

Bereitstellung klimaneutraler Prozesswärme für die Industrie: Ein 4-Stufen-Modell

Dietmar Schüwer und Georg Holtz

Die Bereitstellung industrieller Prozesswärme ist eine zentrale Herausforderung für ein zukünftiges klimaneutrales Energiesystem. In diesem Artikel wird die Vielfalt an etablierten und neuen Energieträgern und Technologien zur treibhausgasarmen bzw. -neutralen Bereitstellung von Prozesswärme vorgestellt. Zudem werden ihre wichtigsten Stärken und Schwächen skizziert, um daraus geeignete Anwendungsfelder und eine Priorisierung ihres Einsatzes zu identifizieren.

Im Jahr 2021 entfielen rund 67 % oder 472 TWh des gesamten industriellen Endenergiebedarfs von 699 TWh auf die Bereitstellung industrieller Prozesswärme. Von dieser Prozesswärme wird bisher mit 6 % nur ein Bruchteil gänzlich aus erneuerbaren Energien bereitgestellt. Weitere 8 % werden über Strom bzw. 9 % über Fernwärme zumindest anteilig erneuerbar versorgt. Die Industrie steht daher vor der großen Herausforderung, ihren zu über drei Vierteln auf fossilen Energieträgern basierenden Prozesswärmebedarf in nur wenigen Jahrzehnten zu dekarbonisieren bzw. defossilisieren [1].

Bereits heute stehen alternative Energieträger und Technologien für die Prozesswärmebereitstellung bereit bzw. werden in naher Zukunft verfügbar werden, die eine deutliche Minderung der CO₂-Emissionen ermöglichen bzw. die gänzlich (lokal) treibhausgasneutral sind. Im Folgenden werden diese alternativen Wärmeerzeugungsoptionen nach ihren technischen Eigenschaften sowie bzgl. ihrer Energie- und Ressourceneffizienz differenziert betrachtet und untersucht, wie sie nach diesen Gesichtspunkten möglichst optimal im Industrie- und Gesamtenergiesystem eingesetzt werden können.

Technologien für eine klimaneutrale Prozesswärme

Abb. 1 zeigt die technischen Möglichkeiten zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärmeerzeugung mit Hilfe erneuerbarer Wärmequellen, unvermeidlicher Abwärme, erneuerbarem Strom, Biomasse (einschließlich Biogas), Reststoffen (z.B. aus der Papierindustrie) und Beiprodukten (z.B. brennbare Gase in der Chemieindustrie) sowie alternativen synthetischen Energieträgern (insbesondere Wasserstoff und synthetisches Methan).

Obwohl diese Energieträger und Technologien grundsätzlich am Markt verfügbar sind, zeichnen sie sich durch unterschiedliche Mengenverfügbarkeit (z.B. Hochlauf von grünem Wasserstoff) und technische Reife (z.B. bei der Elektrifizierung spezieller technischer Prozesse) aus. So besteht beispielsweise noch Forschungsbedarf zu einigen Technologien wie Hochtemperatur-Wärmepumpen oder -Wärmespeichern sowie hinsichtlich hybrider Konzepte und der Integration verschiedener Wärmeerzeuger in industrielle Prozesse.

Grundsätzlich muss beachtet werden, dass nicht alle erneuerbaren Energieträger überall und jederzeit verfügbar sind. Zudem ist nicht jede Technologie für jede Temperaturstufe und jeden Anwendungsbereich (Prozess, Branche) geeignet. Eine zentrale Herausfor-

derung besteht daher darin, für jeden spezifischen Anwendungsfall maßgeschneiderte Lösungen zur Wärmeerzeugung entsprechend dem benötigtem Temperaturniveau zu entwickeln und einzusetzen.

Dennoch lässt sich unter dem Gesichtspunkt der Energie- und Ressourceneffizienz eine Priorisierung der Bereitstellungsoptionen ableiten, die über die Einzelfallbetrachtung hinausweist. Das in der gemeinsamen AG Prozesswärme des Thinktanks IN4climate.NRW sowie des wissenschaftlichen Kompetenzzentrums Sci4Climate.NRW erarbeitete 4-Stufen-Modell [2] kann eine gute Hilfestellung sein bei der Frage, in welcher Priorisierung Schritte zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme im Unternehmen vorgenommen werden sollten. Die vier Stufen (s. Abb. 2) werden nachfolgend beschrieben.

