

Quo vadis industrielle Abwärmepotenziale?

**Eine qualitative Kurzstudie zu Auswirkungen der
Industrietransformation auf zukünftige Abwärmepotenziale**

SCI4climate.NRW steht für die wissenschaftliche Begleitung der Industrietransformation. Das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE) hat Ende 2022 das Wuppertal Institut, das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, das Institut der deutschen Wirtschaft, die VDZ Technology gGmbH und die VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI) beauftragt, Transformationspfade für den klimaneutralen Umbau der Industrie in Deutschland zu erforschen. Nordrhein-Westfalen dient dabei als Modellregion. Die Forschung baut auf den Ergebnissen des Vorgängerprojekts SCI4climate.NRW 2018-2022 auf. Die Institute stehen in engem Austausch miteinander und mit Industrie und Politik in der Initiative IN4climate.NRW.



Bibliographische Angaben

Herausgeber:	SCI4climate.NRW
Veröffentlicht:	Dezember 2025
Autor:innen:	Dietmar Schüwer, Georg Holtz, Simon Block, Alexander Scholz Wuppertal Institut
Kontakt:	dietmar.schuewer@wupperinst.org
Bitte zitieren als:	Schüwer, D.; Holtz, G.; Block, S.; Scholz, A. (2025): Quo vadis industrielle Abwärmepotenziale? - Eine qualitative Kurzstudie zu Auswirkungen der Industrietransformation auf zukünftige Abwärmepotenziale. Ein Bericht von SCI4climate.NRW.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
1 Einleitung	6
2 Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf zukünftige Abwärme potenziale	7
2.1 Veränderung der Produktionsmengen	8
2.2 Prozesswechsel (Verfahrenswechsel).....	9
2.3 Klimaneutrale Prozesswärmeerzeugung	10
2.3.1 Inkrementelle Energieeffizienzmaßnahmen	10
2.3.2 Umstellung auf erneuerbare Energieträger	10
2.4 Neue Anwendungen	15
2.4.1 Power-to-X-Synthese.....	15
2.4.2 CO ₂ -Abscheidung	18
2.4.3 Direct Air Capture (DAC).....	21
2.4.4 Rechenzentren	22
3 Zusammenfassung und Fazit.....	25
Literaturverzeichnis.....	27

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Energieträger und Technologien für eine dekarbonisierte Prozesswärmeverzeugung	11
Abb. 2-2: Auswahl relevanter erneuerbarer PtX-Produkte sowie ihrer zugehörigen Rohstoffe und Prozessketten.....	16
Abb. 2-3: Historischer und projizierter weltweiter Stromverbrauch von Datenzentren in Terawattstunden differenziert nach Ausstattungsmerkmalen	23

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Exemplarische Abwärmeentstehung bei Erdgasbeheizung und Impact im Falle einer Umstellung auf Strom oder Wasserstoff (Mittelwerte für Einzelanlagen)	14
Tab. 3-1: Einflussfaktoren und Auswirkungen der Industriedekarbonisierung auf die Nutzung industrieller Abwärme	25

1 Einleitung

Die Nutzung industrieller Abwärme ist ein wichtiger Baustein für die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung (Schüwer et al., 2024). Abwärme kann prozessintern oder betriebsintern genutzt, in andere Nutzenergieformen (Strom oder Kälte) transformiert oder aber über Wärmenetze an Dritte abgegeben werden. Für leitungsgebundene Wärme ist im **Wärmeplanungsgesetz (WPG)** festgelegt, dass im bundesweiten Mittel bis 2030 mindestens 50 % aus erneuerbaren Energien oder – gleichberechtigt dazu – aus unvermeidbarer Abwärme zu erzeugen ist (§2). Zudem muss jedes Wärmenetz bis 2030 zu einem Anteil von mindestens 30 %, bis 2040 zu mindestens 80 % (§29) und spätestens 2045 zu 100 % (§31) mit Wärme aus erneuerbaren Energien oder unvermeidbarer Abwärme gespeist werden (BMJV, 2023). Das **Energieeffizienzgesetz (EnEfG)** wiederum verpflichtet Unternehmen, die Entstehung von Abwärme möglichst zu vermeiden und unvermeidbare Abwärme intern zu nutzen oder Dritten zur externen Nutzung zur Verfügung zu stellen (§ 16) (Energieeffizienzgesetz (EnEfG), 2023). Unternehmen mit einem Gesamtenergieverbrauch von mindestens 2,5 Gigawattstunden pro Jahr müssen zudem Daten zu anfallenden Abwärmepotenzialen an die Bundesstelle für Energieeffizienz (BfEE) melden (§ 17), welche die Daten zentral aufbereitet und in der **Plattform für Abwärme (PfA)** veröffentlicht.

Für die Beurteilung *zukünftig* nutzbarer Abwärmepotenziale gilt es, die Auswirkungen der anstehenden industriellen (Prozesswärme-)Transformation auf die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von Abwärme im Blick zu behalten. Dies ist sowohl wichtig für die Frage, wie viel Abwärme zukünftig innerhalb von Unternehmen (oder in Clustern) intern – insbesondere über den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen – recycelt als auch extern an Dritte abgegeben werden kann. Ziel der nachfolgenden Kurzanalyse ist es, die relevanten Einflussfaktoren der industriellen Transformation auf die zukünftigen industriellen Abwärmepotenziale zu identifizieren, zu systematisieren und ihre Auswirkungen qualitativ zu beschreiben.

2 Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf zukünftige Abwärmepotenziale

Analysen von Klimaschutzzszenarien für Deutschland und Europa zeigen, dass für das Erreichen von Klimaneutralität ein grundlegender Umbau aller Sektoren (Energie, Verkehr, Gebäude, Industrie und Landwirtschaft) erforderlich ist (z.B. Agora Energiewende, 2019, 2023; Agora Think Tanks, 2024; Consentec et al., 2024). Die für das Erreichen von Klimaneutralität in der Industrie erforderlichen Strategien sind weitgehend bekannt und die hierfür benötigten Technologien stehen in vielen Fällen auch marktreif zur Verfügung. Zu den zentralen Strategien gehört die Umsetzung von **Energieeffizienzmaßnahmen**, eine verstärkte **interne Abwärmenutzung**, ein Umstieg auf **erneuerbare Energiequellen** sowie der Einsatz von **CO₂-Abscheidung und -Speicherung**. Neben der eigentlichen Dekarbonisierung (Umstellung auf nicht-kohlenstoffbasierte Energieträger) bzw. Defossilisierung (Umstellung auf nicht-fossile kohlenstoffbasierte Energieträger) der Prozesswärme tangieren noch eine Reihe weiterer Effekte der Energie- und Industrietransformation die industriellen Strukturen. Diese können sich aus zukünftigen **Produktionsmengenveränderungen**, **Produktwechseln**, **Prozesswechseln** sowie aus **neuen, prozesswärmerelevanten Anwendungen** ergeben.

Insgesamt werden in der vorliegenden Kurzstudie folgende Aspekte der Industrie- und Energietransformation hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung von Abwärmepotenzialen betrachtet:

- 1. Veränderung der Produktionsmengen**
 - durch Suffizienz und Energieeffizienz in der Nachfrage, Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft in der Produktion, Substitution durch andere Produkte (Produktwechsel) sowie Verlagerung der Produktion ins/vom Ausland
- 2. Prozesswechsel (Verfahrenswechsel)**
 - durch fundamentale Umstellungen von Prozessketten
- 3. Klimafreundliche Prozesswärmeverzeugung durch**
 - Energieeffizienzmaßnahmen innerhalb der Produktion (ohne Prozesswechsel, s. Punkt 2)
 - Umstellung auf erneuerbare Energieträger (ohne Prozesswechsel, s. Punkt 2)
 - Erneuerbare Wärme
 - Erneuerbarer Strom
 - Erneuerbare gasförmige, flüssige oder feste Brennstoffe
- 4. Neue Anwendungen als Abwärmequellen**
 - Power-to-X-Synthese
 - CO₂-Abscheidung aus Industrieanlagen (Carbon Capture)
 - CO₂-Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture DAC)
 - Rechenzentren¹

Nachfolgend werden die einzelnen oben dargestellten Einflussfaktoren detaillierter untersucht, ihre Wirkungsmechanismen erläutert und abschließend ihre voraussichtlichen Auswirkungen auf die zukünftige Abwärmenutzung qualitativ abgeschätzt.

¹ Rechenzentren fallen nicht unter industrielle, sondern unter gewerbliche Anwendungen, werden hier aber aufgrund ihrer hohen und voraussichtlich weiter zunehmenden Relevanz hinsichtlich ihrer Abwärmepotenziale mit betrachtet.

2.1 Veränderung der Produktionsmengen

Unter diesem Indikator können eine ganze Reihe an transformationsrelevanten Einflussfaktoren identifiziert werden wie Suffizienz, Energieeffizienz, Produktionsverlagerungen (in das oder vom Ausland), Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft sowie Substitution durch andere Produkte (Produktwechsel)².

Auf der Nachfrageseite können dies z.B. eine geringere Nachfrage durch **suffizientes** oder **energieeffizientes Verhalten** im Bereich Wohnen und Konsumieren (geringere Nachfrage nach Brennstoffen, Wohnraum oder Konsumgütern) oder Verkehr (geringere Nachfrage nach Kraftstoffen durch effizientere Fahrzeuge oder geringere Fahrleistungen) sein. Produktionsseitig hat die **Materialeffizienz**, also die Frage, mit wieviel bzw. wenig Material ein Produkt mit einer bestimmten Funktion gefertigt werden kann, ebenso Einfluss auf die Produktionsmenge wie die **Kreislaufwirtschaft** innerhalb der Produktfertigung und des Produktlebenszyklus. Eine höhere Stahlrecyclingquote führt z.B. bei der Stahlerzeugung dazu, dass die sog. Sekundärroute (Einschmelzen von Stahlschrott im Elektrolichtbogenverfahren) gegenüber der energie- und treibhausgasintensiveren Primärroute (Stahlerzeugung im Hochofen) an Bedeutung gewinnt. Suffizienz, Effizienz und Kreislaufwirtschaft werden im Rahmen der Energiesystemtransformation tendenziell steigen, sodass diese Einflussfaktoren zu einem verringerten (Primär-)Materialbedarf und somit zu einer Verringerung der Produktionsmengen und der mit der Produktion einhergehenden Abwärmemengen führen werden.

