

INDUSTRIEWÄRME KLIMANEUTRAL: STRATEGIEN UND VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE TRANSFORMATION

Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme

Dieses Dokument wird von folgenden Unternehmen und Institutionen getragen:



Eine Initiative der NRW-Landesregierung

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



IN4climate.NRW lebt von der Diskussion und den verschiedenen Standpunkten der beteiligten Unternehmen und Organisationen. IN4climate.NRW versteht sich nicht als Verband, der die Interessen seiner Mitglieder aktiv in der Politik vertritt. Die Initiative stellt eine Plattform zum Meinungsaustausch und Diskurs dar. In diesem Umfeld entstehen Papiere und Ausarbeitungen, die von einzelnen Mitgliedern erarbeitet, diskutiert und ausformuliert werden. Andere Mitglieder können sich in einem strukturierten Prozess den Ergebnissen oder Diskussionsbeiträgen explizit anschließen und das Dokument mittragen. Alle IN4climate.NRW-Mitglieder, die sich zu einer Unterzeichnung explizit entschlossen haben, werden transparent aufgeführt. Dies erlaubt aber keine Aussage zur Positionierung anderer nicht aufgeführter IN4climate.NRW-Mitglieder. Die Geschäftsstelle von IN4climate.NRW stellt Transparenz und Beteiligungsmöglichkeiten sicher.

AutorInnen: Tania Begemann (IN4climate.NRW), Dr. Marcus Budt (Fraunhofer UMSICHT), Dr. Christoph Glasner (Fraunhofer UMSICHT), Dr. Stefan Herrig (IN4climate.NRW), Christiane Reinert (RWTH Aachen), Dietmar Schüwer (Wuppertal Institut)

Beiträge von: Manuel Bosse (BDG-Service), Bernd Dettmer (Deutsche Rohstofftechnik), Andreas Doerfer (Covestro Deutschland AG), Frank Düssler (GMH Gruppe), Dr. Rüdiger Franck (Currenta), Ute Just (Speira), Malte Küper (IW Köln), Dr. Anna Leipprand (Wuppertal Institut), Clemens Schneider (Wuppertal Institut), Martin Schröder (Kabel Premium Pulp & Paper), Dr. Bernhart Stranzinger (BFI), Roman Volmer (TRIMET Aluminium SE), Dr. Michael Walther (IN4climate.NRW)

Bibliographische Angaben

Herausgeber: IN4climate.NRW GmbH
Veröffentlicht: Juni 2021 (korrigierte 2. Auflage)
Koordination: Tania Begemann, Dr. Stefan Herrig (IN4climate.NRW);
Dr. Christoph Glasner (Fraunhofer UMSICHT)
Kontakt: tania.begemann@in4climate.nrw, stefan.herrig@in4climate.nrw
christoph.glasner@umsicht.fraunhofer.de

Bitte zitieren als: IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021: Industrierwärme klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme, Gelsenkirchen.