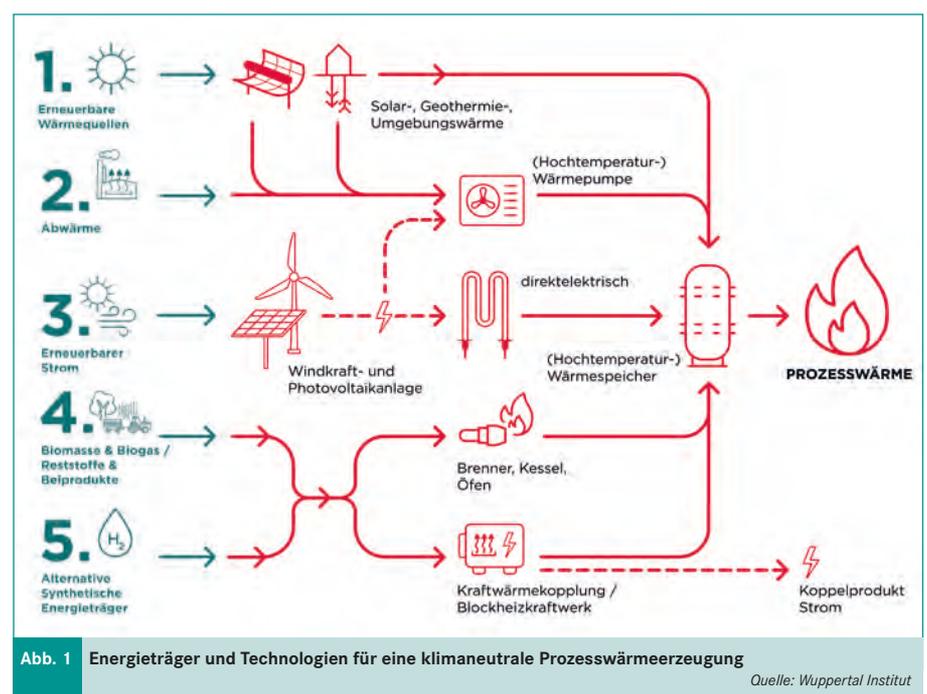




Abb. 2 4-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

Quelle: NRW.Energy4Climate

1. Steigerung der Energieeffizienz

Die Energieeffizienz zu steigern ist eine zentrale Strategie auf dem Weg zur THG-Neutralität, da sie i.d.R. Voraussetzung dafür ist, überhaupt mit den lokal und systemisch begrenzten Ressourcen an erneuerbaren Energien und deren Transportkapazitäten auszukommen. Zudem reduziert sie sowohl auf Unternehmensebene als auch aggregiert im Gesamtsystem das Risiko hoher Energiepreise angesichts perspektivisch knapper Angebote an treibhausgasneutralen Energieträgern. Konkrete Maßnahmen sind beispielsweise die Umstellung von Dampf auf Heißwasser, die Absenkung von Temperatur- und Druckniveau bei der Dampfversorgung auf das tatsächlich erforderliche Niveau, Dämmmaßnahmen, Prozessoptimierung und Prozessumstellung auf neue Verfahren sowie das weite Feld der Abwärmenutzung.

Zur energetischen Effizienz gehört auch, dass Anwendungen auf niedrigem Temperaturniveau möglichst nur mit Niedertemperatur-Wärmequellen (NT) versorgt werden, wobei gegebenenfalls Wärmepumpen die Wärme auf ein erforderliches Temperaturniveau anheben können. Umgekehrt sollten Energieträger mit hohem Exergiegehalt [3], wie Strom, Biomasse oder Gase, vorzugsweise für Hochtemperaturanwendungen (HT) bzw. für den Einsatz in Effizienztechnologien wie Wärmepumpen oder KWK-Anlagen reserviert werden. Angesichts hoher Energiepreise und perspektivisch steigender CO₂-Preise sind Energieeffizienzmaßnahmen über den Lebenszyklus betrachtet häufig wirtschaftlich attraktiv, wenngleich

sie nicht immer die Erwartungen von Unternehmen hinsichtlich kurzer Amortisationszeiten erfüllen.

