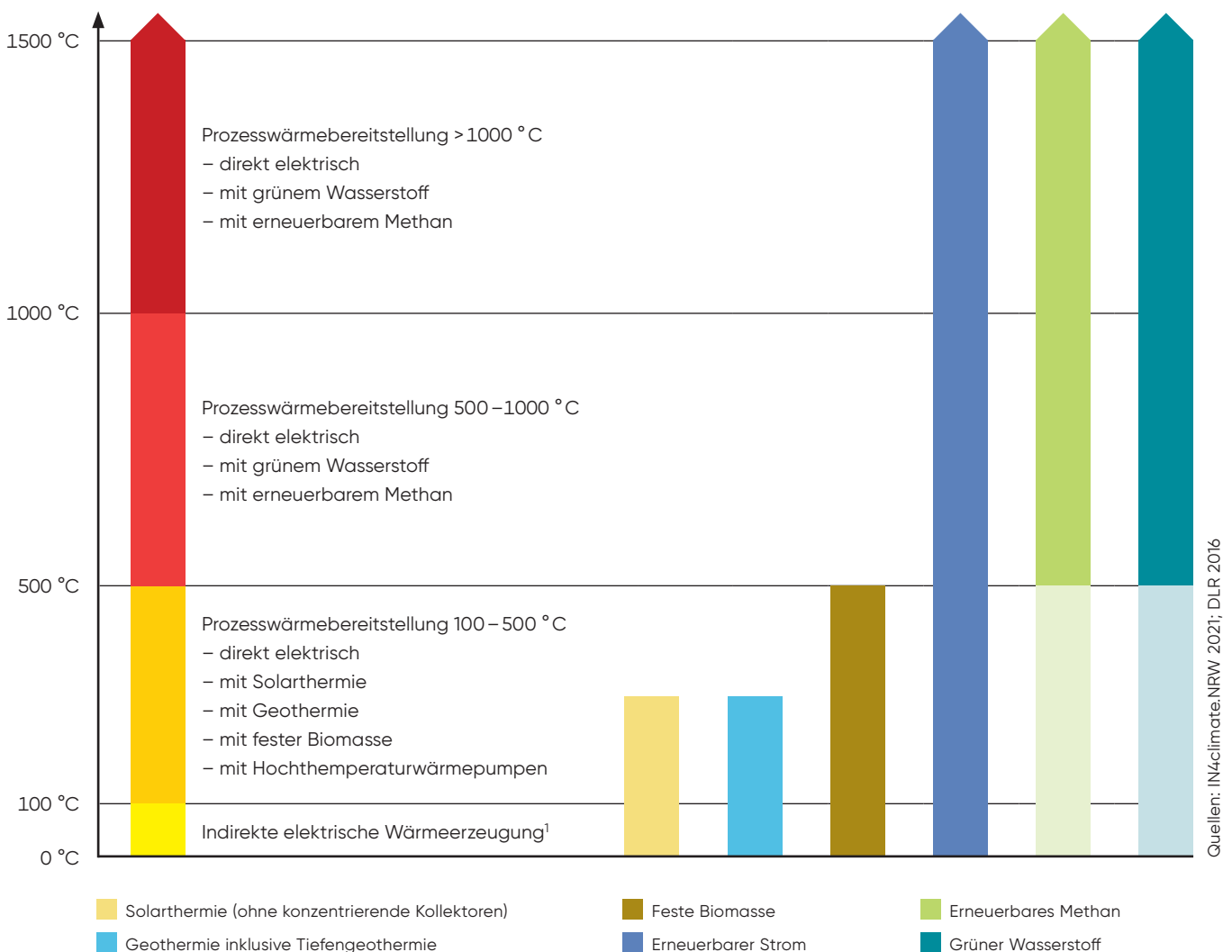
Prozesswärmebereitstellung mit erneuerbaren Energien

Um eine klimaneutrale Prozesswärmeversorgung in der Industrie zu erreichen, müssen Kohle, Heizöl und Erdgas in den kommenden Jahren sukzessive durch erneuerbare Energieträger ersetzt werden. Bei dieser Transformation können erneuerbares Methan und grüner Wasserstoff eine wichtige Rolle spielen. Vor allem bei hohen Prozesstemperaturen ist der Einsatz von erneuerbaren Gasen effizient, da die Flammentemperatur rund 2000 °C beträgt.

Industrielle Prozesse benötigen Wärme auf unterschiedlich hohen Temperaturniveaus. Aktuell decken in der Schweizer Industrie Strom, Erdgas, Heizöl, Industrieabfälle, Fernwärme und Kohle rund 95 Prozent des Wärmebedarfs. Um in Zukunft Prozesswärme ausschliesslich aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen, steht zwar ein breites Spektrum an Technologien zur Verfügung. Viele haben allerdings technisch bedingte Temperaturobergrenzen.

