

Transformation in der Industrie: Herausforderungen und Lösungen für erneuerbare Prozesswärme

Der Beitrag stellt Ergebnisse aus der „AG Industrielle Prozesswärme“ des Thinktanks IN4climate.NRW in Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Kompetenzzentrum Sci4Climate.NRW vor. Hier wurde in einem mehrjährigen Stakeholder-Prozess unter Einbindung von Wissenschaft, Politik und Unternehmen der energieintensiven Industrie in NRW ein Diskussionspapier entwickelt, welches in einem „Vier-Stufen-Modell“ eine aus gesamtsystemischer Sicht optimale Vorgehensweise zur Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung industrieller Prozesswärme aufzeigt [1], [2]. Flankierend werden über die Koautor:innen Technologie-Beispiele innerhalb des „Vier-Stufen-Modells“ aufgezeigt.

Im Jahr 2020 wurden mit 657 Terawattstunden (TWh) rund 28 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs im Industriesektor verbraucht. Davon entfallen wiederum mit 440 TWh zwei Drittel auf die industrielle Prozesswärme. Somit wurden rund 19 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs für industrielle Prozesswärme eingesetzt. Davon basiert mit 6 % (26 TWh) bisher nur ein Bruchteil auf erneuerbaren Energien. Weitere 8 % (34 TWh) werden aus Strom erzeugt, der zumindest mittelfristig das Potenzial zur vollständigen Dekarbonisierung hat. Die Industrie steht daher vor der gewaltigen Aufgabe, bis spätestens 2045, und somit innerhalb weniger

Jahrzehnte, die übrigen mindestens 86 % fossile industrielle Prozesswärmeerzeugung zu dekarbonisieren bzw. defossilisieren.

Die technischen Optionen in Form von erneuerbaren Wärmequellen (konzentrierende und nicht-konzentrierende Solarkollektoren, Geothermie und Umgebungswärme in Kombination mit Wärmepumpen), Abwärme, erneuerbarem Strom, Biomasse (inkl. Biogase) sowie alternativen Energieträgern (insbesondere Wasserstoff und synthetisches Methan) sind grundsätzlich am Markt verfügbar (► *Abbildung 1*). Gleichwohl besteht noch Forschungsbedarf zu einzelnen Technologien wie z. B. Hochtemperatur-Wärmepumpen oder -Wärmespeichern und insbesondere zur (hybriden) Integration verschiedener Wärmeerzeuger in industrielle Prozesse.

Dabei ist zu beachten, dass nicht alle erneuerbaren Energieträger und -Technologien an jedem Ort und zu jeder Zeit zur Verfügung stehen und sie eventuell auch nicht für jedes Temperaturniveau und jeden Anwendungsbereich (Prozesse, Branchen) technisch einsetzbar sind. ► *Abbildung 2* ordnet beispielhaft die Energieträger Geothermie (bis ca. 180 °C), Solarthermie (nicht-konzentrierend bis ca. 120 °C, konzentrierend bis ca. 400 °C), Biomasse (bis ca. 500 °C) sowie erneuerbarer Strom und Gase (bis über 1.500 °C) verschiedenen industriellen Prozessen unterschiedlicher Branchen zu.



Wuppertal Institut
Dietmar Schüwer
dietmar.schuewer@wupperinst.org

DLR
Dr. Thomas Bauer
thomas.bauer@dlr.de

Dr. Tobias Hirsch
tobias.hirsch@dlr.de

Fraunhofer ISE
Dr. Peter Nitz
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