2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

Durch die möglichst weitgehende Erschließung erneuerbarer Wärmequellen vor Ort können die eigenen lokalen Potenziale genutzt werden. Die dabei in Frage kommenden Technologien unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht, so dass deren Entwicklung eine detaillierte, einzelbetriebliche Untersuchung vor Ort inklusive der Analyse unternehmensspezifischer Lastprofile sowie ggf. des Ausbaus von Transportinfrastrukturen für die Zuleitung von erneuerbarem Strom erfordert. Für die Technologieoptionen

- Solarkollektoren (konzentrierend und nicht-konzentrierend),
- Geothermie (tief und oberflächennah in Kombination mit Wärmepumpen),
- Umgebungswärme (in Kombination mit Wärmepumpen),
- Abwärme (direkt und mit Wärmepumpen),

werden im Folgenden die wichtigsten Charakteristika beschrieben.

Mit Hilfe der *Solarthermie* können insbesondere in größeren Freiflächenanlagen (ab ca. 1.000 m²) auch im mitteleuropäischen Raum Prozesstemperaturen von bis zu 120°C (nicht-konzentrierend) bzw. 300°C (konzentrierend) zu wirtschaftlich attraktiven Gestehungskos-

ten (ca. 50 €/MWh_{th}) erzeugt werden. Es handelt sich um eine kurzfristig verfügbare Technologie zur Einsparung fossiler Brennstoffe, die allerdings ausreichende Freiflächen erfordert und aufgrund des schwankenden Dargebots i.d.R. durch Wärmespeicher und Backup-Systeme ergänzt werden muss. Besonders attraktiv ist diese Technik für Unternehmen, die Produktionsspitzen im Sommer haben (z.B. Getränkeindustrie) und in Kombination mit solarer Kühlung über Absorptions- bzw. Adsorptionskältemaschinen.

Die *Tiefengeothermie* wird heute vorrangig zur Fernwärmebereitstellung (beispielsweise im Raum München) und somit zumindest indirekt auch teilweise zur Prozesswärmeerzeugung eingesetzt. Laut Bundesverband Geothermie können lokal in ganz Deutschland Temperaturen bis zu 140 °C – und an geeigneten Standorten auch darüber hinaus – bereitgestellt werden. Er schätzt das technische geothermische Potenzial auf 130 bis 150 TWh, was einem Viertel des industriellen Nutzwärmebedarfs entspricht [4]. Auch wenn die Potenziale grundsätzlich vielversprechend sind, steht die konkrete Entwicklung durch Industrieunternehmen (beispielsweise das Projekt „Kabel Zero“ in der Papierindustrie [5]) oder Energieversorger jedoch noch am Anfang und wird insbesondere durch Fündigkeitsrisiken, hohe Investitionen und behördliche Restriktionen ausgebremst. Den hohen Investitionskosten stehen Vorteile wie dauerhaft niedrige Betriebskosten – im Wesentlichen für Pumpstrom – sowie eine grundlastfähige Wärmebereitstellung entgegen.

Die *oberflächennahe* Nutzung der *Geothermie* – oder alternativ die Nutzung von *Umgebungswärme* (aus Umgebungsluft, See-, Fluss- oder Meerwasser) – in Kombination mit *elektrischen Wärmepumpen (WP)* ist im Bereich der Raumwärmebereitstellung bereits eine etablierte Klimaschutztechnologie und grundsätzlich auch für Prozesswärme bis ca. 80°C mit konventionellen WP, bis ca. 100°C mit Hochtemperatur-WP und bis ca. 200°C mit Höchsttemperatur-WP realisierbar. Sowohl die Effizienz (Jahresarbeitszahl, JAZ ca. 200 bis 500 %) als auch der Technologiereifegrad (TRL ca. 6 bis 9) von Wärmepumpen nimmt mit zunehmender Senkentemperatur bzw. Temperaturhub ab. Mit einer Kaskadierung mehrerer Wärmepumpen können auch für

hohe Temperaturen effiziente JAZ erreicht werden, allerdings zu höheren Investitionskosten. Bei Dampfanwendungen kann alternativ das Temperatur- und Druckniveau mit elektrischen Brüdenverdichtern weiter erhöht werden. Wärmepumpen mit noch höheren Systemtemperaturen bis zu 300°C befinden sich noch im Labormaßstab (z.B. CoBra-Projekt der DLR [6]).