Daneben gibt es Dynamiken, deren Auswirkungen auf die Abwärmeverfügbarkeit vom Einzelfall abhängen. Bei **Produktwechseln** (Substitution von Produkten) ist letztlich entscheidend, wie groß die Abwärmepotenziale der jeweiligen Produktionsprozesse sind. Beispiele für Produktwechsel im Rahmen der Energiewende sind das Auslaufen fossiler Raffinerieprodukte wie Benzin, Diesel oder Kerosin und deren Ersatz z. B. durch Strom oder Wasserstoff oder eine (teilweise) Substitution von kunststoff- oder zementbasierten Materialien wie Verpackungen, Dämmstoffen oder Betonbauteilen durch Pflanzenfasern oder Holz. **Produktionsverlagerungen** (in das oder vom Ausland) führen zu Veränderungen in den (inländischen) Produktionsmengen von Produkten oder Zwischenprodukten und somit zu Verlagerungen der mit der Produktion einhergehenden Abwärmemengen. Prominente Beispiele sind der Einsatz von klimaneutral im Ausland hergestelltem Eisenschwamm (DRI) anstelle von eigenproduziertem Roheisen oder importiertes grünes statt eigenproduzierten Ammoniaks. Dieses Phänomen der potenziellen Verlagerung von Produktionsprozessen oder Teilen davon in Regionen mit günstigeren erneuerbaren Energieerzeugungspotenzialen wird in der Literatur auch unter dem Begriff „*Renewables Pull*“ diskutiert (Samadi et al., 2023; Verpoort et al., 2024).³

² Weitere bestimmende Faktoren wie *Wirtschaftswachstum* oder *Verhältnis von Import zu Export* werden hier nicht betrachtet, da sie nicht unmittelbar im Kontext mit der Energiewende bzw. Industrietransformation stehen.

³ Umgekehrt kann der *Renewables-Pull*-Effekt in zukünftigen Exportländern für grüne Vorprodukte (wie DRI oder Ammoniak) auch zu neuer Produktion und somit zunehmenden Abwärmepotenzialen führen.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmenutzung⁴:

- Verringerte Produktionsmengen aufgrund Suffizienz in der Produktnachfrage, Energieeffizienz in der Produktanwendung sowie Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft in der Produktherstellung:  bis 
 - Substitution durch andere Produkte (Produktwechsel): 
 - Verlagerung energieintensiver Produktion ins/vom Ausland:  (Importländer)
 (Exportländer)

2.2 Prozesswechsel (Verfahrenswechsel)

Unter Prozesswechsel wird hier die Umstellung eines gesamten Herstellungs- oder Verarbeitungsverfahrens (Prozesskette) verstanden. Die Umstellung einzelner Aggregate von fossiler basierter auf treibhausgasneutrale Produktion von Prozesswärme (z.B. Dampferzeuger, Brenner oder Öfen) wird unten in Kap 2.3 „Klimaneutrale Prozesswärmeezeugung“ diskutiert.

Zu den Prozesswechseln gehören insbesondere Break-Through-Technologien aus dem Bereich der Grundstoffindustrie. Beispielsweise hat in der **Stahlindustrie** die DRI-Route (Produktion von direktreduziertem Eisen mit Hilfe von klimaneutral hergestelltem Wasserstoff) das Potenzial, die treibhausgasintensive Hochofenroute (Roheisenproduktion mit Hilfe von Kokskohle) vollständig zu ersetzen. Alternativ könnte die Hochofenroute auch durch eine strombasierte Elektrolyse von in Natronlauge gelöstem Eisenerz mit anschließender Weiterverarbeitung im Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl substituiert werden.

Ein Beispiel aus der **Chemiebranche** ist die Umstellung der Steamcracker-Route (auf Basis fossilen Naphthas) auf grünes Methanol als synthetische Plattformchemikalie für die Kunststoffproduktion. Diese Umstellung ermöglicht eine weitgehend klimaneutrale Produktion der Grundbausteine für Kunststoffe aus der Gruppe der Olefine (Methanol-zu-Olefin-Route = MtO) bzw. Aromate (Methanol-zu-Aromate-Route = MtA).

Ein weiteres Beispiel für einen fundamentalen Prozesswechsel ist die **additive Fertigung** (Additive Manufacturing AM) z.B. von Turbinenschaufeln für Gas- und Dampfturbinen. Dieses Laser-Sintern-Verfahren im 3-D-Drucker ersetzt die konventionelle Produktion mittel Gießen, Schmieden und Fräsen.

Da die tatsächlichen Auswirkungen eines Prozesswechsels auf die Potenziale der Abwärmenutzung sehr individuell ausfallen können, ist eine allgemeingültige Aussage schwierig. Da klimaneutrale Energieträger (z. B. Strom oder Wasserstoff) tendenziell teuer im Vergleich zu fossilen Energieträgern sind, ist es in der Tendenz jedoch wahrscheinlich, dass sich im Rahmen der Energie- und Industrietransformation insbesondere diejenigen Prozessinnovationen durchsetzen werden, die eine klimaneutrale Produktion besonders energieeffizient ermöglichen. Daraus lässt sich ableiten, dass Abwärmepotenziale - quasi als ein Maß für die Effizienz bzw. Ineffizienz von Prozessen – in der Tendenz rückläufig sein werden.

⁴ Die Bedeutung der Pfeile ist in der Legende zu Tab. 3-1 auf S. 26 beschrieben.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmennutzung:

- Verfahrenswechsel: ↘ bis ↓ (abhängig vom Einzelfall)

2.3 Klimaneutrale Prozesswärmeerzeugung

2.3.1 Inkrementelle Energieeffizienzmaßnahmen

Unter inkrementellen Energieeffizienzmaßnahmen werden hier – in Abgrenzung zu radikalen Innovationen in Form von Prozess- oder Produktwechseln (s. Kap. 2.2 und 2.1) – Maßnahmen zur schrittweisen Effizienzsteigerung bestehender Prozesse verstanden. Diese Steigerung der Energieeffizienz ist eine wesentliche Strategie auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität, da sie in der Regel eine Voraussetzung dafür darstellt, mit den begrenzten lokalen und systemischen Ressourcen an erneuerbaren Energien sowie deren Transportkapazitäten auszukommen. Zudem senkt sie sowohl auf Unternehmensebene als auch im gesamten System das Risiko hoher Energiepreise und Importabhängigkeit.

Zu den konkreten Maßnahmen zählen unter anderem die Umstellung von Dampf auf Heißwasser (sofern prozesstechnisch realisierbar), die Senkung von Temperatur- und Druckniveaus bei der Dampfversorgung auf das notwendige Maß, Wärmedämmung, thermodynamische Prozessoptimierungen (z.B. durch verbessertes Brennerdesign oder optimierte Prozesssteuerung) sowie die prozessinterne Nutzung von Abwärme durch erhöhte Wärmeintegration.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass jegliche Art der Wirkungsgradsteigerung eines Prozesses zu einem höheren Anteil der Nutzenergie an der eingesetzten Endenergie und somit zu einem vermindernden Einsatz von Endenergie und zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Verminderung der Abwärmepotenziale führt.

Tendenzielle Auswirkungen auf (externe) Abwärmennutzung:

- Energieeffizienzmaßnahmen: ↘

2.3.2 Umstellung auf erneuerbare Energieträger

Die Umstellung der Prozesswärmeerzeugung auf erneuerbare Energieträger (inklusive Nutzung von Reststoffen und Beiprodukten) ist die zentrale Strategie, um den nach Effizienzsteigerungen verbleibenden Energiebedarf klimaneutral zu decken. Abb. 2-1 zeigt die Optionen in Form von erneuerbarer Wärmequellen (z.B. Solarthermie), unvermeidbarer Abwärme, erneuerbarem Strom, Biomasse (einschließlich Biogas), Reststoffe (z.B. aus der Papierindustrie) und Beiprodukte (z.B. brennbare Gase in der Chemieindustrie) sowie alternativen synthetischen Energieträgern (insbesondere Wasserstoff und synthetisches Methan) (Schüwer & Holtz, 2023).

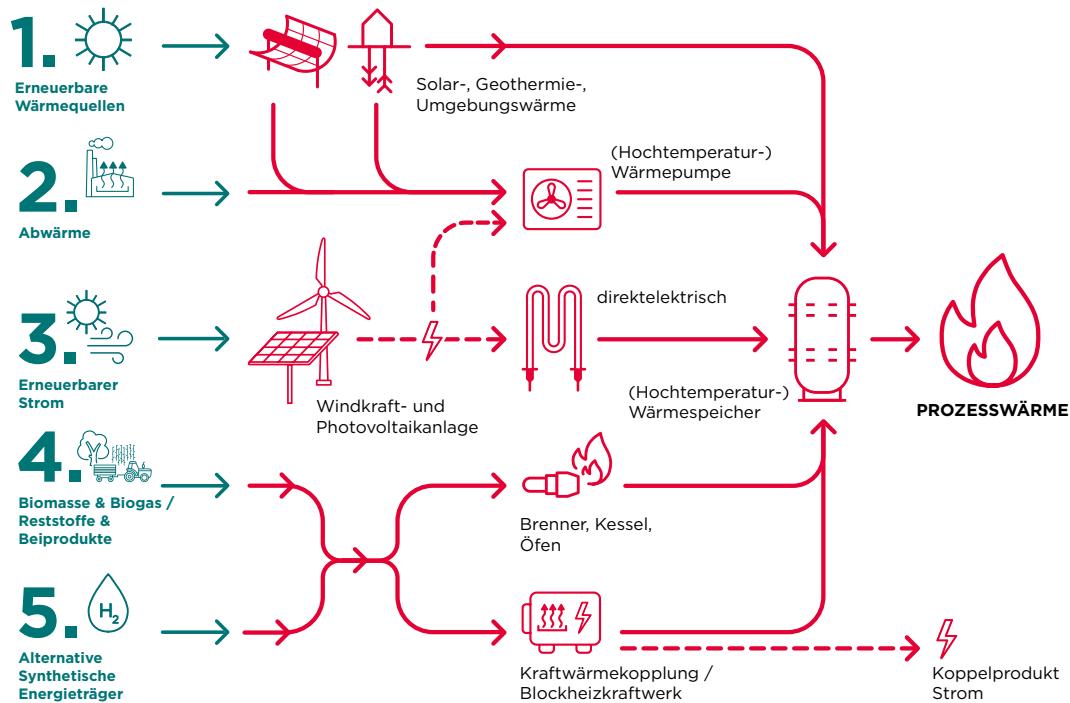


Abb. 2-1: Energieträger und Technologien für eine dekarbonisierte Prozesswärmeerzeugung

Quelle: Wuppertal Institut

Für die Frage nach den Auswirkungen einer Umstellung auf erneuerbare Energieträger auf die Abwärmenutzung ist vor allem relevant, welche Art von Prozesswärmeerzeugung durch die Umstellung substituiert wird. Handelt es sich bei dem Ausgangsprozess um einen Verbrennungsprozess (Wirkungsgrade im Bereich von 70 bis 95%)⁵, welcher unvermeidbar mit Abwärmeverlusten einhergeht, so wird das Abwärmepotenzial nur bei einer Umstellung auf Verbrennung erneuerbarer Brennstoffe annähernd gleichbleiben. Bei Substitution durch erneuerbare Wärme oder erneuerbaren Strom (Elektrifizierung) fällt ein wesentlicher Teil des Abwärmepotenzials, nämlich die verbrennungs- und abgasbedingten Verluste, weg.