IN4climate.NRW
Tania Begemann
tania.begemann
@energy4climate.nrw

Dr. Stefan Herrig
stefan.herrig@energy4climate.nrw

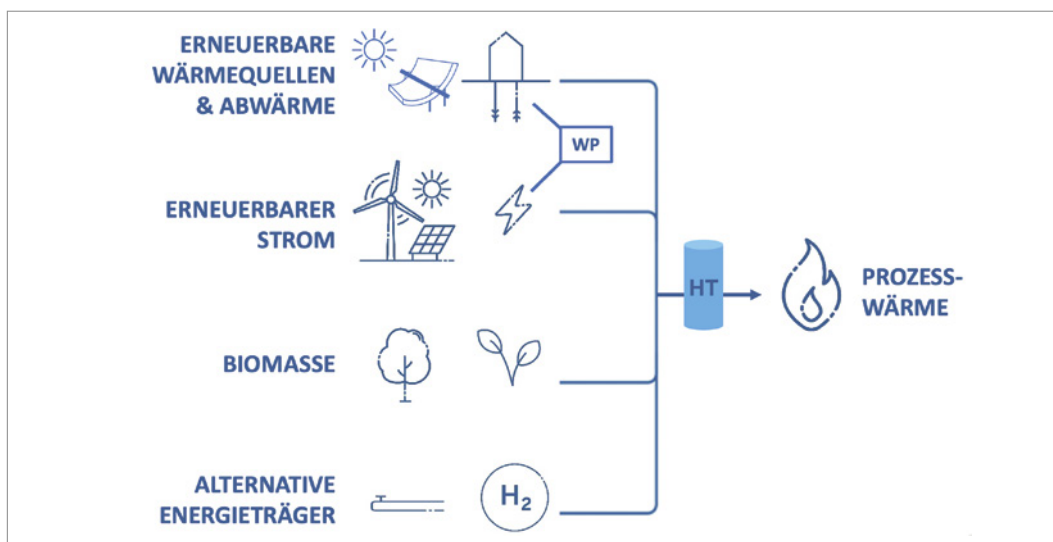
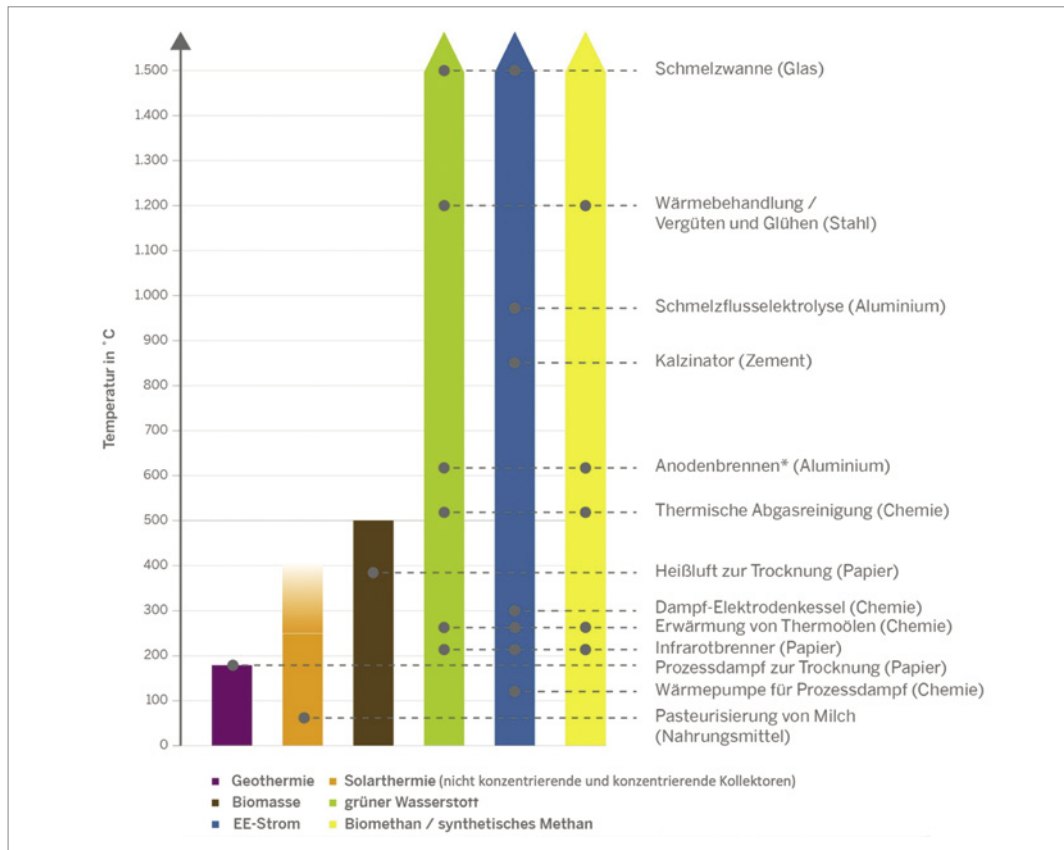


Abbildung 1

Technische Optionen zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

WP: Wärmepumpe,
HT: (Hochtemperatur-) Wärmespeicher
(Grafik: IN4climate.NRW, eigene Ergänzungen)

Abbildung 2
**Erneuerbare Wärme:
 erzielbare Tempera-
 turen und potenzielle
 Einsatzbereiche**
 (Grafik: IN4climate.NRW,
 eigene Ergänzungen)



Angesichts der anstehenden Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme steht daher jedes Unternehmen perspektivisch vor der Herausforderung, für seine Prozesse technisch, potenziell, ökologisch und ökonomisch geeignete erneuerbare Erzeugungsstrukturen zu entwickeln. Dies erfordert i. d. R. eine detaillierte, einzelbetriebliche Untersuchung der erneuerbaren Erzeugungs- und Anwendungsoptionen vor Ort inklusive der Analyse des Aus- und Aufbaus von Transportinfrastrukturen für die Zuleitung von erneuerbarem Strom, Gasen und Fernwärme. Das in diesem Beitrag vorgestellte 4-Stufen-Modell kann diese Einzelanalyse nicht ersetzen, jedoch eine wichtige Handreichung sein auf dem Weg zur Transformation industrieller Prozesswärme von fossilen zu erneuerbaren Energien.

Das 4-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

Das 4-Stufen-Modell zeigt eine aus gesamtsystemischer Sicht optimale Vorgehensweise zur Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung industrieller Prozesswärme auf. Es besteht aus der Priorisierung dieser vier Schritte (► **Abbildung 3**):

1. Steigerung der Energie- und Exergieeffizienz
2. Erschließung erneuerbarer Wärmequellen

3. Elektrifizierung

4. Nutzung alternativer Energieträger

Übergeordnetes Ziel dieser Strategie ist es, den Energie- und Ressourcenverbrauch (inkl. vorgelagerter Erzeugungsketten) insgesamt zu minimieren, die Potenziale lokaler erneuerbarer Wärmequellen möglichst weitgehend zu erschließen und die Knappheit von teuren und nachhaltig begrenzt verfügbaren Energieträgern zu berücksichtigen. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Schritte der vierstufigen Kaskade eingegangen.