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN

- Die **industrielle Wärmewende darf bei der Energiewende nicht vernachlässigt werden**. Die Wärmewende auf Basis erneuerbarer Energieträger muss jetzt berücksichtigt werden. Denn nur so können die deutschen Ziele zur Minderung der Treibhausgasemissionen (THG) für das Jahr 2030 gegenüber dem Jahr 1990 erreicht werden – und damit zukünftig Klimaneutralität.
- Die Veränderungen für die **Wärmewende** sind komplex und müssen **gesamtsystemisch**, d. h. sektor-, stakeholder- und branchenübergreifend, angegangen werden.
- **Effizienzsteigerungen** sind ein wichtiger Baustein. Wärme, die gar nicht erst produziert werden muss, hat die beste Treibhausgasbilanz. Entsprechende Maßnahmen sind prioritär zu betrachten und müssen durch geeignete Rahmenbedingungen und Anreize flankiert werden. Für eine Priorisierung beim Energieeinsatz kann das in diesem Papier dargestellte **Vier-Stufen-Modell** eine gute Hilfestellung leisten.
- Unter den erneuerbaren Wärmequellen kann **Tiefengeothermie** für einige Branchen und insbesondere für Anwendungen auf niedrigerem Temperaturniveau einen wichtigen Beitrag **als grundlastfähige Wärmequelle** leisten. Hierzu müssen die natürlichen Potenziale in NRW stärker erkundet und erschlossen werden.
- Der Bedarf industrieller Hochtemperaturprozesse kann in NRW nicht allein durch lokale erneuerbare Wärmequellen gedeckt werden. Eine **ausreichende Bereitstellung von erneuerbar erzeugtem Strom, Gas und anderen biogenen Brennstoffen** ist daher für eine klimaneutrale Wärmeversorgung essenziell.
 - Der **lokale Ausbau der Erneuerbaren Energien** muss beschleunigt werden.
 - Bei der Netzplanung sind industrielle Bedarfe mit einem ausreichenden Planungshorizont zu berücksichtigen (z. B. **Netzentwicklungsplanung Strom und Gas** bis 2045 / 2050).
- Unternehmen brauchen **Planungssicherheit hinsichtlich der Verfügbarkeit THG-armer Energieträger** in Bezug auf Menge und Infrastruktur sowie deren Kostenentwicklung. Nur so können Technologieoptionen zur klimaneutralen Wärmeversorgung bewertet und umgesetzt werden.
- **Technologien müssen (weiter-)entwickelt** werden, insbesondere hinsichtlich einer vollständigen oder teilweisen Elektrifizierung sowie des Einsatzes von grünem Wasserstoff, biogenen oder anderen alternativen Brennstoffen. Ihre industrielle Anwendung sollte durch Förder- und Pilotprojekte beschleunigt werden. Laufende Forschungsprojekte müssen eng mit der Industrie verknüpft sein.
- Industrielle Wärmeverbraucher können durch Sektorenkopplung einen wichtigen Beitrag zu einer verbesserten Netzauslastung und zur **Stabilisierung der Stromnetze** bei zunehmendem Anteil Erneuerbarer Energien leisten. Um **Energiedienstleistungen** zu ermöglichen und ökonomisch attraktiv zu gestalten, ist eine Nachjustierung der Abgaben und Umlagen auf Strom und Netze notwendig.
- Die weitere Entwicklung und Markteinführung von **(Hochtemperatur-)Wärmespeichern** ist ein Schlüsselement, um erneuerbare Energiepotenziale besser auszuschöpfen, Systemkosten zu minimieren und Systemdienstleistungen zu erbringen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage (Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
CAPEX	Capital Expenditure (Investitionskosten)
CCS	Carbon Capture and Storage (Kohlenstoffabscheidung und -speicherung)
CCU	Carbon Capture and Utilisation (Kohlenstoffabscheidung und -nutzung)
DAC	Direct-Air-Capture
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
NEP	Netzentwicklungsplan
OPEX	Operational Expenditure (Betriebskosten)
ORC	Organic-Rankine-Cycle
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtHtP	Power-to-Heat-to-Power
TEG	Thermoelektrische Generatoren
THG	Treibhausgas
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
WärmeLV	Wärmelieferverordnung
WP	Wärmepumpe

INHALT

UNSERE KERNBOTSCHAFTEN	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	4
1. ZIEL UND KONTEXT	6
2. HEUTIGE UND ZUKÜNFTIGE ANFORDERUNGEN	7
2.1 Heutiger Wärmebedarf	9
2.2 Entwicklung des Wärmebedarfs.....	10
2.3 Heutige fossile Wärmebereitstellung	12
2.4 Zukünftige Wärmebereitstellung auf Basis Erneuerbarer Energien.....	13
3. VIER-STUFEN-MODELL DER KLIMANEUTRALEN WÄRMEVERSORGUNG	19
3.1 Energieeffizienz sowie Abwärmenutzung	20
3.2 Erschließung lokaler erneuerbarer Wärmequellen.....	21
3.3 Elektrische Wärmeerzeugung / PtH	22
3.4 Alternative Energieträger.....	23
4. HERAUSFORDERUNGEN DER WÄRMEWENDE	26
5. WIE MACHEN WIR UNS JETZT AUF DEN WEG?	30
LITERATUR	33