Erneuerbare Wärme

Für die Nutzung erneuerbarer Wärme kommen die Technologieoptionen *Solarkollektoren* (konzentrierend und nicht-konzentrierend), *Geothermie* (tief und oberflächennah in Kombination mit Wärmepumpen) sowie *Umgebungswärme* (in Kombination mit Wärmepumpen) in Betracht. Bei allen drei Technologien bzw. Energieträgern ist davon auszugehen, dass sie Prozesswärmeerzeuger auf Basis fossiler Brennstoffe (vollständig oder teilweise) verdrängen und insofern geringere (verbrennungsbedingte) Abwärmeströme zu erwarten sind. Andererseits ergeben sich möglicherweise (zeitweise) auch zusätzlich nutzbare Potenziale aus erneuerbarer Überschusswärme, wenn das Wärmedargebot aus Solarstrahlung (z.B. im Sommer) oder Tiefengeothermie die aktuelle

⁵ Feuerungstechnische Wirkungsgrade von ca. 70 - 85% für verschiedene Öfen und Wärmebehandlungsverfahren (Fleiter et al., 2023) bzw. bis zu 95% für Dampfkessel.

Wärmenachfrage übertrifft und auch nicht oder nicht vollständig in Wärmespeichern gepuffert werden kann.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmennutzung:

- Solarkollektoren, Geothermie oder Umgebungswärme: ↘
(bei Verdrängung von Verbrennungsprozessen)
- Solarkollektoren oder Tiefengeothermie: ↗
(im Falle zeitweiser erneuerbarer Wärmeüberschüsse)

Erneuerbarer Strom (Elektrifizierung)

Die Elektrifizierung, auch als Power-to-Heat (PtH) bezeichnet, ist ein zentraler Hebel für die Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme. Hier wird bei der Querschnittstechnologie *Dampferzeugung* zwischen der Wärmepumpe (mit einem Wirkungsgrad von rund 200% bis 500%, je nach Temperaturhub, (Arpagaus, 2019)) und Elektro- bzw. Elektrodenkesseln (mit einem Wirkungsgrad von ca. 98%) unterschieden.

Darüber hinaus umfasst die prozesstechnische Elektrifizierung branchenspezifisch verschiedene technisch-physikalische Verfahren wie Widerstands-Erwärmung, induktive, konduktive, dielektrische sowie Infrarot-, Plasma- oder Lichtbogen-Verfahren. Einige elektrische Standard-Anwendungen sind technisch begrenzt hinsichtlich ihres Einsatzes bei sehr hohen Temperaturen ($> 1.000^{\circ}\text{C}$) und/oder hinsichtlich ihrer Leistungsdichte. Elektrische Widerstandsheizelemente haben beispielsweise eine deutlich geringere Leistungsdichte als Erdgasbrenner. Dennoch wird erwartet, dass der Anteil der Elektrifizierung in etablierten Verfahren weiter ausgebaut und neue PtH-Technologien, wie Mikrowellen- oder Plasmatechnologie, eingeführt werden (Fleiter et al., 2023; Görner & Lindenberger, 2018; Pfeifer, 2013).

Grundsätzlich wird zwischen direkten und indirekten elektrischen Erwärmungsverfahren unterschieden. Bei den *direkten* Verfahren (induktiv, konduktiv, dielektrisch) erfolgt die Umwandlung in Wärme direkt im Werkstück selbst. Bei den *indirekten* Verfahren (wie Widerstands-, Lichtbogen- oder Infrarot-Erwärmung) findet die Umwandlung in Wärme außerhalb des Werkstücks statt. Die Wärme wird dann über die Oberfläche des Werkstücks eingetragen, entweder durch ein Wärmeträgermedium (wie Luft, Dampf, Flüssigkeitsbäder), durch Wärmeleitung und Konvektion oder mittels Wärmestrahlung (Infrarot). Die Art des elektrischen Erwärmungsverfahrens hat einen relevanten Einfluss auf die Effizienz und somit die potenziellen Abwärmeströme im Prozess.

Wenn es das Temperaturniveau zulässt, wird in vielen energieintensiven Prozessen bereits eine interne Abwärmennutzung praktiziert. Ein Beispiel aus der Gießereiindustrie ist der brennstoffbeheizte Heißwind-Kupolofen zur *prozessinternen* Rückgewinnung für die Heißwinderzeugung oder über Thermoöl zur *betriebsinternen* Rückgewinnung für andere Betriebsbereiche. Im Gegensatz dazu ist bei Umstellung auf einen elektrischen Induktionsofen die betriebliche Nutzung - außer zur Warmwasserbereitung - praktisch nicht möglich, weil die treibende Temperaturdifferenz zu gering ist (Fleiter et al., 2023, S. 171).

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmennutzung:

(Details s. jeweils vorletzte Spalte in Tab. 2-1)

- Elektrifizierung verschiedener Öfen und Prozesse in der Metall- und Mineralindustrie: ➔
- Elektrifizierung bei Dampferzeugern: ↓

Erneuerbare gasförmige, flüssige oder feste Brennstoffe

Als Ersatz für Erdgas kommen insbesondere erneuerbarer Wasserstoff und dessen Derivate (z. B. Ammoniak oder Methanol), Biogas sowie erneuerbares synthetisches Methan SNG⁶ in Frage. Da SNG nahezu identische Eigenschaften wie Erdgas aufweist und i.d.R. keine technischen Veränderungen an den Wärmeerzeugern erfordert, wird es hier nicht weiter betrachtet. Nachhaltig erzeugtes *Biogas* ist und bleibt eine knappe Ressource und erneuerbarer *Wasserstoff* ist ebenfalls (noch nicht) in größeren Mengen und günstig verfügbar. Aus Effizienzgründen sollten diese grünen Gase dort eingesetzt werden, wo elektrische Alternativen technisch oder wirtschaftlich nicht darstellbar sind, also insbesondere im Höchsttemperaturbereich bzw. bei Anwendungen, wo eine hohe Wärmeübertragungsdichte erforderlich ist (z. B. bei großen Glaswannen).

Flüssige alternative Brennstoffe spielen bei der energetischen Nutzung eine untergeordnete Rolle und sind zukünftig eher im Verkehrssektor als Treibstoffe für schwer elektrifizierbare Antriebe (Schiffe und Flugzeuge) relevant.

Feste Biomasse kann zur Dampferzeugung in Kesseln oder für branchenspezifische Anwendungen wie z. B. im Drehrohrofen in der Zementindustrie eingesetzt werden. Ein Sonderfall stellt *Biokoks* dar, der z. B. beim kontinuierlichen Schmelzen von Gusseisen ($T_{\text{Schmelze,max.}} \approx 1.580^{\circ}\text{C}$) im Heißwind- oder Kaltwind-Kupolofen an Stelle fossilen Koks eingesetzt werden kann. Der Einfluss eines Brennstoffwechsels von fossilen auf biogenen Koks auf die Abwärmeentstehung ist abhängig von Zusammensetzung und Effizienz des Brennstoffs. (Fleiter et al., 2023, S. 102 f., 171)

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmenutzung:

(Details s. jeweils letzte Spalte in **Tab. 2-1**)

- H₂-Einsatz in verschiedenen Öfen und Prozessen in der Metall- und Mineralindustrie: ➔
- H₂-Einsatz bei Dampferzeugern: ➔
- Biomasse-/Biokoks-Einsatz: ➔ (abhängig von Brennstoffqualität)

⁶ SNG = Synthetic Natural Gas

Tab. 2-1: Exemplarische Abwärmeentstehung bei Erdgasbeheizung und Impact im Falle einer Umstellung auf Strom oder Wasserstoff (Mittelwerte für Einzelanlagen)

Prozesse	Ofen-Art	Abwärme		Impact	
		Vol-Strom [m³/h] ¹⁾	Temp. [°C]	Elektrifi- zierung	H₂- Einsatz
Metallindustrie					
Wärme- und Glühöfen Stahl-Walzwerke	Erwärmung und Wärmebehandlung (Flach-/Langstahl)	Hubbalken-, Stoß-, Rollenherd-, Durchlaufglüh-, Haubenglühofen	1.000 – 77.500	200 – 450	↘ →
Gießerei-Industrie	Schmelzen: Gusseisen ²⁾ und Alu-Legierungen	Heißwind-, Kaltwind-, Kupol-, Schachtofen	8.000 – 120.000	<100 (nach Filter) bis <300	⬇ ↘
NE-Metallindustrie (Aluminium)	Schmelzen/Warmhalten, Homogenisieren/Erwärmen, Wärmebehandlung	Kammerherd-, Stoß-, (Rollen-)Durchlauf-, Kammer-, Schwebefeldofen	755 – 45.000	150 – 300	↘ →
NE-Metallindustrie (Kupfer)	Schmelzen, Erwärmung, Wärmebehandlung	Kathodenschacht-, Hubbalken-, Rollenherd-, Haubenofen	<1.400 – 24.000	140 – 400	↘ →
Umformtechnik (Massivumformung und Presshärten)	Erwärmung, Schmieden ³⁾ , Presshärten	Durchlauf-, Drehherd-, Herdwagen-, Kammer-Schmiede-, Rollenherdofen	10,6 - 11,5 m³ Abgas / m³ Erdgas	400 – 500	↘ →
Härtetechnik	Aufkohlen und Austenitisieren	Durchstoß-, Band-, Kammerofen	155 – 2.750	400 – 450	↘ →
Mineralindustrie					
Glasindustrie inkl. Glasfaser	Schmelzen (Behälterglas und Flachglas)	U-Flammenwanne, Querbrennerwanne (regenerativ)	10 m³ Abgas / m³ Erdgas	400 – 800	↘ →
Kalkindustrie	Brennen von Kalk ⁴⁾	Normalschacht-, GGR-, Drehrohrofen	6.000 – 160.000	100 – 220	n.a. n.a.
Zementindustrie	Brennen von Zementklinker	Drehrohrofen (inkl. Kalzinator) Klinkerkühler	1,7 – 3 m³/kg Klinker 0,89 m³/kg Klinker	90 – 180 ⁵⁾ 245	↘ →
Keramik- und Ziegelindustrie	Brennen von Ziegeln / Feuerfest-Materialien	Tunnel-, Herdwagenofen	Abgas: 8.000 – 50.000 Kühlluft: 3.000 – 15.000	100 – 350 200 – 500	↘ →

	Prozesse	Ofen-Art	Abwärme		Impact	
			Vol-Strom [m³/h] ¹⁾	Temp. [°C]	Elektrifizierung	H₂-Einsatz
Dampferzeuger						
Nahrungsmittelindustrie	Milchpulverherstellung	Trocknung bis 240°C (~25 bar)	-	-	↓	→
Papierindustrie	Papiertrocknung	Trocknung bis 140–150°C (~3–6 bar)	-	-	↓	→
Chemische Industrie	Chemiepark-Dampfversorgung	Nieder-, Mittel- u. Hochdruck	-	-	↓	→

¹⁾ Bezogen auf Standard Temperature and Pressure (STP)

²⁾ Koks- statt Erdgasbeheizung

³⁾ Bezogen auf den fossil beheizten Anteil, welcher nicht induktiv beheizt werden kann (ein Großteil der im Gesenk geschmiedeten Teile wird induktiv erwärmt.)