Stufe 1: Effizienz

Die erste Stufe spiegelt den Grundsatz „Efficiency First“ wider. Dies umfasst sowohl Dämmmaßnahmen zur Begrenzung der Abwärmeverluste, effiziente Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als auch die Optimierung von Prozessen inklusive prozess- oder betriebsinterner Wärmerückgewinnung (aus Rauchgasen, Abwässern, Umgebungsluft und Strahlungswärme). Sind die internen Abwärmepotenziale ausgereizt, so sollte geprüft werden, inwieweit die dann noch unvermeidlich entstehende Abwärme an externe Dritte geliefert werden kann.

Der Aspekt der Effizienz bezieht sich hierbei nicht nur auf die klassischerweise betrachtete Energieeffizienz, sondern auch auf die Exergieeffizienz. Während die Energieeffizienz sich auf die Quantität der Wärme

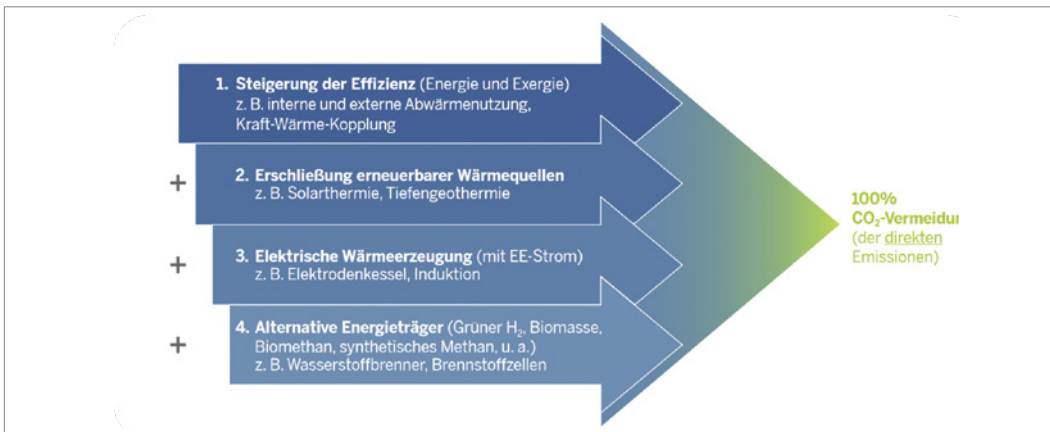


Abbildung 3

Das 4-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

(Grafik: IN4climate.NRW)

bezieht, beschreibt die Exergieeffizienz den effizienten Umgang mit der Qualität der Wärme. Der Exergiegehalt der Wärme ist abhängig vom Temperaturniveau (im Verhältnis zum Umgebungszustand). Zentrale Aufgabe ist es daher, wie in ► *Abbildung 2* angedeutet, für den jeweiligen Anwendungszweck temperaturangepasste Wärmeerzeugungslösungen einzusetzen. Niedertemperatur-Wärmequellen (NT) werden daher für Niedertemperaturanwendungen eingesetzt und dabei ggf. mit Unterstützung von Wärmepumpen auf ein geeignetes Temperaturniveau gebracht. Wertvolle Energieträger mit hohem Exergiegehalt wie Strom, Biomasse oder Gase sollten möglichst auf Hochtemperaturanwendungen (HT) bzw. auf den Einsatz in Wärmepumpen oder KWK-Anlagen beschränkt sein.

Die industrielle Abwärmenutzung ist ein zentraler Hebel zur Dekarbonisierung der Nah- und Fernwärme¹ und rückt zunehmend auch in den politischen Fokus hinsichtlich der Formulierung von Ausbauzielen und finanzieller Förderung². Hier müssen in den kommenden Jahren sowohl von Seiten der Industrieunternehmen als auch von Seiten der Energieversorger die gemeinsamen Anstrengungen zur Hebung der vorhandenen großen Potenziale erheblich verstärkt werden. Szenarienanalysen zeigen dabei, dass insbesondere in einem zukünftigen Klimaschutzpfad mit Fokus auf einer Direkt-Elektrifizierung bei der Industrie auch Auswirkungen auf die Abwärmenutzung zu erwarten sind. In ► *Tabelle 1* sind beispielhaft mögliche Wechselwirkungen zwischen der Industriedekarbonisierung und der industriellen Abwärmenutzung skizziert.

Stufe 2: Erneuerbare Wärme

Während die Eigenstromerzeugung mit Photovoltaik in den letzten Jahren eine große Dynamik entfaltet hat, ist die Erschließung lokaler erneuerbarer Wärmepotenziale wie Solarthermie und Geothermie für viele Unternehmen noch Neuland. Gerade mit Blick auf die durch den russischen Angriffskrieg hervor-

gerufene Energie- und Energiepreiskrise werden die zentralen Vorteile dieser Wärmequellen, nämlich ihre Unabhängigkeit von Energiepreisen und Energieimporten, deutlich.