1. ZIEL UND KONTEXT

Die Corona-Pandemie beherrscht nach wie vor das mediale Geschehen weltweit. Trotz der vielen Einschnitte, die mit der Pandemie einhergehen, darf deren Bekämpfung jedoch nicht dazu führen, dass die Bewältigung der Klimakrise in den Hintergrund tritt. Mit Blick auf mittel- und langfristige Klimaziele ist die große Herausforderung, die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) auf Null zu senken. Auf europäischer Ebene wird das Ziel der Treibhausgasneutralität bis spätestens zum Jahr 2050 angestrebt. Die Bundesregierung hat ihre nationalen Klimaschutzziele im Mai 2021 noch einmal nachgeschärft und strebt jetzt nach Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 mit dem Zwischenziel, die THG-Emissionen bis 2030 um 65 Prozent und bis 2040 um 88 Prozent im Vergleich zu 1990 zu reduzieren. Um diese Ziele erreichen zu können, müssen wichtige Weichen jetzt gestellt werden. Aktuell laufen vor diesem Hintergrund bereits viele Forschungs- und Pilotprojekte, Initiativen, Diskussionen etc., um die notwendigen Technologien, Infrastrukturen und Rahmenbedingungen für den Transformationsprozess zu schaffen. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Umstellung auf eine versorgungssichere und vollständig auf Erneuerbaren Energien basierende Stromerzeugung, der Aufbau notwendiger Speicherinfrastruktur sowie einer Wasserstoffwirtschaft, die Vermeidung bzw. Nutzung von entstehenden THG sowie die Verbesserung und Ausweitung der Energieeffizienz und der Kreislaufwirtschaft. Prozessinnovationen, wie die sogenannten Low-Carbon-Breakthrough-Technologien (z. B. Wasserstoffdirektreduktion zur Stahlproduktion, Ersatz von Carbonaten durch Hydroxide in der Glasherstellung) oder die Umstellung der Produktpalette auf grüne und nachhaltigere Produkte können zur Vermeidung von Prozessemissionen in der Industrie beitragen. Darüber hinaus sind insbesondere die energiebezogenen Emissionen ein wichtiger zu betrachtender Faktor. Einer klimaneutralen Wärmeversorgung wurde hingegen bisher wenig Beachtung zuteil. Zahlen des Umweltbundesamtes (UBA 2021) zeigen deutlich, dass die Wärmewende im Vergleich zur Stromwende in der letzten Dekade nahezu stagnierte (siehe Abbildung 1).

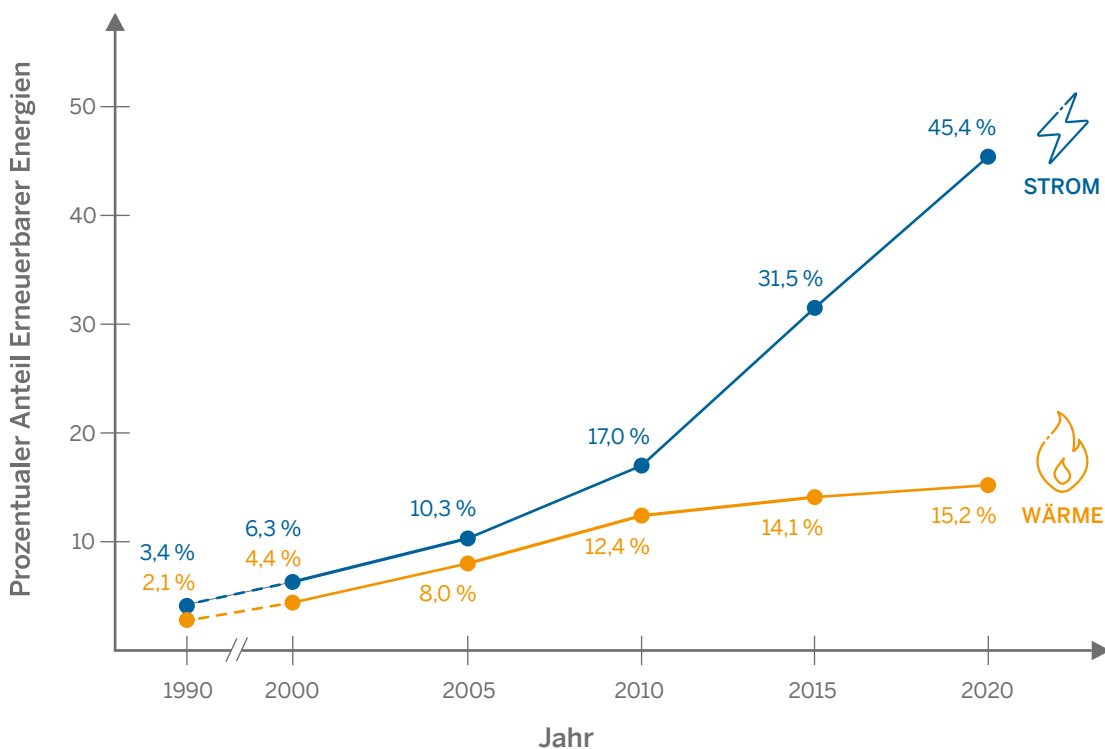


Abbildung 1: Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostrombedarf und am Endenergiebedarf für Wärme (inkl. Kälteanwendungen); Eigene Darstellung nach UBA (2021) auf Basis AGEE-Stat; Stand 02/2021