⁴⁾ Je nach Anwendung Beheizung mit Koks, Braunkohlenstaub, Sekundärbrennstoff oder Erdgas

⁵⁾ Abhängig von der Nutzung in der Rohmühle (Vortrocknung)

Quelle: Eigene Zusammenstellung mit Tabellendaten aus (Fleiter et al., 2023)

2.4 Neue Anwendungen

Neben der Substitution von Energieträgern, Produkten und Prozessen entstehen im Rahmen der Energiewende auch völlig **neue, prozesswärmerelevante Anwendungen**. Darunter fallen insbesondere der Hochlauf der Erzeugung synthetischer erneuerbarer Energieträger in Power-to-X-Anlagen (PtX), die Abscheidung prozess- und brennstoffbedingter CO₂-Emissionen in industriellen Anlagen (Carbon Capture) sowie ggf. die Entnahme von Kohlenstoff aus der Luft (Direct Air Capture DAC) zur industriellen Nutzung (CCU) bzw. langfristigen Speicherung (CCS). Zudem entstehen in Rechenzentren erwartungsgemäß zukünftig große Abwärmpotenziale. Rechenzentren stehen zwar nicht im unmittelbaren Kontext mit der Energiewende, werden aber aufgrund ihrer hohen Relevanz dennoch hier unter den „neuen Anwendungen“ mit aufgeführt und behandelt.

2.4.1 Power-to-X-Synthese

Power-to-X (PtX) bezeichnet die Herstellung von chemischen Energieträgern wie Wasserstoff, Methanol und anderen synthetischen Kohlenwasserstoffen unter Verwendung von erneuerbarem Strom. Je nach Zielprodukt kommen unterschiedliche Technologien und Prozessketten zum Einsatz mit jeweils eigenen energetischen und rohstofflichen Anforderungen. Abb. 2-2 zeigt eine Auswahl relevanter synthetischer Kraftstoff- und Industrieprodukte und die zugehörigen Wertschöpfungsketten von Rohstoffbereitstellung (Energie, Wasser und CO₂), Wasserspaltung (H₂ und Synthesegas), Syntheseverfahren und Aufbereitungsprozessen. Neben den Hauptprodukten entsteht in nahezu allen Prozessschritten **Abwärme**, deren Temperaturniveau und Menge stark variieren.

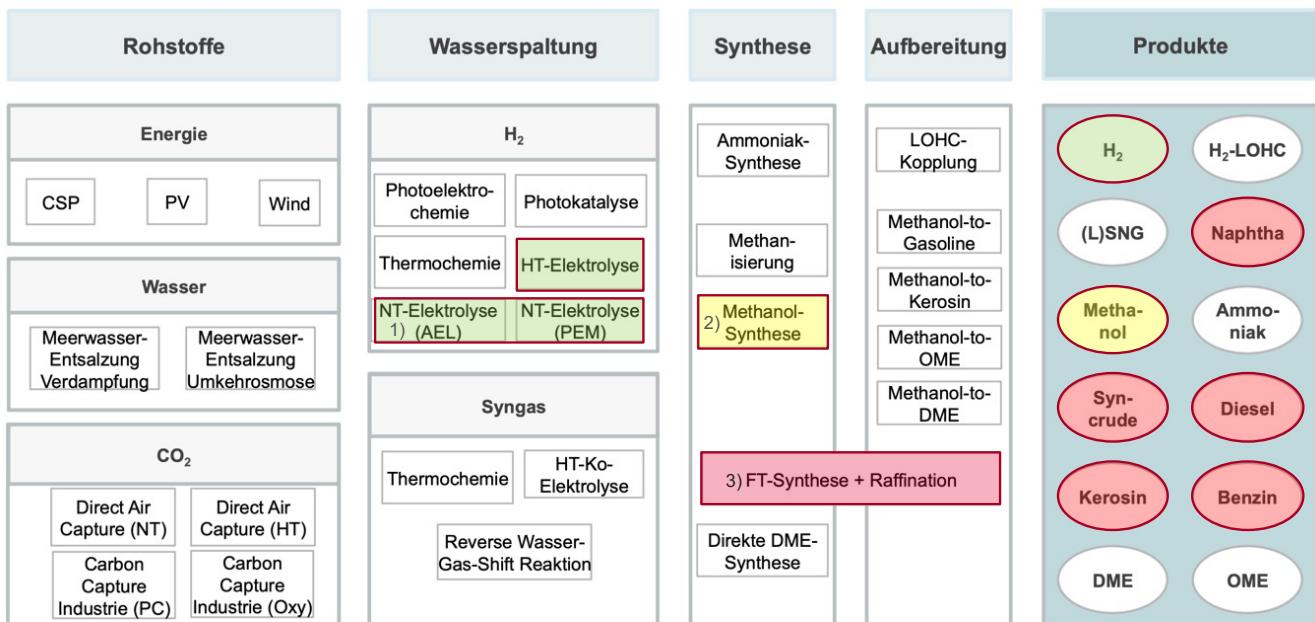


Abb. 2-2: Auswahl relevanter erneuerbarer PtX-Produkte sowie ihrer zugehörigen Rohstoffe und Prozessketten

AEL: Alkalische Elektrolyse

DME: Dimethylether

LOHC: Liquefied Organic Hydrogen Carrier

OME: Polyoxymethylendimethylether

PEM: Polymer-Elektrolyt-Membran

CSP: Concentrated Solar Power

FT: Fischer-Tropsch

(L)SNG: (Liquefied Synthetic Natural Gas)

Oxy: Oxyfuel

PV: Photovoltaik PC: Post Combustion

Quelle: (Zelt et al., 2020, 2021), eigene farbliche Hervorhebungen

Nachfolgend werden beispielhaft die in Abb. 2-2 farblich hervorgehobenen Prozesse der HT- und NT-Elektrolyse (Nr. 1 grüner Pfad), der Methanol-Synthese (Nr. 2 gelber Pfad) sowie der Fischer-Tropsch-Synthese mit anschließender Raffination (Nr. 3 roter Pfad) bezüglich ihrer Wärmebedarfe und Abwärmepotenziale analysiert.

Ausgangspunkt der meisten PtX-Ketten ist die **Elektrolyse**. Sie wandelt Wasser unter Einsatz elektrischer Energie in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) um. Bei der **Niedertemperatur-Elektrolyse** (NT-Elektrolyse), die den Varianten alkalische Elektrolyse (AEL) oder Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) betrieben wird, erfolgt die Reaktion bei Temperaturen von 50 bis 90 °C (Saravia & Gehrman, 2024). Der Strombedarf liegt inklusive Nebenaggregaten bei etwa 55 kWh pro Kilogramm H₂ (Franco & Giovannini, 2023). Der Prozess ist chemisch endotherm – die Energiezufuhr erfolgt vollständig über den elektrischen Strom. Die bei der elektrochemischen Reaktion und durch elektrische Widerstandsverluste entstehende Wärme führt zu einer Selbsterwärmung der Zellen, sodass eine kontinuierliche Kühlung notwendig ist. Dabei fällt Niedertemperatur-Abwärme bei ca. 50 bis 60 °C an (GET H2, 2024).

Die **Hochtemperatur-Elektrolyse** (HT-Elektrolyse; SOEC, Solid Oxide Electrolysis Cell) nutzt dagegen Wasserdampf bei etwa 800 bis 1 000 °C (Dahiru et al., 2022). Sie erfordert sowohl elektrische Energie (typischerweise 42 kWh/kg H₂) als auch thermische Energie in Form des heißen Wasserdampfs (Fallisch

et al., 2018). Je höher die Dampftemperatur, desto geringer der Bedarf an elektrischer Energie. Durch den hohen Betriebstemperaturbereich kann ein Teil der im System umgesetzten Wärme wieder zurückgeführt werden; heiße Abgasströme bieten zusätzlich hochwertige Abwärme, die sich zur Dampferzeugung oder zur Beheizung nachgeschalteter Reaktoren eignet. Die SOEC-Technologie fungiert somit als Wärme-Senke und Wärme-Quelle zugleich und ermöglicht eine flexible Kopplung mit anderen thermischen Prozessen.

Für die meisten nachfolgenden Syntheseverfahren wird neben Wasserstoff eine **Kohlenstoffquelle** benötigt. Der Kohlenstoff (in Form von Kohlendioxid CO₂) kann dabei entweder aus industriellen Abgasen (siehe Kap. 2.4.2 CO₂-Abscheidung) oder durch Direktabscheidung aus der Luft (siehe Kap. 2.4.3 Direct Air Capture (DAC)) gewonnen werden. Beide Pfade benötigen je nach Verfahren unterschiedliche Mengen an Strom und Wärme. Wird für die nachfolgende Synthese Kohlenmonoxid (CO) benötigt, erfolgt dessen Erzeugung meist über die Reverse Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS), bei der CO₂ und H₂ zu CO und Wasser umgesetzt werden. Diese Reaktion ist endotherm und erfordert eine erhebliche Wärmezufuhr auf einem Temperaturniveau von etwa 650 °C (Sternberg et al., 2017). Der Energiebedarf für eine Tonne Synthesegas liegt bei etwa 1,5 MWh_{el} sowie 0,7 kWh_{th}. Es ist jedoch auch möglich, etwa ein Viertel des Strombedarfs durch zusätzliche Wärme zu substituieren (Sternberg et al., 2017). Eine Kopplung mit Hochtemperatur-Abwärme aus einer SOEC-Elektrolysezelle oder der Fischer-Tropsch-Synthese ist technisch naheliegend und energetisch vorteilhaft.

Die **Methanol-Synthese**, ein vieldiskutiertes PtX-Verfahren, verbindet Wasserstoff und CO₂ zu Methanol (CH₃OH) und Wasser. Sie verläuft exotherm, das heißt, die chemische Reaktion setzt Wärme frei. Der Reaktor wird bei 200 bis 300°C und 50 bis 100 bar betrieben (Scholz et al., 2025). Während der Reaktion muss kontinuierlich Wärme abgeführt werden, um eine Überhitzung der Katalysatoren zu vermeiden. Diese Reaktionswärme steht auf mittlerem Temperaturniveau zur Verfügung und kann entweder produktionsintern (z. B. zum Vorwärmern von Edukten oder für die Destillation) oder extern (z. B. zur Dampferzeugung oder Fernwärmelieferung an Dritte) eingesetzt werden. Der elektrische Energiebedarf der Synthese selbst ist gering und beschränkt sich im Wesentlichen auf Kompressoren und Hilfsaggregate. Damit wandelt die Methanol-Synthese den zuvor erzeugten Wasserstoff unter geringer zusätzlicher Stromaufnahme in einen flüssigen Energieträger um und erzeugt dabei Prozesswärme.