Mit der Tiefengeothermie und der solaren Prozesswärme rücken mittlerweile zwei Technologien, die bisher eher in der städtischen Fernwärmeversorgung (z. B. im Raum München) bzw. im Sonnengürtel der Erde zum Einsatz kamen, verstärkt auch für die industrielle Anwendung in Mitteleuropa in den Fokus.

- **Tiefengeothermie**
Ein Papierhersteller in Hagen plant für seine Papiertrocknung eine der deutschlandweit ersten industriellen Tiefengeothermie-Anwendungen³. Hier soll geothermische Wärme aus ca. 3.000 bis 4.000 Meter Tiefe in der Grundlast perspektivisch ca. 40% des heutigen Erdgasbedarfes ersetzen und dadurch 30.000 Tonnen CO₂ einsparen (► *Abbildung 4*).
Die Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland schätzt das technische geothermische Potenzial für den industriellen Wärmebedarf (inkl. Raumwärme) grob auf 130 bis 150 TWh bzw. auf bis zu einem Viertel des industriellen Nutzwärmebedarfs ab [4, S. 17, 25].
- **Solarwärme für Industrieprozesse (nicht-konzentrierende und konzentrierende Solarthermie)**
Die solarthermische Wärmebereitstellung wurde in Deutschland bislang vor allem mit nicht konzentrierenden Kollektoren für die Brauchwassererwärmung oder Prozesswärme bis etwa 120°C eingesetzt. Dafür existieren etablierte Kollektortechnologien für unterschiedliche Zieltemperaturen, wobei Prozesswärmeanwendungen aufgrund der bislang sehr geringen fossilen Wärmekosten noch nicht sehr verbreitet sind. Einige wenige Anlagen existieren, in denen konzentrierende Kollektoren für die Erzeugung von Wärme oberhalb von 150°C eingesetzt

Tabelle 1
Mögliche Auswirkungen der Industriedekarbonisierung auf die Nutzung industrieller Abwärme
 (Quelle: Wuppertal Institut)

Indikator	Auswirkungen	Tendenz Abwärmepotenzial
1. Produktwechsel	<ul style="list-style-type: none"> Phase-out fossiler Produkte (z.B. Heizöl, Benzin) 	↓
2. Prozesswechsel	<ul style="list-style-type: none"> Phase-out abwärmeintensiver Prozesse (z.B. Ersatz Hochofenroute durch H₂-DRI) 	↓
3. Elektrifizierung	<ul style="list-style-type: none"> Erhebliche Effizienzverbesserung (bessere Dosierung, keine Abgase, Bsp.: elektr. Kalzinator) Erhöhter Bedarf an Flexibilisierung (Strom schlechter speicherbar als Brennstoffe), aber gleichzeitig auch Potenzial für Flexibilisierung (PtH mit Wärmespeicher) 	↘
4. PtX	<ul style="list-style-type: none"> Gewisse Effizienzverbesserung im Bereich der Energienachfrage (Synthese angepasster und sauberer Brennstoffe) Ansonsten tendenziell eher gleichbleibende Abwärmeströme hinsichtlich Menge und Temperatur Aber: bei H₂-Produktion (Elektrolyse) sowie Bereitstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe (Methanol-Synthese, Fischer-Tropsch-Prozess) möglicherweise hohe zusätzliche Abwärmemengen 	↘ → ↑
5. iCCS/CCU-Route	<ul style="list-style-type: none"> Effizienzverluste (je nach Prozess höherer Dampf- oder Strombedarf) bzw. Nutzung (bisher ungenutzter) interner Abwärmeströme anstelle von Abwärmeabgabe an Dritte (z.B. Post-Combustion-CCS) Ansonsten etwa gleichbleibende Abwärmeströme hinsichtlich Menge und Temperatur 	↘ →

iCCS: industrielles Carbon Capture and Storage, CCU: Carbon Capture and Usage, DRI: Direct Reduced Iron

werden. Hintergrund war die landläufige Auffassung, dass konzentrierende Solarkollektoren nur in den sonnenreichen Regionen der Erde sinnvoll einzusetzen sind. Diese Sichtweise befindet sich aktuell im Umbruch, da in den letzten Jahren gezeigt werden konnte, dass der flächenspezifische Ertrag konzentrierender Kollektoren auch schon bei moderaten Betriebstemperaturen den von Flach- bzw. Vakuumröhrenkollektoren übersteigt, wie in [Abbildung 5](#) zu sehen ist. Da die spezifischen Kollektorkosten in größeren Solarfeldern in ähnlicher Höhe liegen, ist davon auszugehen, dass sich die Wirtschaftlichkeit konzentrierender Kollektoren gegenüber Flach- und Vakuumröhren-Kollektoren bereits ab einer mittleren Kollektortemperatur von ca. 80°C einstellt. Bei höheren Betriebstemperaturen ermöglicht die Konzentration erst die effiziente Energiebereitstellung.