Dabei steht schon jetzt fest: Durch die Stromwende allein wird die Energiewende nicht gelingen können, weshalb im Wärmebereich – ähnlich wie im Verkehrssektor – der Transformationsprozess dringend beschleunigt werden muss. Während im Gebäudebereich prinzipiell Lösungen vorhanden sind, um die Wärmeversorgung mit regenerativen Quellen umzusetzen, steht die industrielle Prozesswärmeversorgung u. a. aufgrund der hohen Temperaturniveaus vor ungleich größeren Herausforderungen. Das vorliegende Papier zeigt auf, welche primären Hemmnisse sowie Möglichkeiten zu deren Überwindung existieren.

THG-neutrale Wärmeversorgung erfordert gesamtsystemische Betrachtung

Die grundstoffproduzierende Industrie ist geprägt von Prozessen, die erhebliche Energiemengen in Form von Wärme benötigen. Aktuell wird diese Wärme größtenteils durch die Verbrennung fossiler Energieträger, wie z. B. Erd- oder Prozessgase, erzeugt. Mit dem Ziel klimaneutraler Produktionsprozesse sind weitere Effizienzsteigerungen unter Ausschöpfung aller technischen Möglichkeiten sowie der schrittweise Ersatz fossiler Brennstoffe durch nachhaltige Energieträger, wie z. B. grünen Strom oder Wasserstoff, notwendig. Dies bedingt in größerem Umfang auch den Einsatz alternativer Prozesstechnologien. Darüber hinaus werden eine zunehmende Kreislaufwirtschaft (und eine damit verbundene Zunahme der Sekundär- im Vergleich zur Primarroute) den Wärmebedarf einzelner Produktionsprozesse senken. Zu den Optionen effizienterer Technologien und Prozesse zählen insbesondere die sektorübergreifende Abwärmenutzung, die Einbindung bzw. Umstellung auf regenerative Wärmequellen, die Elektrifizierung der Prozesswärmeerzeugung sowie der Einsatz neuer und regenerativer Brennstoffe. Die hierfür notwendigen Anpassungen werden nicht nur lokal stattfinden müssen, sondern bedürfen auch einer entsprechenden Energieversorgungsinfrastruktur. Das macht es notwendig, die Wärmeversorgung und deren Veränderungen gesamtsystemisch anzugehen (siehe hierzu auch Kapitel 5).

Das vorliegende Papier soll zeigen, was jetzt für eine klimaneutrale Wärmeversorgung der Industrie insbesondere technologisch und regulatorisch auf den Weg gebracht werden muss.

2. HEUTIGE UND ZUKÜNFTIGE ANFORDERUNGEN

Die grundstoffproduzierende Industrie zeichnet sich durch energieintensive und damit neben strom- auch wärmeintensive Prozesse aus. Die nachfolgende Tabelle führt Prozessbeispiele sowie die jeweils zugehörigen Anforderungen an die Temperaturbereiche und die derzeitige Energiequelle zur Wärmebereitstellung auf.

Die Beispiele aus Tabelle 1 verdeutlichen, dass die Wärmeversorgung der Industrie branchenspezifisch betrachtet werden muss. Eine klimaneutrale industrielle Wärmeversorgung benötigt individuelle Lösungen für unterschiedliche Prozesse und Temperaturbereiche. Einerseits verfügen gerade kleine und mittlere Betriebe heute noch nicht über die benötigten Anschlussleistungen, um z. B. Schmelzprozesse zu elektrifizieren. Andererseits sei hier erwähnt, dass sich nach heutigem Wissensstand nicht alle Prozesse elektrifizieren lassen. Insbesondere im Hochtemperaturbereich wird derzeit mit Brennern gearbeitet, in denen Erdgas mit reinem Sauerstoff verbrannt wird. Dadurch sind Flammtemperaturen bis ca. 2.860 °C realisierbar. Die Wärmeversorgung in diesen Temperaturbereichen wird in Zukunft voraussichtlich durch klimaneutrale Verbrennungsprozesse sichergestellt werden müssen. Aber auch Prozesse der Wärmebereitstellung, die aus technologischer Sicht einfacher elektrifizierbar sind, können insbesondere bei hoher thermischer Leistung aufgrund von Anforderungen an die Versorgungs- bzw. Ausfallsicherheit oder spezielle Prozessanforderungen und baulicher Einschränkungen vorhandener Anlagentechnik derzeit nicht oder nicht ausschließlich elektrisch betrieben werden. Je nach Prozess wird zukünftig der versorgungssichere und klimaneutrale Betrieb die Vorhaltung wechselweise betreibbarer Wärmeerzeugungsanlagen erfordern, die sowohl mit (fluktuierender) Elektrizität als auch mit speicherbaren, erneuerbaren Energieträgern betrieben werden können.