Die **Fischer-Tropsch-Synthese** setzt hingegen ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid zu flüssigen Kohlenwasserstoffen (synthetisches Rohöl/Syncrude) um, die anschließend zu synthetischem Diesel, Kerosin oder Naphtha weiterverarbeitet werden können. Auch hier handelt es sich um eine stark exotherme Reaktion. Der Reaktor wird bei 170 bis 360°C betrieben, je nach gewünschtem Produktoutput und Verfahren (Boymans & Liakakou, 2018). Der elektrische Bedarf dieser Synthese beschränkt sich ebenfalls auf Nebenaggregate. Ähnlich wie bei der Methanol-Synthese bieten sich auch hier Anwendungsmöglichkeiten für Abwärme auf mittlerem Temperaturniveau.

Insgesamt zeichnen sich die beschriebenen PtX-Verfahren durch ein komplexes Zusammenspiel von Strom- und Wärmeflüssen aus, die je nach Technologie und Prozesskette stark variieren. Während die meisten Elektrolyseverfahren stromdominant sind und lediglich Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau erzeugen, bilden die Hochtemperatur-Elektrolyse sowie die exothermen Synthesen

deutliche Wärmequellen. CO₂-Abscheidung und RWGS-Reaktion benötigen hingegen Prozesswärme, die in integrierten Anlagen durch interne Wärmerückkopplung teilweise gedeckt werden kann.

In großskaligen, thermisch gekoppelten Anlagen lassen sich so effiziente Energiekreisläufe etablieren, in denen die Abwärme aus Synthesen und ggf. Hochtemperaturprozessen den Wärmebedarf der vorgelagerten Stufen deckt, während überschüssige Wärme auf mittlerem Temperaturniveau in industrielle Netze oder Fernwärmesysteme eingespeist werden kann. Dezentral betriebene Elektrolyseanlagen an Wind- oder PV-Standorten erzeugen dagegen meist nur geringe Mengen niedrigtemperierter Abwärme, deren Nutzungsmöglichkeiten wirtschaftlich vom Einzelstandort abhängen. Inwieweit ein großflächiger Ausbau von PtX-Technologien somit insgesamt einen positiven Beitrag zur Abwärmenutzung leisten kann, hängt stark von Faktoren der Verfahrens- und Standortwahl sowie dem Umfang der Wärmeintegration ab.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmenutzung:

- H₂-Elektrolyse: ➔
- Methanol-Synthese: ➔
- Fischer-Tropsch-Synthese: ➔

2.4.2 CO₂-Abscheidung

Die CO₂-Abscheidung ist ein neuer, zusätzlicher Prozess an industriellen Anlagen, der die Emission von CO₂ in die Atmosphäre vermeiden soll. Das abgeschiedene CO₂ kann anschließend verdichtet, abtransportiert und dauerhaft gespeichert werden (**Carbon Capture and Storage - CCS**) oder es kann für die Bereitstellung von CO₂ bzw. Kohlenstoff für industrielle Prozesse verwendet werden (**Carbon Capture and Usage - CCU**). Der Abtransport (nach der Verdichtung) und die dauerhafte Speicherung von CO₂ sind für die Abwärmenutzung unbedeutend.

Der Einsatz von **Carbon Capture and Usage (CCU)** erfordert für ein klimaneutrales Energiesystem langfristig eine ebenfalls klimaneutrale Kohlenstoffquelle. Dafür kommen entweder biogene Quellen inklusive biogener Abfälle (s. Kap. 2.3.2 Umstellung auf erneuerbare Energieträger) oder aus der Luft entnommener Kohlenstoff in Frage (s. Kap. 2.4.3 Direct Air Capture (DAC)). Die Potenziale für rein technische Anwendungen (z.B. CO₂ als Feuerlöschmittel oder in der Getränkeindustrie) sind vernachlässigbar gering, die mengenmäßig relevantesten Anwendungen werden in der Synthese von klimaneutralen Kraft- und Treibstoffen sowie in der Grundstoffchemie (s. Kap. 2.4.1 Power-to-X-Synthese) gesehen. Zur Frage der Auswirkungen auf die Abwärmpotenziale wird daher bezüglich der *Nutzung* von Kohlenstoff auf die entsprechenden Kapitel verwiesen.

Das nachfolgende Unterkapitel fokussiert auf den abwärmerlevanten Prozessschritt der **CO₂-Abscheidung** (und Verdichtung) innerhalb von CCS bzw. CCU. Dabei hat die Wahl des Abscheideverfahrens einen erheblichen Einfluss auf die nutzbaren bzw. residualen Abwärmpotenziale. Es wird unterschieden zwischen

- *Pre-Combustion*-Technologien mit einer Abtrennung von CO₂ aus dem Brennstoff *vor* der Verbrennung (insbesondere Erzeugung von sog. Blauem Wasserstoff aus Erdgas mittels Dampfreformierung oder Erzeugung von Synthesegas aus Kohle mittels Vergasung)
- *Post-Combustion*-Technologien mit einer Abtrennung von CO₂ aus den Rauchgasen *nach* der Verbrennung durch chemische (Aminwäsche, Calcium-Looping, Mineralisierung) oder physikalische (TSA-/PSA-, Membran- und kryogene Verfahren⁷) Bindung an ein Sorbens sowie
- *Integrierten Verfahren* (Oxyfuel, indirekte Calcinierung, integriertes Calcium-Looping) mit Aufkonzentration von CO₂ innerhalb des Prozesses.

Nachfolgend werden beispielhaft mit Oxyfuel (integriert oder teilintegriert) sowie Aminwäsche (Post-Combustion) die beiden wichtigsten Abtrennverfahren am Beispiel des Zementklinker-Brennprozesses in der Zementindustrie im Hinblick auf Abwärmenutzung analysiert. Die Herstellung von Zementklinker wird als Beispiel gewählt, da in diesem Prozess einerseits große CO₂-Mengen entstehen und diese CO₂-Entstehung zum anderen weithin als unvermeidbar eingestuft wird. Das Pre-Combustion-Verfahren wird ebenfalls kurz skizziert.

Die Analyse basiert auf den „Technology Papers 2022“ (ECRA, 2022) der ECRA (European Cement Research Academy), einem Referenzwerk über die verfügbaren CO₂-Abscheideverfahren mit einer vergleichenden Bewertung anhand von Kriterien wie Abscheiderate, technischer Reifegrade, CAPEX, OPEX und Energiebedarf, sowie auf der Studie „Klimaneutrale Zementregion Erwitte/Geseke“ (Brexel, 2024, S. 16 ff.), in der untersucht wurde, wie in einer realen Zementregion mit einem jährlichen Ausstoß von 2,5 Mio. Tonnen CO₂ die Zementproduktion vor Ort klimaneutral ausgerichtet werden kann.

Pre-Combustion

In einem ersten Schritt lässt sich aus gasförmigen Brennstoffen (Erdgas oder andere wasserstoffreiche Gase) mittels Dampfreformierung, und aus festen Brennstoffen (Kohle, Biomasse, Abfälle) mittels Vergasung ein Synthesegas (Gasgemisch aus H₂ und CO) herstellen. In einem zweiten Schritt kann mit Hilfe von Wasserdampf weiterer Wasserstoff aus dem Synthesegas gewonnen und gleichzeitig das Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid umgewandelt und anschließend abgeschieden werden (Pre-Combustion-Carbon-Capture). Dampfreformierung bzw. Vergasung (1. Prozessstufe) sind jeweils endotherme, d. h. energieaufnehmende Prozesse, während die anschließende Wassergas-Shift-Reaktion (WGS, 2. Prozessstufe) exotherm, also unter Abgabe von Energie, stattfindet. Die Gesamtenergiebilanz und damit verbunden die Frage der Auskopplung oder Nutzung von Abwärme hängen in hohem Maße von den jeweiligen Prozessbedingungen ab. Eine Aussage über Abwärmepotenziale lässt sich daher nur im Einzelfall treffen. Mit dem Pre-Combustion-Verfahren können nur brennstoffbedingte, nicht aber prozessbedingte CO₂-Emissionen erfasst und abgeschieden werden.

⁷ TSA = Temperature Swing Adsorption / PSA = Pressure Swing Adsorption / Kryogenes Verfahren = Kühlen des Abgasstroms auf sehr niedrige Temperaturen, um das CO₂ unter Druck zu verflüssigen und dabei zu separieren.

Oxyfuel (vollintegriert)

Beim Oxyfuel-Verfahren findet die Verbrennung in Kraftwerken oder Öfen (hier Drehrohrofen der Zementindustrie) nicht mit Luft, sondern mit reinem Sauerstoff statt. Dadurch muss - im Unterschied zur Verbrennung unter Luftpumphosphäre - der Stickstoff aus der Luft (Anteil von rund 78 %) nicht durch den Verbrennungsprozess geschleust werden. Das entstehende Rauchgas besteht daher beim Oxyfuel-Verfahren hauptsächlich aus CO₂ und Wasserdampf, der durch Kondensation leicht separiert werden kann. Daraus ergibt sich eine größtmögliche Abscheideeffizienz für das CO₂. Der zusätzliche Energieaufwand für den Oxyfuel-Prozess ergibt sich insbesondere aus der stromintensiven Sauerstoffbereitstellung in einer Luftzerlegungsanlage und wird für die oben genannte beispielhafte Zementregion auf 0,75 und 1 TWh abgeschätzt⁸. Der Brennstoffbedarf ist beim Oxyfuel-Verfahren hingegen nur leicht erhöht, insbesondere durch höhere Wärmeabstrahlung aufgrund kleinerer Querschnitte in den Gasleitungen und dadurch, dass die Wärme des gebrannten Klinkers nicht in der gleichen Weise zum Aufheizen des Verbrennungssauerstoffs genutzt werden kann, wie bei konventionellen Ofenanlage zum Aufheizen der Verbrennungsluft (CI4C, 2024). Der Einsatz des vollintegrierten Oxyfuel-Verfahrens erfordert i. d. R. den Neubau von Kraftwerken bzw. Ofen-Anlagen und dementsprechend hohe Investitionsvolumen.

Partielles Oxyfuel (teilintegriert) und Abscheidung der Drehrohrofenabgase

Bei der Zementklinkerproduktion werden rund 75 % der gesamten CO₂-Emissionen bei der prozessbedingten sogenannten Entsäuerung des Klinker-Rohstoffs Kalkstein im Kalzinator⁹ freigesetzt. Die übrigen Emissionen entstehen brennstoffbedingt im Drehrohrofen. Bei Partial Oxyfuel wird die Sauerstoffverbrennung auf den Bereich der unvermeidbaren Prozessemisionen begrenzt. Dafür werden Bestandsanlagen mit einem Oxyfuel-Kalzinator nachgerüstet. Für die verbleibenden rund 25 % brennstoffbedingten Emissionen aus dem Drehrohrofen muss dann eine separate Post-Combustion-Lösung wie z. B. Calcium-Looping oder PSA/Kryogen-Prozess gefunden werden. Beim Calcium-Looping wird zusätzlich ein Karbonator¹⁰ eingesetzt und der brennstoffbedingte Primärenergiebedarf pro Tonne Klinker steigt um 60 - 70 %. Dieser Mehrenergiebedarf kann zumindest teilweise aus bestehenden ungenutzten Abwärme potenzialen gedeckt werden, die dann für eine externe Nutzung nicht mehr zur Verfügung stehen. Der kombinierte PSA/Kryogen-Prozess als Alternative ist nicht so wärmeintensiv und mindert daher kaum die vorhandenen Abwärme potenziale. Allerdings weist der Prozess mit ca. 450 kWh/t CO₂ einen nahezu doppelt so hohen Stromverbrauch (im Vergleich zum Oxyfuel/Kryogen-Prozess) auf.