Aktuell sind erste kommerzielle Anlagen in Mitteleuropa in Betrieb und weitere in Planung, bei denen Industriebetriebe mit Wärme bei bis zu 300°C mit konzentrierenden Kollektoren beliefert werden. Ein Beispiel ist eine 2,5 MW_{th}-Prozesswärmeanlage im belgischen Turnhout, die einen Temperaturhub von 260°C auf 300°C für den Industriekunden bereitstellt. Mit der ca. 5.000 m² großen Kollektorfläche werden so 430 Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart. Die umfangreiche Zahl geplanter Projekte zeigt, dass sich für die konzentrierende Solarthermie ein kommerzieller Anwendungsfall auch im mitteleuro-

päischen Klima darstellen lässt. Entwicklungsthemen der nächsten Jahre werden neben der Kostensenkung vor allem der vollautomatische Betrieb und die Betriebsüberwachung sein.

Stufe 3: Elektrifizierung

Der Teil der Prozesswärme, der nicht durch rückgewonnene Wärme (Stufe 1) oder durch lokale erneuerbare Wärmepotenziale (Stufe 2) gedeckt werden kann, sollte möglichst elektrifiziert werden. Die direkte Elektrifizierung (= direkte Nutzung von erneuerbarem Strom zur Wärmeerzeugung) ist im Vergleich zur indirekten Elektrifizierung (= Power-to-Gas-to-Heat, d.h. Umwandlung von Strom in Gase und dann Verbrennung) mit deutlich weniger Wirkungsgradverlusten in der Erzeugungs- und Umwandlungskette verbunden ([vergl. Abbildung 6 in Stufe 4](#)).

Neben der eigentlichen **Elektrifizierung**, d.h. der Umstellung der technischen Wärmeerzeugungsverfahren sowie deren Energieträger von Brennstoffen (Gas, Öl, Kohle, Biomasse und abfallbasierte Brennstoffe) auf Strom, spielen zukünftig die **Flexibilisierung** und **Hybridisierung** eine zentrale Rolle, um flexibel auf Preisschwankungen vorrangig der Energieträger Strom und Gas reagieren zu können und um die Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Stromquellen zu verbessern.

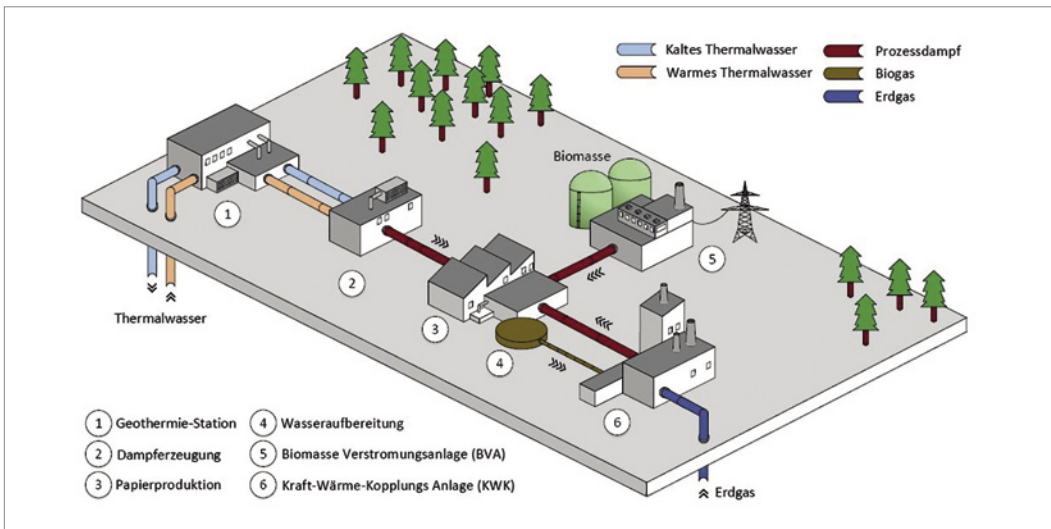


Abbildung 4
Hydrothermale Geothermie (23,5 MW_{th}) zur Papiertrocknung
 (Quelle: Kabel Premium Pulp & Paper, Grafik: Fraunhofer UMSICHT)

Als Flexibilisierung kann die Bereitstellung von thermischem oder elektrischem Lastverschiebungspotenzial durch Einsatz regelbarer Verbraucher, Erzeuger und/oder Speicher (thermisch, elektrisch, stofflich) verstanden werden.

Hybridisierung bedeutet die Erweiterung der Wärmeerzeugungskapazität durch parallele oder serielle technische Anlagen (Öfen, Brenner, Dampferzeuger, Heizstäbe...) oder aber ein Energieträgerwechsel bei gleichbleibender Kapazität (z. B. Fuel Switch von Öl oder Gas auf erneuerbare Wärme und Strom).

Als physikalisch-technische Elektrifizierungsverfahren für industrielle Wärmeprozesse stehen die Widerstandserwärmung, die induktive Hochfrequenz- und die konduktive Erwärmung (für metallische Leiter), die Dielektrische Hochfrequenzenerwärmung (Mikrowellenerwärmung für Nichtleiter wie Textilien, Holz oder Lebensmittel) sowie Infrarot-, Lichtbogen- und Plasma-Verfahren in jeweils unterschiedlichen Reifegraden (TRL-Level) zur Verfügung [5, S. 54 ff.].