Tabelle 1: Anforderungen und Energiebereitstellung beispielhafter industrieller Wärmeprozesse ausgewählter Branchen.¹

Branche	Industrielle Prozesse	Temperaturanforderungen	Wärmeerzeuger	Heute eingesetzte Energieträger
Eisen und Stahl	Hochtemperatur-Schmelzprozesse	größtenteils um 1.500 °C, vereinzelt bis knapp 3.000 °C	Schmelzöfen	Koks, Strom*, Erd- und Prozessgase, Heizöl
	Wärmebehandlungen	von 400 °C bis über 1.200 °C	Wärmebehandlungsöfen	Erd- und Prozessgase, Strom*
	Anodenherstellung**	bis 1.000 °C	Brennofen	Erdgas
Chemie	Prozessdampferzeugung	ca. 200 °C bis über 500 °C	KWK-Anlagen, Gaskessel, Kohlekessel, Elektrodenkessel,	Erdgas Kohle Strom*
	Entsorgung (z. B. thermische Abluftreinigung)	über 1.000 °C	Zusatzfeuerung	Erdgas
Papier und Pappe	Trocknungsprozesse (mittels Dampf, Heißluft, Infrarot)	I.d.R. ca. 160 °C, teilweise bis 350 °C	KWK-Anlagen, Heißluft-/ Infrarot-Trockner	Erdgas, Braunkohlestaub, (Klärschlamm), Strom*
Aluminium	Hochtemperatur-Schmelzprozesse	bis 1.000 °C	Schmelzflusselektrolyse	Strom*
	Anodenherstellung**		Brennöfen	Erdgas
	Gießereiprozesse, Weiterbearbeitung		Schmelzöfen, Wärmebehandlungsöfen	Erdgas, Strom*, Heizöl
Glas	Schmelzprozess	1.450 °C bis 1.650 °C	Schmelzwannen	Erdgas, Schweröl, Strom*
Zement	Klinkerbrennprozess: Kalzinierung Sinterung	bis ca. 900 °C bis 1.450 °C	Kalzinator Drehrohrofen	Abfallbasierte Brennstoffe, Kohle

* Strom: Sofern es sich um den Bezug von Netzstrom handelt, sind hierbei der aktuelle EE-Anteil und die resultierenden CO₂-Emissionen zu berücksichtigen.

** Anoden werden für die Schmelzflusselektrolyse bei der Aluminiumherstellung und in Elektrostahlöfen benötigt, es handelt sich daher um ein Vorprodukt der Eisen-, Stahl- und Aluminiumindustrie.

¹ Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf eine vollständige Auflistung aller relevanten Teilprozesse in der Industrie oder eingesetzten Wärmeerzeuger und Energieträger in den jeweiligen Branchen.

Im nächsten Kapitel werden der heutige industrielle Wärmebedarf mit dem Fokus auf NRW beschrieben, der zukünftige Wärmebedarf abgeschätzt und technologische Möglichkeiten aufgezeigt, wie Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus klimaneutral bereitgestellt werden könnte.

2.1 HEUTIGER WÄRMEBEDARF

Je nach Industriebranche wird eine Wärmeversorgung benötigt, die unterschiedliche Temperaturniveaus ermöglicht. In Abhängigkeit davon sind unterschiedliche Technologien zur heutigen und zukünftigen Wärmebereitstellung notwendig. Zugleich ist der Standort des Wärmebedarfes wichtig, insbesondere vor dem Hintergrund der Nutzung erneuerbarer Wärmequellen wie z. B. Tiefengeothermie sowie hinsichtlich der externen Nutzung von Abwärmepotenzialen. Im Folgenden werden daher die heutigen Wärmemengen in NRW nach Standorten und Temperaturniveaus abgeschätzt.