⁸ Studien (Darde et al., 2009; ECRA, 2012) schätzen den zusätzlichen spezifischen Strombedarf für eine Großanlage mit 120 bis 150 kWh pro Tonne CO₂ ab. Alternativ zu der Gewinnung von Sauerstoff aus der Umgebungsluft kann das Gas auch in einer Wasser-Elektrolyseanlage separiert werden, wobei gleichzeitig Wasserstoff gewonnen wird.

⁹ Der Kalzinator zerlegt bei Temperaturen von ca. 850°C bis 950°C Calciumcarbonat (CaCO₃) in Calciumoxid (CaO) und Kohlendioxid (CO₂).

¹⁰ Der Karbonator nimmt Kohlendioxid (CO₂) auf und reagiert es bei Temperaturen von ca. 650°C mit Calciumoxid (CaO) zu Calciumcarbonat (CaCO₃).

Aminwäsche

Bei der Aminwäsche handelt es sich um ein Post-Combustion-Verfahren, bei dem in bestehenden Anlagen durch Zubau von Wäsche-Aggregaten hinter dem Verbrennungsprozess auf thermochemischem Wege CO₂ aus dem Abgasstrang herausgefiltert wird. Der bei der Aminwäsche für die Desorption entstehende hohe zusätzliche Wärmebedarf kann nur teilweise durch Wärmerückgewinnung und dann auch nur unter Eingriff in die bestehenden Anlagenstrukturen gedeckt werden.

Für die zentrale Abscheidung eines aggregierten CO₂-Volumens von 2,5 Mio. Tonnen pro Jahr würden in einer beispielhaften Zementregion ca. 6 Tonnen Dampf pro Minute benötigt. Der Energiebedarf des Desorbers liegt somit mit ca. 2,6 TWh/a in ähnlicher Größenordnung wie der thermischen Energiebedarf des Klinkerbrennprozesses selber (ca. 3,17 TWh/a)¹¹. In einem CCS-Pilotprojekt in Brevik/Norwegen konnten ca. 50 % des Wärmebedarfs der Aminwäsche durch eine integrierte Wärmerückgewinnung gedeckt werden. Dabei stammen ca. zwei Drittel der zurückgewonnenen Wärme aus dem Klinkerbrennprozess, ein weiteres Drittel aus dem End-of-Pipe-Prozess der CO₂-Abscheidung und -Verflüssigung selbst. Das bedeutet, dass für die beispielhaft genannte Zementregion (bisher ungenutzte) Abwärme auf einem Temperaturniveau oberhalb von 120°C in einer Größenordnung von 1,3 TWh nicht mehr für andere Zwecke zur Verfügung stehen würde. Zudem würden weitere ca. 1,3 TWh zusätzliche Wärme für die Desorption benötigt. Theoretisch kann diese Wärme mit Hilfe von mehrstufigen Hochtemperatur-Wärmepumpen aus weiteren prozessinternen Niedertemperaturquellen (30 bis 120°C) gewonnen werden, die dann ebenfalls nicht mehr für eine externe Auskopplung zur Verfügung ständen.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmennutzung:

- Pre-Combustion: →
- Oxyfuel: →
- Partielles Oxyfuel: ↘
- Aminwäsche: ↓

2.4.3 Direct Air Capture (DAC)

Um unvermeidbare THG-Emissionen z. B. aus der Landwirtschaft zu kompensieren, ist für eine langfristige Klimaneutralität die Kompensation verbleibender Emissionen erforderlich. Seit 2009 wird die direkte Entnahme von CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) mit anschließender Speicherung (Direct Air Capture and Carbon Storage, DACCS) als eine technische Option für diese Kompensation entwickelt (Fasihi et al., 2019). Hierbei werden verschiedene Verfahren erprobt (Absorption, Adsorption, elektrochemisch, Membran etc.), wobei sich einige Verfahren noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden und noch keinen einen Technology Readiness Level (TRL) in der Nähe der Marktreife erreicht hat.

¹¹ Dieser Berechnung liegt ein thermischer Energiebedarf von 3.352 MJ (931 kWh) pro Tonne Zementklinker zu Grunde.

Die am weitesten entwickelten Prozesse sind der Absorptions- und der Adsorptionsprozess, die beide sehr energieintensiv sind. Der Wärmebedarf ist gegenüber dem Strombedarf dominant und macht bis zu 85 % des gesamten Energiebedarfs aus (Block et al., 2024; Postweiler et al., 2024). Die genauen Zahlenwerte hängen dabei von unterschiedlichen Faktoren wie dem Sorptionsmedium und den Umweltbedingungen ab (Deutz & Bardow, 2021; Wenzel et al., 2025).

Der *Adsorptionsprozess* (Niedertemperatur NT) arbeitet bei einem Temperaturniveau von 80 bis 120 °C und weist laut gängiger Literatur aktuell einen Wärmebedarf von 1 500 bis 3 000 kWh pro Tonne CO₂ (Median 1 944 kWh/t CO₂) auf. Dieser wird sich bis 2040 voraussichtlich auf 1 100 bis 1 500 kWh/t CO₂ (Median 1 257 kWh/t CO₂) reduzieren (Wenzel et al., 2025). Für eine klimaneutrale Deckung des Wärmebedarfs kommt bei dem angegebenen Temperaturniveau neben Hochtemperatur-Wärmepumpen (unter Nutzung von NT-Abwärme), solarer oder geothermischer Wärme auch die direkte Nutzung industrieller Abwärme (oberhalb von ca. 120°C) in Frage. Die genutzte Abwärme stünde dann für andere Zwecke wie der Einspeisung in Wärmenetze nicht mehr zur Verfügung. Aufgrund der modularen Bauweise der Adsorptionseinheiten (wie bspw. vom Unternehmen Climeworks praktiziert) ist durch Zu- und Abschaltung einzelner Module eine relativ flexible Fahrweise der DAC-Anlage möglich. Dadurch kann auf schwankende Wärmeflüsse reagiert werden könnte. Aufgrund der hohen CAPEX der Adsorptions-DAC-Technologie sind für einen wirtschaftlichen Betrieb jedoch hohe Vollaststunden erforderlich.

Der *Absorptionsprozess* (Hochtemperatur HT) arbeitet bei Temperaturen von etwa 900°C und weist laut gängiger Literatur aktuell einen Wärmebedarf von 1 600 bis 2 800 kWh/t CO₂ auf (Ozkan, 2025). Aufgrund des hohen Temperaturniveaus ist hier die Nutzung von Abwärme i. d. R. nicht möglich und es müssten eigene (klimaneutrale) Hochtemperaturwärmequellen gefunden bzw. errichtet werden. Umgekehrt ist eine Abwärmennutzung aus dem Prozess theoretisch denkbar, allerdings müsste genauer untersucht werden, welche Energiemengen bei welchen Temperaturen in dem komplexen Anlagenschema ausgetauscht werden könnten.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmennutzung:

- Adsorptionsverfahren (NT): ↘
- Absorptionsverfahren (HT): →

2.4.4 Rechenzentren

Immer mehr und immer leistungsfähigere digitale Dienste wie Industrie 4.0, autonomes Fahren, maschinelles Lernen, künstliche Intelligenz, Social Networking, Videostreaming etc. erfordern immer mehr Rechenleistung in immer mehr Rechenzentren. Rechenzentren wandeln nahezu 100 Prozent der aufgenommenen elektrischen Energie in thermische Energie um, die weggekühlt werden muss. Diese Abwärme ist zuverlässig und ganzjährig verfügbar, da Rechenzentren typischerweise 24 Stunden am Tag und sieben Tage die Woche betrieben werden. Daher ist die Abwärme von Rechenzentren insbesondere interessant für Anwendungen, die ganzjährig Wärme benötigen wie z.B. Schwimmbäder, Krankenhäuser, Wäschereien oder Gewächshäuser (inkl. neuer Anwendungen wie Vertical Farming). Projektionen der IEA lassen erwarten, dass sich der globale Energieverbrauch von Rechenzentren allein

zwischen 2024 und 2030 von rund 400 TWh auf rund 950 TWh mehr als verdoppeln wird (Abb. 2-3). Treiber sind insbesondere sog. Beschleunigte Server mit hoher Rechenleistung für anspruchsvolle Aufgaben.

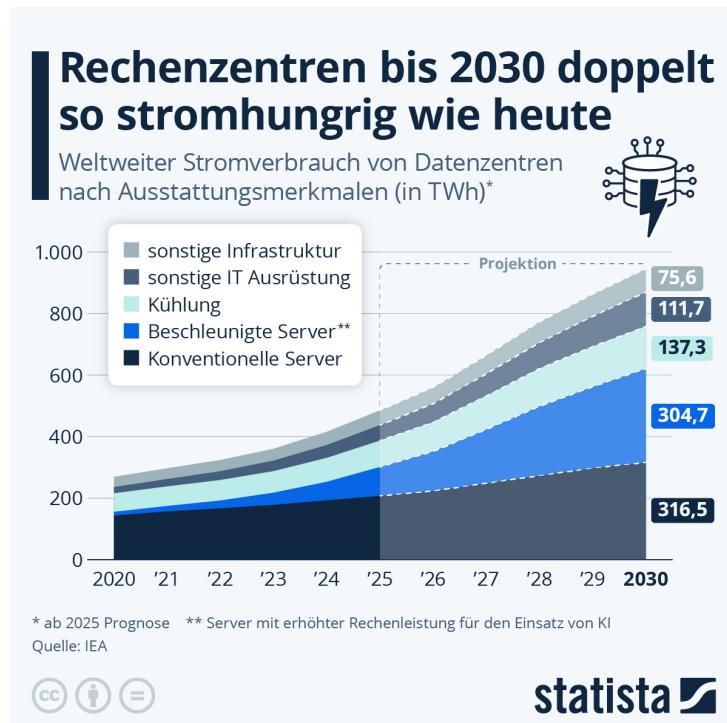


Abb. 2-3: Historischer und projizierter weltweiter Stromverbrauch von Datenzentren in Terawattstunden differenziert nach Ausstattungsmerkmalen

Quelle:

Statista 2025: Janson, M. (2. Mai, 2025). Wie viel Strom brauchen Rechenzentren in Zukunft? [Digitales Bild]. Zugriff am 16. Oktober 2025, von <https://de.statista.com/infografik/34392/weltweiter-stromverbrauch-von-datenzentren-nach-ausstattungsmerkmalen>

In einigen Regionen und Ländern wie z.B. in Europa (EU Energy Efficiency Directive (EED), 2023) oder in Deutschland ((Energieeffizienzgesetz (EnEfG), 2023)) gibt es bereits Regeln für eine verbindliche und schrittweise zu steigernde Nutzung von Abwärme aus Rechenzentren. (DENEFF, IWN und IER, 2023) bietet eine Übersicht über 99 Best-Practice-Beispiele realisierter Abwärmeprojekte aus 15 Ländern aus dem europäischen, nordamerikanischen und asiatischen Raum.