Unvermeidbar anfallende industrielle, gewerbliche oder kommunale Abwärme sollte prozess- oder betriebsintern genutzt oder Dritten extern zur Verfügung gestellt werden. Sofern das Temperaturniveau für eine direkte Abwärmenutzung nicht ausreicht, kann auch hier mit Hilfe von Wärmepumpen die Temperatur auf ein geeignetes Niveau angehoben werden. Laut einer Studie zu Großwärmepumpen ließe sich in Deutschland in Summe aus Umweltwärme (exklusive Umgebungsluft) und Abwärme über Wärmepumpen ein tech-

nisches Wärmepotenzial von 1.571 TWh erschließen, welches im Temperaturbereich bis 200°C sowohl deutlich über den gesamtdeutschen Wärmebedarf von ca. 1.070 TWh als auch über den industriellen Prozesswärmebedarf von 199 TWh hinausgeht [7].

3. Elektrifizierung

Die Strategie der *Elektrifizierung* - auch *Power-to-Heat (PtH)* genannt - stellt ebenfalls einen großen Hebel zur Dekarbonisierung dar. Hier ist zu unterscheiden zwischen der Querschnittstechnologie zur *Dampferzeugung* mit Wärmepumpen (Wirkungsgrad zwischen 200 % und 500 % je nach Temperaturhub, s.o.), Elektro- bzw. Elektrodenkessel (Wirkungsgrad ca. 98 %) sowie der *prozess-technischen Elektrifizierung* durch verschiedene technisch-physikalische Verfahren wie Widerstands-Erwärmung, induktive, konduktive, dielektrische sowie Infrarot-, Plasma- oder Lichtbogen-Verfahren.

Viele dieser Verfahren sind marktreif (TRL = 9) und hinsichtlich Effizienz, Regelbarkeit und Produktqualität anderen, auf Verbrennung basierenden Verfahren überlegen. Sie werden daher bereits standardmäßig insbesondere im Hochtemperaturbereich z.B. bei der Sekundärstahlerzeugung, der Metallverarbeitung oder bei der Glasschmelze eingesetzt. Hier sind noch Ausweitungen der Elektrifizierungsanteile etablierter Verfahren sowie Einführung neuer PtH-Technologien (z.B. Mikrowelle oder Plasmatechnologie) zu erwarten. Eine Umstellung von gasbasierter auf elektrische Wärmeerzeugung bedarf unter Umständen eines nicht unerheblichen Ausbaus elektrischer Infrastrukturen wie Leitungen und Transformatoren.

4. Alternative Energieträger

Alternative Energieträger stehen kurzfristig (synthetische, erneuerbare Gase) bzw. lang-

Werbeanzeige entfernt

fristig (Biomasse/Biogas) nur eingeschränkt zur Verfügung und sollten daher aus Ressourcenschutz- und Effizienzgründen vorwiegend nur für Hochtemperaturanwendungen und dort auch nur dann zum Einsatz kommen, wenn die oben genannten Optionen technisch oder wirtschaftlich nicht oder nur teilweise ausgeschöpft werden können.

Bei der *Biomasse* und auch bei *Biogas*en sind die auf nationaler und globaler Ebene nachhaltig verfügbaren Potenziale begrenzt und stehen zudem nachfrageseitig unter hohem Konkurrenzdruck aus anderen Sektoren, z. B. in Form von stofflicher Nutzung im Bau, in der Grundstoffchemie sowie zur Treibstoffherzeugung im Luftverkehr.

Als *synthetische, erneuerbare Gase* (und teils auch Flüssigkeiten) sind insbesondere Wasserstoff und dessen Derivate (Ammoniak, Methanol) sowie synthetisches Erdgas (SNG = Synthetic Natural Gas) von Bedeutung. Sie werden im einfachsten Fall (H_2) mittels erneuerbaren Stroms und Elektrolyse aus Wasser hergestellt und ggf. in weiteren Schritten veredelt bzw. transportfähig gemacht (z.B. als Kohlenwasserstoffe). Obwohl das theoretische Erzeugungspotenzial auf globaler Ebene – insbesondere in den Sweet Spots der Erde mit hoher Solarstrahlung und hohen Windgeschwindigkeiten – nahezu unbegrenzt erscheint, ist unsicher, ob und wie schnell ausreichende Mengen importierter und inländisch produzierter erneuerbarer Synthesegase zur Verfügung stehen werden.

In der Hochlaufphase ist zudem davon auszugehen, dass grüner Wasserstoff zunächst prioritär stofflich z.B. in Form von Ammoniak oder Methanol genutzt würde und daher möglicherweise für Prozesswärme nicht verfügbar wäre. Weitere Nachteile bei diesen Energieträgern sind die bei der energetischen Nutzung als Wärme – über die gesamte Kette von der Erzeugung (aus Strom) über den Transport bis hin zur Nutzung betrachtet – hohen Umwandlungsverluste z.B. von ca. 37 % bei H_2 und 50% bei SNG sowie die Unsicherheiten bei zukünftigen Bezugspreisen.