Hierzu wurde folgendes Vorgehen angewandt: Auf Basis der Branchenwärmebedarfe für Deutschland (Rohde 2016) und der meldepflichtigen Treibhausgasemissionen aus dem „European Pollutant Release and Transfer Register“ (von der Assen et al. 2016) wurden die industriellen Wärmebedarfe den verschiedenen Standorten in Nordrhein-Westfalen zugeordnet (siehe Abbildung 2). Basierend auf den THG-Emissionen je Standort wurde der Anteil eines Standortes an den deutschlandweiten Emissionen der jeweiligen Branche berechnet. Es wurde vereinfachend angenommen, dass je Standort der Anteil an den Emissionen dem Anteil am Gesamtwärmebedarf der jeweiligen Branche entspricht. Zudem werden ausschließlich meldepflichtige Standorte berücksichtigt; der Gesamtwärmebedarf der jeweiligen Branche wird auf diese Standorte aufgeteilt. Hinsichtlich der aus dem „European Pollutant Release and Transfer Register“ entnommenen Emissionsdaten ist anzumerken, dass im Register nicht zwischen energie- und prozessbedingten Emissionen unterschieden wird.

Insgesamt ergibt sich daraus ein industrieller Wärmebedarf in NRW von insgesamt ca. 180 Terawattstunden pro Jahr. Dieser Bedarf entspricht etwa einem Drittel des industriellen Gesamtwärmebedarfes in Deutschland. Diese Ergebnisse decken sich mit der Abschätzung in der Roadmap KWK.NRW (Schmidt et al. 2015), die mit zwei unterschiedlichen Heuristiken einen Wärmebedarf von 160 bis 180 Terawattstunden pro Jahr ermittelt hat.

Aus den branchenspezifischen Anteilen der Temperaturniveaus (Lutsch und Witterhold 2005) lassen sich die Wärmebedarfe in NRW in Abhängigkeit der Temperatur abschätzen. Insgesamt liegen jeweils ca. 20 Prozent des Wärmebedarfes unter 100 °C sowie zwischen 100 °C und 400 °C vor. Der größte Wärmebedarf (60 Prozent) besteht bei über 400 °C.