Besondere Relevanz als Querschnittstechnologie

haben die Elektro- und Elektrodenkessel zur Erzeugung von Dampf bis ca. 240 °C bzw. bis ca. 500 °C mit elektrischem Dampfüberhitzer sowie die besonders effizienten Hochtemperatur-Wärmepumpen bis ca. 150 °C [6, S. 235]. Sie sind in der Lage, industrielle Niedertemperatur-Abwärme (ca. 20 bis 100 °C) aus Kühl- und Abwässern, Druckluftkompressoren oder Abluft aus Verbrennungseinrichtungen auf ein höheres, für die Dampferzeugung nutzbares Temperaturniveau zu heben. Durch eine anschließende Dampfkompensation können die Temperaturen bei Bedarf weiter erhöht werden.

Potenzielle Wärmesenken sind beispielsweise Verdampfungs- (40 ... 170 °C) und Trocknungsprozesse (40 ... 250 °C) sowie Verfahren wie Pasteurisieren und Sterilisieren (70 ... 120 °C) oder Destillieren (100 ... 300 °C). Für die Anwendung von HT-Wärmepumpen sind daher insbesondere die Branchen Nahrungsmittel, Chemie und Pharmazie, Papier, Maschinenbau, Textil, Metallerzeugnisse, Metalle und Mineralien geeignet. [7].

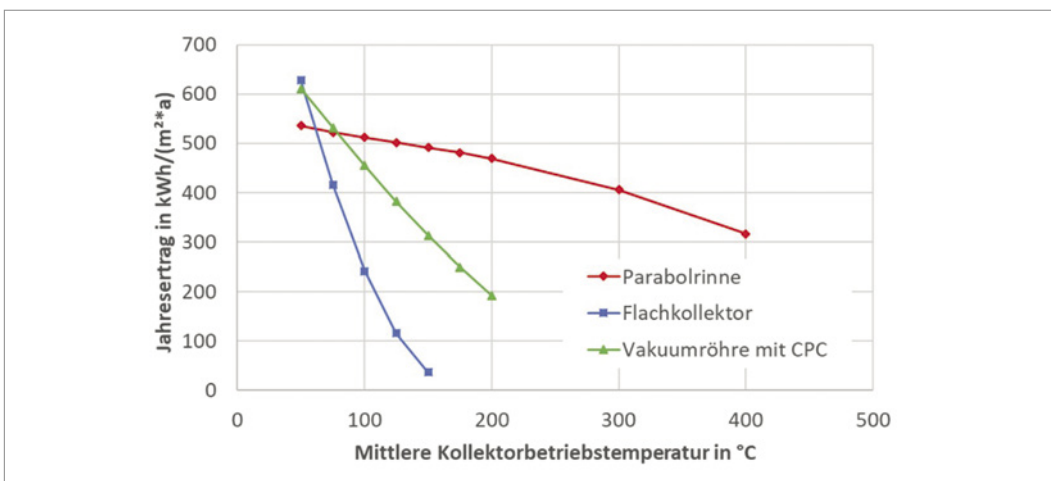


Abbildung 5
Solarthermie:
 Spezifische Erträge verschiedener Technologien (Standort Potsdam)
 (Grafik: D. Krüger et al., Quelle: DLR, Fraunhofer ISE)