Das Whitepaper von NeRZ (Netzwerk energieeffiziente Rechenzentren) und eco (Verband der Internetwirtschaft e. V.) liefert einen Katalog an technischen Anwendungsmöglichkeiten (NeRZ und eco, 2019). Demnach lassen sich Kühlssysteme nach Temperaturniveau und Kühltechnik bzw. Kühlmedium unterteilen in

- Luftkühlung (Umluftklimageräte mit Kaltwasserregistern < 30°C)
- Wasser- bzw. Flüssigkeitskühlung (Direct Liquid Cooling DLC, ca. 30°C - 60°C).

Um Wärme aus **luftgekühlten Rechenzentren** mit relativ niedrigen Temperaturen für konventionelle Heizsysteme nutzbar zu machen, sind i.d.R. zusätzlich Wärmepumpen erforderlich. Technische

Innovationen wie beispielsweise Kreislaufverbundsysteme, bei denen in den warmen und in den kalten Luftstrom jeweils Wärmetauscher eingebaut werden, die über eine Sole-Leitung miteinander verbunden sind, erlauben auch für luftgekühlte Rechenzentren eine besonders effiziente und flexible Kälteerzeugung sowie Kälte- und Wärmeauskopplungen.

Bei modernen Ansätzen **wassergekühlter IT-Systeme** auf höherem Temperaturniveau verbessert das Kühlmedium Wasser (bzw. spezielle Kühlflüssigkeiten) die Effizienz der Wärmerückgewinnung und erleichtert den Anschluss an Wärme- und Fernwärmennetze. Zudem reduzieren sich Energieverbrauch und -kosten für die Kühlung, da der Betrieb bei höheren Vorlauftemperaturen (im Kühlkreislauf) ermöglicht wird und dadurch die Kälteerzeugung durch Kompressoren reduziert werden kann.

Bei Wasserkühlung können Teile der anfallenden Abwärme mithilfe von Ad- oder Absorptionskältemaschinen auch *intern* zur Kühlung genutzt werden. Das Beispiel einer Referenzanlage¹² zeigt, dass auf diese Weise der Strombedarf für die Kühlung ggü. einer Kompressionskältemaschine um ca. den Faktor 10 reduziert werden kann. Insgesamt fällt dadurch ca. 15% weniger Abwärme an. Nutzt man jedoch mit Hilfe von Sorptionsmaschinen Abwärme zusätzlich für eine *externe* Belieferung von Kälte zur Abgabe an Dritte, fällt in der Gesamtbilanz und bezogen auf die gesamte Abwärme der Referenzanlage 68 % *zusätzliche Abwärme* und 55 % *zusätzliche Kälteleistung* an. Das bedeutet, dass sich durch interne Nutzung zur Kälteerzeugung mittels Sorptionsanlagen das Abwärmepotenzial leicht verringert, wohingegen es sich bei externer Nutzung (in Form von Kältelieferung) nochmals deutlich erhöht. Wie Abb. 2-3 zeigt, stammt jedoch unabhängig davon der größte Leistungsbedarf – und somit auch das größte Abwärmepotenzial – ohnehin nicht aus der Kälteerzeugung, sondern aus der eigentlichen Server- und IT-Infrastruktur, und dies zukünftig noch mit steigender Tendenz.

Die zunehmende IT-Dichte sowie Rechenleistung und damit einhergehende notwendige Flüssigkühlung (Wärmequelle) sowie der Ausbau von Niedertemperatur-Wärmenetzen der 4. und 5. Generation (Wärmesenke) sind Faktoren, die das technische und wirtschaftliche Potenzial von Abwärmeprojekten in den nächsten Jahren stark verbessern können.

Tendenzielle Auswirkungen auf Abwärmennutzung:

- Neue und leistungsstärkere Rechenzentren inkl. neuer Hochtemperatur-Kühltechnologien: ↑

¹² Referenzanlage nach dem HotFlAd-Konzept (NeRZ und eco, 2019, S. 8 ff.): IT (Server, Netzwerk, Speicher): 23 kW_{el}, Kompressionskältemaschine: 5 kW_{el}, sonstige Verbraucher (Verluste USV, Beleuchtung, Brandschutz etc.): 3 kW_{el}; Summe Leistungsaufnahme Strom: 31 kW_{el} Abwärmereduktion bei *interner* Nutzung zur Kälteerzeugung mittels Adsorptionskältemaschine (0,5 kW_{el}): $(31 - 26,5) / 31 = 15\%$; Zusätzliche Kälteleistung bei *externer* Belieferung von Kälte mittels Adsorptionskältemaschine (1 kW_{el}): $17/31 = 55\%$; Zusätzliche Abwärme bei *externer* Belieferung von Kälte $(52-31)/31 = 68\%$.

3 Zusammenfassung und Fazit

In Tab. 3-1 sind die in dieser Kurzstudie identifizierten Einflussfaktoren im Kontext der Industrie- und Energietransformation und ihre möglichen Auswirkungen auf die zukünftige Entwicklung von Abwärmepotenzialen zusammengefasst.

Tab. 3-1: Einflussfaktoren und Auswirkungen der Industriedekarbonisierung auf die Nutzung industrieller Abwärme

Einflussfaktor	Auswirkungen	Tendenz Abwärmepotenzial
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> Sinkende Primärproduktion durch Suffizienz, Energie- und Materialeffizienz, Kreislaufwirtschaft Produktwechsel: Phase-out fossiler Produkte (z.B. Heizöl, Benzin) Renewables Pull: Import energieintensiver Produkte (z.B. Eisenschwamm DRI oder Ammoniak) 	
Prozesswechsel	<ul style="list-style-type: none"> Phase-out abwärmeintensiver Prozesse (z.B. Ersatz Hochofenroute durch H₂-Direktreduktions-Anlage, additive Fertigung von Turbinenschaufeln im 3-D-Drucker statt Metallgießen) 	
Elektrifizierung	<ul style="list-style-type: none"> Erhebliche Effizienzverbesserung: bessere Dosierung, keine Abgase (z.B. elektrischer Kalzinator bei der Zementklinkerproduktion) 	
Erneuerbare Wärme	<ul style="list-style-type: none"> Geringere Abwärmeströme, sofern Verbrennungsprozesse vollständig oder teilweise durch Tiefengeothermie bzw. Solarthermie ersetzt werden Ggf. (zeitweise) zusätzlich nutzbare Potenziale aus erneuerbarer Überschusswärme Gleichbleibende Abwärmeströme bei Einsatz biogener oder synthetischer erneuerbarer Brennstoffe 	
PtX-Synthese	<ul style="list-style-type: none"> Bei H₂-Produktion (Elektrolyse) sowie Bereitstellung synthetischer Kohlenwasserstoffe (Methanol-Synthese, Fischer-Tropsch-Prozess) möglicherweise hohe zusätzliche Abwärmemengen 	
iCCS/CCU DAC	<ul style="list-style-type: none"> Je nach Prozess höherer Wärme- und/oder Strombedarf: Bei höherem Wärmebedarf ggf. Nutzung (bislang ungenutzter) Abwärmeströme anstelle von Abwärmeabgabe an Dritte (z.B. bei Post-Combustion-Carbon-Capture oder Niedertemperatur-Direct-Air-Capture) Pre-Combustion & Oxyfuel Carbon-Capture: Kein oder nur geringer Einfluss auf Abwärmeströme 	
Rechenzentren	<ul style="list-style-type: none"> Neue und leistungsstärkere Rechenzentren inkl. neuer Hochtemperatur-Kühltechnologien 	

iCCS: Industrielles Carbon Capture and Storage, CCU: Carbon Capture and Usage, DRI: Direct Reduced Iron, DAC: Direct Air Capture

Legende zu Auswirkungen eines Einflussfaktors auf zukünftige Abwärmepotenziale:

- Einflussfaktor führt zu ...
- ↑ maßgeblicher Steigerung der Abwärmepotenziale
 - ↗ mäßiger Steigerung der Abwärmepotenziale
 - in etwa unveränderter Ausprägung der Abwärmepotenziale (bzw. Auswirkungen unklar)
 - ↘ mäßiger Minderung der Abwärmepotenziale
 - ↓ maßgeblicher Minderung der Abwärmepotenziale

Insgesamt zeigt sich, dass die Auswirkungen der Transformation im Industriesektor auf die Abwärmepotenziale komplex sind: Sowohl **verstärkende** als auch **abschwächende Faktoren** beeinflussen das Potenzial für industrielle Abwärme im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung der Industrie.

Zu den abschwächenden Faktoren zählen **Suffizienz** in der Produktnachfrage, **Energieeffizienz** in der Produktanwendung (z. B. von Brenn- und Treibstoffen) sowie insbesondere Erfolge in der **Kreislaufwirtschaft** und bei der **Materialeffizienz** in der Produktion. Letztere führen dazu, dass weniger Primärrohstoffe produziert werden (müssen). Da die **Elektrifizierung** in der Regel mit einer deutlichen Effizienzsteigerung einhergeht, wird auch im Zusammenhang mit dieser wichtigen Klimaschutzmaßnahme mit einer Verringerung der Abwärmemengen gerechnet.

Radikale **Prozesswechsel** (z. B. der Umstieg von der Hochofenroute auf Direktreduktion DRI in der Stahlindustrie), vermehrter **Import energieintensiver Rohstoffe** bzw. Zwischenprodukte (z. B. Eisenschwamm) oder der vollständige **Ausstieg aus fossilen Produkten** (z. B. Heizöl, Benzin) können ebenfalls zu Verlusten an Abwärmepotenzialen aus den damit verbundenen Produktionsprozessen führen. Diese Verluste werden jedoch zumindest teilweise durch die Produktion neuer synthetischer Produkte (**PtX-Synthese**) an anderer Stelle ausgeglichen. Inwieweit diese neuen Anwendungen bestehende Abwärmepotenziale ersetzen bzw. neue entstehen lassen, hängt in hohem Maße von der zukünftigen inländischen Produktionsmenge von PtX-Produkten, den eingesetzten Verfahren sowie der internen Wärmeintegration in komplexen Anlagenstrukturen ab.

Beim Einsatz **erneuerbarer Wärme** sind grundsätzlich geringere Abwärmeströme zu erwarten, sofern Verbrennungsprozesse vollständig oder teilweise durch Tiefengeothermie oder Solarthermie ersetzt werden. Werden fossile Brennstoffe hingegen durch biogene oder synthetische erneuerbare Brennstoffe ersetzt, hat dies kaum Auswirkungen auf die Abwärmepotenziale.