Diskussion und Fazit

Die Stufen des hier vorgestellten 4-Stufen-Modells bilden Prüfschritte ab, die einzelne Industrieunternehmen individuell durch-

laufen können. Die Priorisierung dieser Schritte folgt einem gesamtsystemischem Effizienzansatz (Efficiency First) und berücksichtigt die teils hohen Umwandlungsverluste einzelner Energieträger und Technologien sowie begrenzte Ressourcenverfügbarkeiten innerhalb und zwischen den Sektoren. Es sei jedoch betont, dass Standortfaktoren sowie prozesstechnische Anforderungen individuell zu abweichenden Ergebnissen führen können. Zudem impliziert dieser Ansatz nicht notwendigerweise eine auf Unternehmensebene wirtschaftlich optimale Lösung und erhebt nicht den Anspruch, eine einzelbetriebliche Untersuchung ersetzen zu können.

Zudem bildet das 4-Stufen-Modell nicht sämtliche Einflussfaktoren und Voraussetzungen in allen Branchen ab. Z.B. spielt die in Abb. 1 beinhaltete thermische Nutzung von Reststoffen und Beiprodukten aus der Produktion bereits heute in der Papier- und Chemieindustrie eine bedeutende Rolle. Diese Stoffe sollten aus dem Blickwinkel der Ressourceneffizienz auch zukünftig genutzt werden. Darüber hinaus kann die Erweiterung der Perspektive um zusätzliche Aspekte wie eine mögliche Bereitstellung negativer Emissionen der Industrie durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CCS aus gesamtsystemischer Sicht zu stellenweise vom 4-Stufen-Modell abweichenden Einschätzungen führen (vgl. den vorstehenden Artikel von Georg Holtz et al. in dieser „et“).

Grundlegend bildet das 4-Stufen-Modell jedoch eine Richtlinie für einen effizienten Umgang mit begrenzten erneuerbaren Energien und Ressourcen. Die Politik sollte daher die Rahmenbedingungen dahingehend setzen, dass idealerweise die im 4-Stufen-Modell beschriebene Priorisierung auch auf Unternehmensebene möglichst zu ökonomisch tragfähigen Versorgungslösungen führt.

Anmerkungen

- [1] AGE (2022): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland – Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken: Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2020 und 2021. https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/01/AGEB_21p2_V3_20221222.pdf

- [2] IN4climate.NRW (Hrsg.) (2021): Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme. Gelsenkirchen. www.energy4climate.nrw/service/publikationen
- [3] Exergie ist in der Thermodynamik als derjenige (von den Umgebungsbedingungen abhängige) Anteil der Energie definiert, der in einem idealen (verlustfreien) System zur Abgabe von Arbeit in der Lage ist. Für Wärme ist der Exergiegehalt direkt abhängig vom Temperaturniveau im Verhältnis zum Umgebungszustand und kann als ein Maß für die Wärmequalität (Wertigkeit) angesehen werden. Beispiele für Exergiegehalte sind 7 % für Raumwärme bei 20°C, 27 % für Prozesswärme von 100°C und 79 % für Prozesswärme von 1.000°C (Umgebungszustand: 0°C).
- [4] Fraunhofer IEG et al. (2022): Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland. Bochum. www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf
- [5] Kabel ZERO-Projekt der Kabel Premium Pulp & Paper: www.kabelpaper.de/kabel-zero
- [6] DLR (2022): Hochtemperatur-Wärmepumpe CoBra – Technologien für CO₂-arme Industrieprozesse: Prozesswärme aus erneuerbaren Quellen. <https://event.dlr.de/hmi2022-energie/hochtemperatur-waermepumpe-cobra>
- [7] Agora Energiewende und Fraunhofer IEG 2023: Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie. www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/roll-out-von-grosswaermepumpen-in-deutschland

D. Schüwer und G. Holtz, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Kontakt:

dietmar.schuewer@wupperinst.org

Hinweis

Dieser Artikel sowie die darauf beruhenden Erkenntnisse wurden im Rahmen des vom Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE) geförderten Forschungsprojekts „SCI4climate.NRW“ erarbeitet.