So ist derzeit die Nutzung von Umweltwärme mit konventionellen Wärmepumpen auf ein Niveau von unter 100 °C begrenzt. Die im Entwicklungsstadium befindliche Hochtemperaturwärmepumpe erreicht über 200 °C. Für Prozesswärme aus erneuerbaren Quellen im Hochtemperaturbereich von über 1000 °C werden neben Strom vor allem Methan und Wasserstoff als die geeignetsten Energieträger betrachtet.

Prozesswärmebereitstellung mit erneuerbaren Energien nach Temperaturniveau



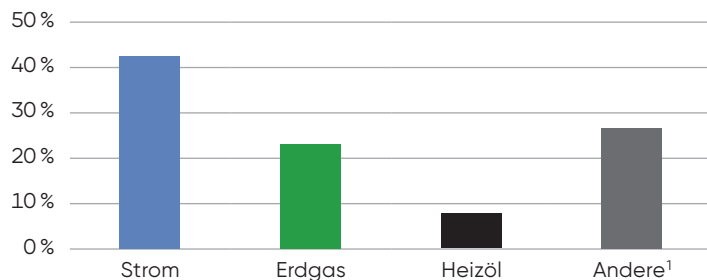
Quellen: IN4climate.NRW 2021; DLR 2016

¹ Mittels Wärmepumpe (umfasst teilweise auch die Raumwärme und den Warmwasserbedarf)

Energieverbrauch der Schweizer Industrie

Im Jahr 2022 lag der Energiebedarf der Schweizer Industrie gemäss der schweizerischen Gesamtenergiestatistik bei rund 40 TWh. Das sind 19 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs der Schweiz. Ein Grossteil der Energie wird für Prozesswärme benötigt. Der Anteil der drei Energieträger Strom, Erdgas und Heizöl lag im Jahr 2022 bei über 70 Prozent. Eine Auswertung in ausgewählten Industriebranchen zeigt, dass rund 40 Prozent der eingesetzten Energie für Prozesswärmepertemperaturen über 500 °C bestimmt sind.

Energieverbrauch der Schweizer Industrie im Jahr 2022

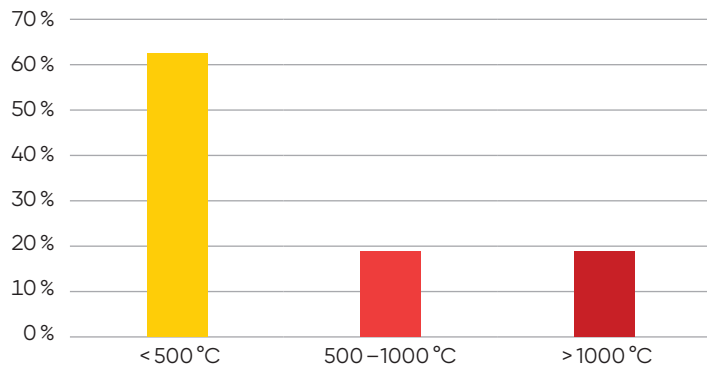


Strom: 17 TWh
 Erdgas: 9 TWh
 Heizöl: 3 TWh
 Andere¹: 11 TWh
Total: 40 TWh

¹ Holz, Fernwärme, Industrieabfälle, Kohle etc.

Quelle: Energiestatistik der Schweiz
 BFE 2022

Energieverbrauch ausgewählter Industriebranchen nach Temperaturniveau mit Strom, Erdgas und Heizöl



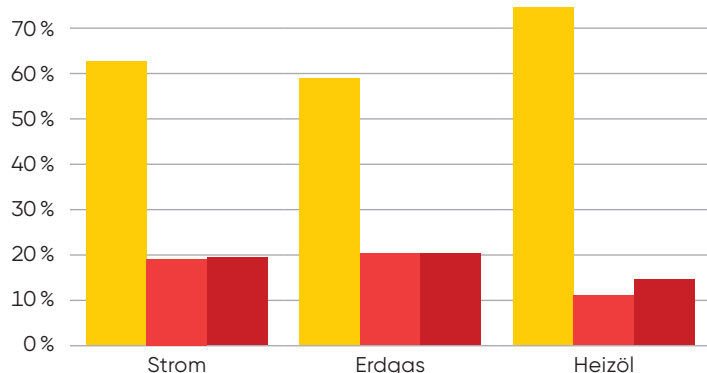
Ausgewählte Industriebranchen

- Lebensmittelindustrie
- Textilindustrie
- Papier- und Druckindustrie
- Chemische Industrie
- NE-Metalle
- Maschinenbau
- Baugewerbe
- Stahl (Metall/Eisen)