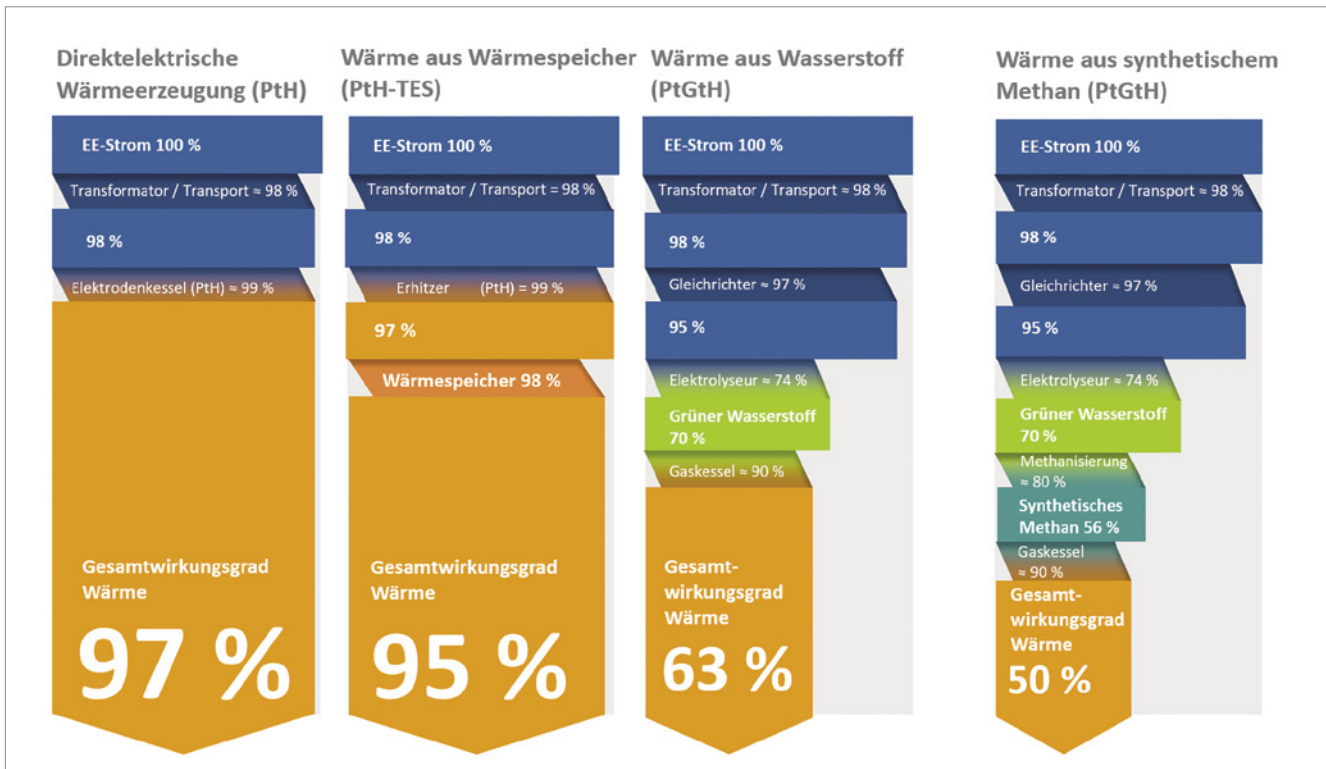


Abbildung 6

Vergleich von Wirkungsgradketten:

• **Power-to-Heat**

(mit und ohne Hochtemperaturspeicher)

• **Power-to-Gas**

(Wasserstoff und synthetisches Methan)

(Grafik: IN4climate.NRW mit eigenen Ergänzungen, Quelle: PtH-TES: DLR)

Bei der Elektrifizierung (Power-to-Heat – PtH) bietet sich die Kombination mit thermischen Energiespeichern an, die im nächsten Abschnitt vergleichend zu Power-to-Gas (PtG) diskutiert wird.

Stufe 4: Alternative Brennstoffe

Der Einsatz von alternativen Brennstoffen ist herausfordernd und sollte daher nach dem „Vier-Stufen-Modell“ als letzte Option betrachtet werden. Neben der energetischen Nutzung von Biomasse und Biogas im Bereich Prozesswärme gibt es weitere konkurrierende Nutzungsmöglichkeiten (z. B. stoffliche Nutzung im Bau oder in der Grundstoffchemie oder als Treibstoff im Flugverkehr) bei gleichzeitig begrenzter Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse.

Neben biogenen Brennstoffen steht die Erzeugung von grünem Wasserstoff im Fokus. Dieser kann auch in weitere chemische Energieträger wie Methan, Methanol oder Ammoniak umgewandelt werden, die zum Teil besser handhabbar, transportierbar oder speicherbar sind. Über die gesamte Erzeugungskette betrachtet, kommt es bei der energetischen Nutzung als Wärme bei diesen Trägern jedoch zu hohen Umwandlungsverlusten. Wie ► **Abbildung 6** zeigt, vervielfachen sich diese Verluste von 3 bis 5% bei PtH (mit/ohne TES) auf 37 bis 50% bei PtGtH (mit H₂ bzw. synthetischem Methan). Bei den vorgelagerten PtG-Wirkungsgradketten sind noch für den Fall Effizienzverbesserungen denkbar, wenn Abwärme z. B. aus der Elektrolyse sinnvoll genutzt werden kann.

Thermische (Hochtemperatur-) Energiespeicher (TES)

Solange erneuerbarer Strom nicht ganzjährig in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht, sind aus ökologischer – und i. d. R. auch aus ökonomischer – Sicht die Vollastjahresstunden von PtH-Anlagen eingeschränkt. Neben der Option der Hybridisierung bzw. des Fuel-Switchs bieten sich hierbei thermische Energiespeicher (Thermal Energy Storage – TES) als Technologie an, da diese im Vergleich zu elektrischen Batterien typischerweise kostengünstiger sind. Die TES können bei hoher Verfügbarkeit von Wind- und PV-Strom beladen werden und bei Knappheit von erneuerbarem Strom Prozesswärme abgeben. Insgesamt erhöhen TES dadurch die Vollastjahresstunden zur Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbarem Strom. Das heißt, dass TES die PtH-Route (Stufe 3) stärkt, da mehr volatiler erneuerbarer Strom in die Prozesse eingekoppelt werden kann.

Neben der Prozesswärme bieten Hochtemperatur-TES zusätzlich das Potenzial, bei der Entladung neben Wärme (über Dampfauskopplung) auch Strom netzdienlich bereitzustellen. Die Möglichkeit einer kombinierten Entladung von Strom- und Wärme (bzw. Dampf) wurde beispielhaft für einen Chemiestandort aufgezeigt [8].