Die Auswirkungen des Einsatzes neuer Anwendungen wie die **CO₂-Abscheidung** aus industriellen Anlagen (**iCCS/CCU**) oder aus der Luft (**DAC**) hängen von den jeweiligen spezifischen Prozesskonfigurationen und deren Randbedingungen ab und erfordern eine Einzelfallbetrachtung. So sind beispielsweise die Aminwäsche (Post-Combustion) als ein für die Nachrüstung geeignetes Carbon-Capture-Verfahren ebenso wie Niedertemperatur-Direct-Air-Capture beides wärmeintensive Prozesse, die zukünftig in Konkurrenz zu freier Abwärme treten könnten.

Nicht unmittelbar mit der Industrietransformation verbunden ist der erwartete starke Ausbau neuer und leistungsfähigerer **Rechenzentren**. Für diese zuverlässige und konstante Abwärmequelle werden in Zukunft stark wachsende Potenziale prognostiziert. Durch den Einsatz neuer Hochtemperatur-Kühltechnologien kann zudem das Temperaturniveau und somit die Qualität der Abwärme aus Rechenzentren verbessert werden.

Die Untersuchung zeigt, dass Abwärme grundsätzlich auch in Zukunft ein wichtiger Baustein bei der Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung sein kann. Bei der Entwicklung konkreter Abwärmeprojekte sollten jedoch die hier untersuchten Einflussfaktoren und ihr möglicher Einfluss auf zukünftige Potenzialänderungen berücksichtigt werden, um die langfristige Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Kurzstudie konnten die Wirkmechanismen der Einflussfaktoren auf die Abwärmepotenziale zunächst nur qualitativ beschrieben werden. Eine detaillierte quantitative Analyse ist noch ein offenes Feld für zukünftige Forschungsarbeiten.

Literaturverzeichnis

- Agora Energiewende (Hrsg.). (2019). Klimaneutrale Industrie (Hauptstudie) Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement.
- Agora Energiewende. (2023). Breaking free from fossil gas—A new path to a climate-neutral Europe. (S. 86) [Studie]. Agora Energiewende. <https://www.agora-energiewende.org/publications/breaking-free-from-fossil-gas>
- Agora Think Tanks. (2024). Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung. Agora Think Tanks. <https://www.agora-energiewende.de/publikationen/klimaneutrales-deutschland-studie>
- Arpagaus, C. (2019, Juni 26). Wärmepumpen für die Industrie: Eine aktuelle Übersicht. 25. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“ 26. Juni 2019, BFH Burgdorf/CH. 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
- Block, S., Viebahn, P., & Jungbluth, C. (2024). Analysing direct air capture for enabling negative emissions in Germany: An assessment of the resource requirements and costs of a potential rollout in 2045. *Frontiers in Climate*, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2024.1353939>
- BMJV. (2023, Dezember 20). Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz—WPG). <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/BJNR18A0B0023.html>
- Boymans, E., & Liakakou, E. (2018, Februar). Advanced liquid biofuels synthesis. Adding value to biomass gasification. Energy research Centre of the Netherlands (ECN). <https://publications.tno.nl/publication/34629460/dQ3r61/e17057.pdf>
- Brexel, D. (2024). Klimaneutrale Zementregion Erwitte / Geseke—Machbarkeitsanalyse für die Dekarbonisierung der heimischen Zementindustrie (S. 56) [Studie]. Stadt Erwitte. https://www.erwitte.de/fileadmin/user_upload/Internet/Inhalte/Wirtschaft/2024-02-16_KNZR_Abschlussbericht_Druckversion.pdf
- CI4C. (2024). Das Projekt catch4climate (FAQs CI4C). <https://catch4climate.com/faqs/>
- Consentec, Fraunhofer ISI, ifeu, & TU Berlin. (2024). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 (O45-Szenarien). BMWK. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>
- Dahiru, A. R., Vuokila, A., & Huumantanen, M. (2022). Recent development in Power-to-X: Part I - A review on techno-economic analysis. *Journal of Energy Storage*, 56, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105861>
- Darde, A., Prabhakar, R., Tranier, J.-P., & Perrin, N. (2009). Air separation and flue gas compression and purification units for oxy-coal combustion systems. *Energy Procedia*, 1(1), 527–534. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.070>
- DENEFF, IWN und IER. (2023, Mai). Best-Practice-Übersicht: Von inspirierenden Projekten zur Abwärmenutzung aus Rechenzentren lernen. <https://deneff.org/wp-content/uploads/2023/05/Bytes2Heat-Best-Practice-Uebersicht.pdf>

- Deutz, S., & Bardow, A. (2021). Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. *Nature Energy*, 6(2), 203–213. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00771-9>
- ECRA. (2012). ECRA CCS Project – Report on Phase III (Technical Report No. TR-ECRA-119/2012; S. 107). European Cement Research Academy (ECRA). https://api.ecra-online.org/fileadmin/files/ECRA_Technical_Report_CCS_Phase_III.pdf
- ECRA. (2022). The ECRA Technology Papers 2022—State of the Art Cement Manufacturing—Current Technologies and their Future Development. (S. 217). European Cement Research Academy. https://api.ecra-online.org/fileadmin/files/tp/ECRA_Technology_Papers_2022.pdf
- Energieeffizienzgesetz (EnEfG), Pub. L. No. Teil I Nr. 309, 18 (2023). <https://www.gesetze-im-internet.de/enefg/BJNR1350B0023.html>
- EU Energy Efficiency Directive (EED), 111 (2023). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791>
- Fallisch, A., Kiemel, S., Lehnert, F., Miehe, R., Smolinka, T., Wiebe, N., & Tjarks, G. (2018, Juni). Industrialization of Water Electrolysis in Germany: Towards a GW Industry for a Successful Transition of the Energy Sector to Renewable Energies. A short overview about the main results of the study. 22nd World Hydrogen Energy Conference (WHEC) 2018, Rio de Janeiro, Brazil. <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-405064>
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- Fleiter, T., Rehfeldt, Dr. M., Hirzel, Dr. S., Neusel, L., Aydemir, Dr. A., Schwotzer, Dr. C., Kaiser, F., Gondorf, C., Hauch, J., Hof, J., Sankowski, L., & Langhorst, M. (2023). CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung: Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>
- Franco, A., & Giovannini, C. (2023). Recent and Future Advances in Water Electrolysis for Green Hydrogen Generation: Critical Analysis and Perspectives. *Sustainability*, 15(24), 16917. <https://doi.org/10.3390/su152416917>
- GET H2. (2024, Dezember). Factsheet Nebenprodukte Elektrolyse. <https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/GET-H2-Factsheet-Nebenprodukte-Elektrolyse-241203.pdf>
- Görner, K., & Lindenberger, D. (2018). Virtuelles Institut „Strom zu Gas und Wärme“, Band II Pfadanalysen: Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht des Hauptprojekts (2015 – 2017) (S. 99). GWI, EWI. <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2018/10/Virtuelles-Institut-SGW-Band-II-Pfadanalyse.pdf>
- NeRZ und eco. (2019). Abwärmennutzung im Rechenzentrum—Ein Whitepaper vom NeRZ in Zusammenarbeit mit dem eco – Verband der Internetwirtschaft e. V. <https://nerz.de/2019/07/26/nerz-whitepaper-zum-thema-abwaermenutzung/>
- Ozkan, M. (2025). Atmospheric alchemy: The energy and cost dynamics of direct air carbon capture. *MRS Energy & Sustainability*, 12(1), 46–61. <https://doi.org/10.1557/s43581-024-00091-5>
- Pfeifer, H. (2013). Handbuch Industrielle Wärmetechnik—Grundlagen—Berechnungen—Verfahren (5.). Vulkan-Verlag. <http://d-nb.info/1038398673>

- Postweiler, P., Engelpracht, M., Rezo, D., Gibelhaus, A., & von der Assen, N. (2024). Environmental process optimisation of an adsorption-based direct air carbon capture and storage system. *Energy Environ. Sci.*, 17(9), 3004–3020. <https://doi.org/10.1039/D3EE02970K>
- Samadi, S., Fischer, A., & Lechtenböhmer, S. (2023). The renewables pull effect: How regional differences in renewable energy costs could influence where industrial production is located in the future. *Energy Research & Social Science*, 104, 103257. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103257>
- Saravia, F., & Gehrmann, S. (2024, Juni). Gesamtwasserbedarf für die Wasserelektrolyse. Wie groß ist der Wasserfußabdruck einschließlich Kühlsysteme? Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW). <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/wasserelektrolyse-gesamtwasserbedarf-factsheet-dvgw.pdf>
- Scholz, A., Kloos, Y., Theisen, S., Saurat, M., Schneider, C., Meisel, K., Röder, L., Dögnitz, N., Cyffka, K.-F., Stäpf, D., & Reeves, A. (2025). Unsicherheiten überwinden, grüne Märkte erschließen: Kompass zur Defossilisierung der Petrochemie in Deutschland. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8856/file/8856_GreenFeed.pdf
- Schüwer, D., & Holtz, G. (2023). Bereitstellung klimaneutraler Prozesswärmefür die Industrie: Ein 4-Stufen-Modell. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 73(10), 37–40. <https://nbnresolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-84165>
- Schüwer, D., Kurwan, J., & Samadi, S. (2024). Die Rolle der Abwärme in Klimaschutzszenarien. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 74(7–8), 37–39. <http://nbnresolving.de/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-85745>
- Sternberg, A., Jens, C. M., & Bardow, A. (2017). Life cycle assessment of CO₂-based C1-Chemicals. *Green Chemistry*, 19(9), 2244–2259. <https://doi.org/10.1039/C6GC02852G>
- Verpoort, P. C., Gast, L., Hofmann, A., & Ueckerdt, F. (2024). Impact of global heterogeneity of renewable energy supply on heavy industrial production and green value chains. *Nature Energy*, 9(4), 491–503. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01492-z>
- Wenzel, H., Müller, G., Harzendorf, F., Schöb, T., Kullmann, F., Weinand, J. M., & Stolten, D. (2025). Towards water-conscious green hydrogen and methanol production: A techno-economic review. *Nexus*, 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.nynexs.2025.100054>
- Zelt, O., Kobiela, G., Ortiz, W., Scholz, A., Monnerie, N., Rosenstiel, A., & Viebahn, P. (2020). Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe. MENA-Fuels: Teilbericht 3 des Wuppertal Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (S. 272) [Teilbericht]. Wuppertal Institut, DLR, IZES. https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels_Teilbericht3_Technologiebewertung.pdf
- Zelt, O., Scholz, A., & Viebahn, P. (2021). Auswahl der zu bewertenden synthetischen Kraftstoffe und ihrer Bereitstellungstechnologien. MENA-Fuels: Teilbericht 1 des Wuppertal Instituts an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). (S. 26) [Teilbericht]. Wuppertal Institut, DLR, IZES. https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/MENA-Fuels_Teilbericht1_Technologieauswahl.pdf