■ < 500 °C ■ 500–1000 °C ■ > 1000 °C

Quellen: BFE 2021; DLR 2016;
 Envention 2023

Energieverbrauch ausgewählter Industriebranchen nach Temperaturniveau und unterteilt in Strom, Erdgas und Heizöl



Ausgewählte Industriebranchen

- Lebensmittelindustrie
- Textilindustrie
- Papier- und Druckindustrie
- Chemische Industrie
- NE-Metalle
- Maschinenbau
- Baugewerbe
- Stahl (Metall/Eisen)

■ < 500 °C ■ 500–1000 °C ■ > 1000 °C

Quellen: BFE 2021; DLR 2016;
 Envention 2023

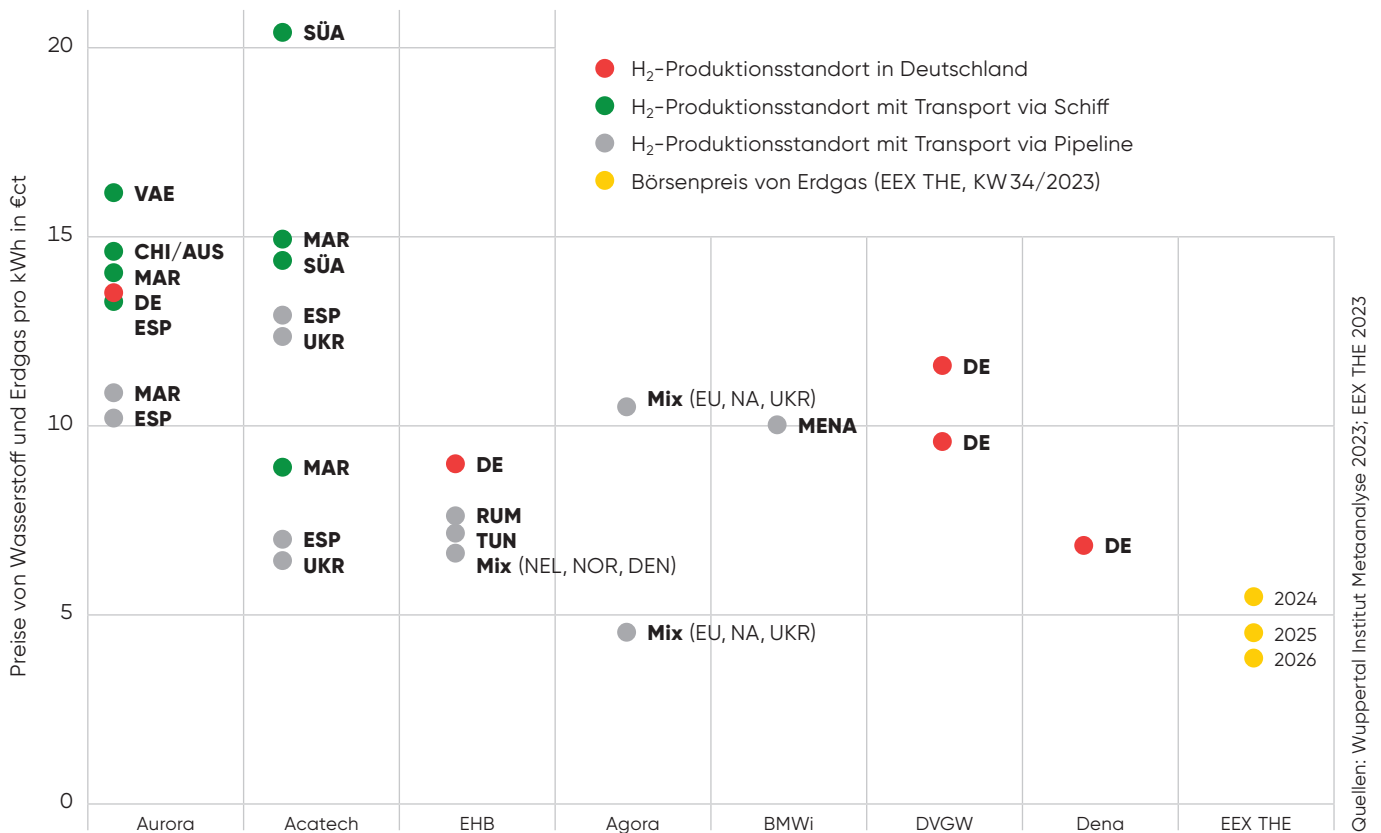
Perspektiven Wasserstoffkosten für das Jahr 2030

Der Aufbau der weltweiten Wasserstoffproduktion wird die Bereitstellungskosten von Wasserstoff beeinflussen. In der im Juni 2023 publizierten Studie «Metaanalyse zu Wasserstoffkosten und -bedarf» hat das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie die Kosten- und Mengenbandbreite für die zukünftige Produktion und Bereitstellung von grünem und blauem Wasserstoff für Deutschland untersucht.