Fazit

Klimaneutralität erfordert auch die Transformation industrieller Prozesswärme. Dieser Wandel ist aufgrund mannigfaltiger Anwendungen, Temperatur- und Druck-Niveaus, Medien, Prozesse etc. komplex und muss gesamtsystemisch – d. h. sektor-, stakeholder- und branchenübergreifend – angegangen werden. Das hier vorgestellte Vier-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme kann dabei eine gute Hilfestellung für die aus gesamtsystemischer Sicht optimale Priorisierung des Energieeinsatzes darstellen.

Bei der Entwicklung erneuerbarer Wärmepotenziale können die Tiefengeothermie und die Solarthermie für einige Branchen und Nieder- und Mitteltemperatur-Anwendungen wichtige Beiträge leisten. Hier sind individuelle, temperaturangepasste und ggf. auch hybride Lösungen aus Kombinationen verschiedener Technologien und eine frühzeitige Evaluierung möglicher lokaler Wärmequellen von zentraler Bedeutung.

Durch Sektorenkopplung (KWK, PtH und PtG) und Hybridisierung können aus der Industrie wichtige Beiträge zur Systemintegration von erneuerbarem Strom und zur Stabilisierung der Stromnetze geleistet werden.

(Hochtemperatur-)Wärmespeicher sind ein Schlüsselement, um erneuerbare Energiepotenziale besser auszuschöpfen, Systemkosten zu minimieren und Systemdienstleistungen zu erbringen.

Auch wenn viele der genannten Technologien schon marktreif oder marktnah zur Verfügung stehen, bedarf es zur weiteren Effizienzverbesserung und Kostensenkung noch Forschung und Entwicklung in diesen Bereichen:

- vollständige oder teilweise Elektrifizierung (inkl. HT-Wärmepumpen)
- Solarthermie (inkl. konzentrierender Systeme)
- Einsatz von grünem Wasserstoff, biogenen und anderen alternativen Brennstoffen
- (Hochtemperatur-)Wärmespeicher
- Systemintegration

Literatur:

- [1] IN4climate.NRW (Hrsg.), „Industriewärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme.“ Gelsenkirchen, Juni 2021. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/diskussionspapier-klimaneutrale-waerme-industrie-cr-in4climatenrw.pdf
- [2] IN4climate.NRW (Hrsg.), „Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie. Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW. Düsseldorf.“ Düsseldorf, Mai 2022. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2022/prozesswaerme-fuer-eine-klimaneutrale-industrie-impulspapier-der-initiative-in4climatenrw-cr-nrwenergy4climate.pdf
- [3] AGFW (Hrsg.), „Leitfaden zur Erschließung von Abwärmequellen für die Fernwärmeversorgung“, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt a. M., Leitfaden, Nov. 2020. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.agfw.de/fileadmin/AGFW_News_Mediadateien/Energiewende_Politik/agfwleitfaden_ansicht_es.pdf
- [4] Fraunhofer IEG et al., „Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland - Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft für eine erfolgreiche Wärmewende“, Fraunhofer IEG, Bochum, Strategiepapier von sechs Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft, Feb. 2022. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf
- [5] K. Görner und D. Lindenberger, „Virtuelles Institut ‚Strom zu Gas und Wärme‘, Band II Pfadanalysen: Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht des Hauptprojekts (2015–2017)“, GWI, EWI, Essen, Köln, Juli 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2018/10/Virtuelles-Institut-SGW-Band-II-Pfadanalyse.pdf>

- [6] FZJ, GWI, RUB, WI, ZBT, „Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme NRW: Abschlussbericht Kompetenzzentrum Virtuelles Institut – Strom zu Gas und Wärme, Band IV – Optimierung, Modellierung und Scale-up von PtX – Flexibilitätsoptionen“, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, Abschlussbericht, März 2022. Zugriffen: 10. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2022/07/KoVI-SGW_Abschlussbericht-Band-IV-M%C3%A4rz-2022-final_V1.pdf
- [7] C. Arpagaus, „Wärmepumpen für die Industrie: Eine aktuelle Übersicht.“, gehalten auf der 25. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“ 26. Juni 2019, BFH Burgdorf/CH, 26. Juni 2019. Zugriffen: 14. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/projekte/projekte_tes/91_sccer-eip/arpagaus_2019_wp_tagung_2019_burgdorf_waermepumpen_fuer_die_industrie_eine_aktuelle_uebersicht.pdf
- [8] T. Bauer u. a., „Ideal-Typical Utility Infrastructure at Chemical Sites – Definition, Operation and Defossilization“, Chem. Ing. Tech., Bd. 94, Nr. 6, S. 840–851, 2022, doi: 10.1002/cite.202100164.

Fußnoten

- 1 Zu deren Entwicklung siehe auch den Abwärme-Leitfaden der AGFW [3].
- 2 Siehe z. B. die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW): www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/09/20220915-booster-fur-grune-fern-warme-bundesforderung-fur-effiziente-waermetetze-bew-startet.html oder die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft: www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/energieeffizienz_und_prozesswaerme_node.html
- 3 Kabel ZERO-Projekt der Kabel Premium Pulp & Paper: www.kabelpaper.de/kabel-zero