Für das Jahr 2030 ist in Deutschland mit einer Nachfrage nach klimaverträglichem Wasserstoff von 90 bis 160 TWh zu rechnen. Perspektivisch gehen die Investitionskosten stark zurück. Die Preisunterschiede bei den Importen haben vor allem mit dem Transportmedium und der Entfernung zum Produktionsland zu tun. Generell wird ein Import von Wasserstoff via Pipeline als günstiger betrachtet als per Schiff. Die Produktionskosten von grünem Wasserstoff in Deutschland liegen meist unterhalb der

Importkosten per Schiff. Die Bereitstellungskosten von Wasserstoff (Strom, Transport, Anlageninvestitionen) werden 2030 teilweise vergleichbar sein mit den Kosten für Erdgas (Beschaffung und CO₂-Abgabe). Die nachfolgende Abbildung zeigt die Bereitstellungskosten von Wasserstoff für das Jahr 2030. Jeder Punkt steht für eine Kostenabschätzung in der jeweiligen Studie. Bei den Importen sind die Transportkosten nach Deutschland eingeschlossen.

Bereitstellungskosten von Wasserstoff im Jahr 2030 nach Produktionsstandort



Preisentwicklung von Wasserstoff und Erdgas aus verschiedenen Quellen

Länderabkürzungen: AUS = Australien, CHI = Chile, DE = Deutschland, MAR = Marokko, NA = Nordafrika, RUM = Rumänien, ESP = Spanien, SÜA = Südafrika, TUN = Tunesien, UKR = Ukraine, VAE = Vereinigte Arabische Emirate

Energiebedarf in der Industrie

Perspektive 2030

Mit einem Anteil von rund 19 Prozent am gesamten Endenergiebedarf der Schweiz spielt die Industrie eine wichtige Rolle, um die Klimaziele zu erreichen. Die Transformation zu klimaneutralen Industrieprozessen wird den Energiemix stark verändern. Für die Dekarbonisierung der industriellen Produktion sind sowohl Effizienzsteigerungen als auch neue Prozesse auf Basis von erneuerbaren Energien notwendig. Vor allem bei hohen Prozesstemperaturen ist der effiziente Energieeinsatz von zentraler Bedeutung, denn je höher das Temperaturniveau, desto grösser ist auch der Energieaufwand, um das geforderte Temperaturniveau zu erreichen.

Prozesswärmebereitstellung kleiner als 100 °C

In diesem Temperaturbereich wird die Wärme mehrheitlich für Heisswasserprozesse (z. B. in der Lebensmittelproduktion) verwendet. Der Raumwärme- und Warmwasserbedarf gehört zwar nicht zur Prozesswärme, fällt aber auch in diesen Temperaturbereich.

Prozesswärmebereitstellung 100 bis 500 °C

In diesem Temperaturbereich gibt es einige Technologien, die erneuerbare Prozesswärme bereitstellen können. Neben der direkten Nutzung von Strom kann die Hochtemperaturwärmepumpe zukünftig eine wichtige Rolle übernehmen. Wasserstoff stellt für spezifische Prozesse eine Alternative dar.

Prozesswärmebereitstellung 500 bis 1000 °C

In diesem Temperaturbereich wird Prozesswärme neben dem Einsatz von Strom (direkt elektrisch) vermehrt auch mit Feuerungen bereitgestellt. Wasserstoff kann als kohlenstofffreier Brennstoff zukünftig eine wertvolle und sinnvolle Ergänzung zum Einsatz von Strom darstellen.

Prozesswärmebereitstellung über 1000 °C

Industrieprozesse mit Temperaturen über 1000 °C sind von Feuerungen dominiert. Durch die schnelle Verfügbarkeit von hohen Prozesstemperaturen dank der Flammtemperatur von über 2000 °C kann Wasserstoff in diesem Bereich zukünftig eine wichtige Rolle einnehmen.



Herausgeber

Verband der Schweizerischen
Gasindustrie VSG
044 288 31 31
vsg@gazenergie.ch
www.gazenergie.ch

Redaktion

Hubert Palla, VSG
hubert.palla@gazenergie.ch

Suisse romande

Nathalie Pfund, ASIG
nathalie.pfund@gazenergie.ch

Auflage

11000 deutsch, 4500 französisch

Titelbild

Vetropack SA, Saint-Prex VD

Grafik/Layout/Druck

Bühler Druck AG, Volketswil

Adressänderung

info@buehler-druck.ch

Gratis-Abonnements

vsg@gazenergie.ch



gedruckt in der
schweiz