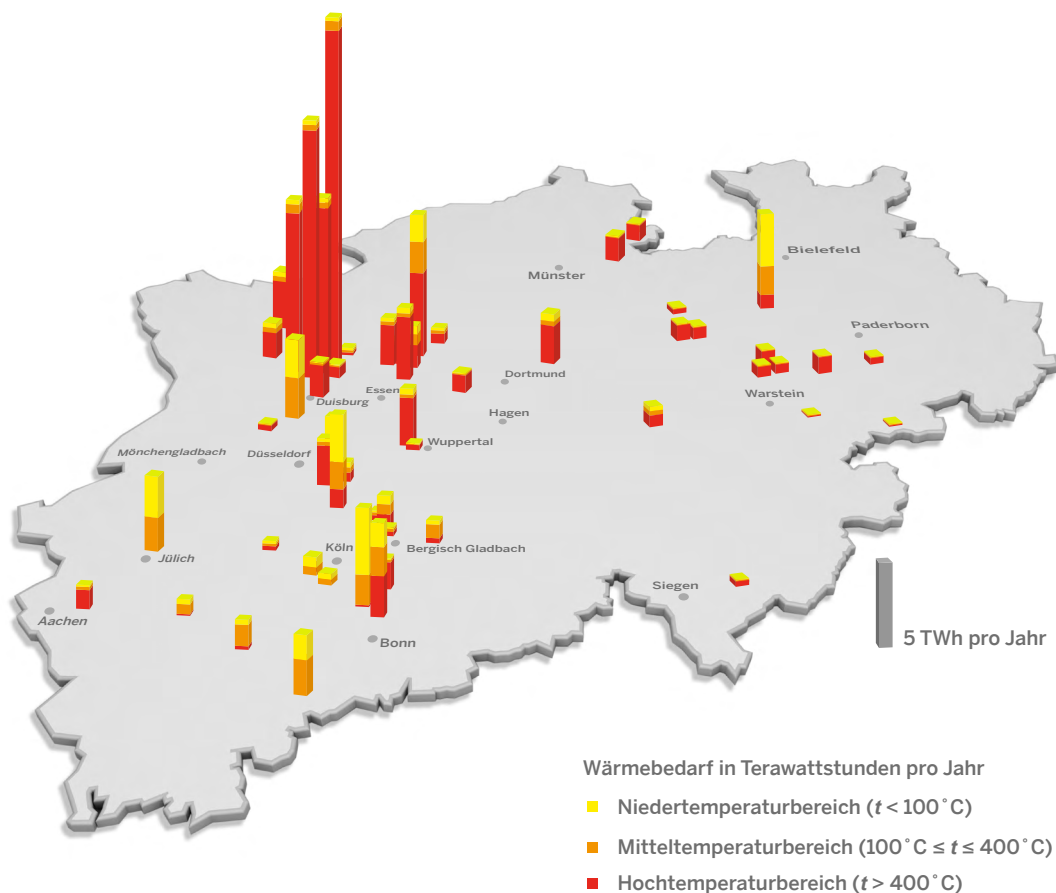


Abbildung 2: Heuristisch abgeschätzte industrielle Wärmebedarfe in Nordrhein-Westfalen nach Standort und Temperaturniveau für Standorte mit CO₂-Emissionen über 100.000 Tonnen pro Jahr

2.2 ENTWICKLUNG DES WÄRMEBEDARFS

Um den Transformationsprozess hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung entsprechend zu gestalten, ist es erforderlich, den zukünftigen Endenergiebedarf abzuschätzen. Unterschiedliche Szenarien (Sterchele et al. 2020, Robinius et al. 2020, Gerbert et al. 2018) zeigen, dass der industrielle Gesamtwärmebedarf für Deutschland je nach Eingangsparametern auf heutigem Niveau bleiben oder sogar sinken wird (siehe **Infobox** Szenarien). Allen Szenarien liegt die Annahme zugrunde, dass zwar die Wertschöpfung gesteigert wird, aber der dadurch steigende Wärmebedarf aufgrund von Effizienzsteigerungen (über-)kompensiert werden kann.

Laufende Untersuchungen im Rahmen des Projektes SCI4climate.NRW („Szenario des Wuppertal Instituts für ein klimaneutrales NRW 2050“) ergeben ein vergleichbares Bild bzgl. der Entwicklung des industriellen Wärmebedarfs in NRW. Abbildung 3 stellt den zukünftigen Endenergieeinsatz für Wärme in der nordrhein-westfälischen Industrie dar (ohne Raffinerien, Reduktionsmitteleinsatz in der Stahlindustrie, Strom-einsatz für Elektrolyse in der Aluminiumindustrie). Es zeigt sich, dass der Wärmebedarf in NRW bis 2050 gegenüber heute insbesondere durch Effizienzsteigerungen sinken könnte. Gleichzeitig geht das Szenario des Wuppertal Instituts von einer von heute bis 2050 in etwa gleichbleibenden Temperaturverteilung des Wärmebedarfes aus, sodass auch zukünftig etwa die Hälfte des Wärmebedarfes unter 500 °C (in der Regel Prozessdampf) und die andere Hälfte über 500 °C (meist Industrieöfen) liegen wird.

Infobox Szenarien

Szenarien sind keine gesicherten Prognosen und lassen auch keinen Rückschluss über die Wahrscheinlichkeit des skizzierten Szenarios zu. Vielmehr zeigen sie „Wenn-Dann-Beziehungen“ auf und dienen somit als Orientierung, um sowohl notwendige Entwicklungen als auch mögliche Fehlentwicklungen aufzuzeigen. Mit Szenarien lassen sich Transformationsprozesse gut veranschaulichen. Dazu müssen gewisse Annahmen getroffen werden wie z. B. die Verfügbarkeit einer bestimmten Technologie/Energiemenge ab dem Jahr X, die Umstellung eines Prozesses oder auch die Veränderung der Produktionsmenge. Diese Annahmen können das Endergebnis teils stark beeinflussen. Andersherum kann der abgeleitete Transformationsprozess auch durch fest gewählte Randbedingungen (z. B. Klimaneutralität im Jahr XY) normativ festgelegt werden. Aus solchen Betrachtungen lässt sich Orientierungswissen ableiten, das als Handlungshilfe für die Politik, Gesellschaft oder Forschung dienen kann, um Veränderungen einzuleiten (z. B. forcierte Entwicklung einer bestimmten Technologie).

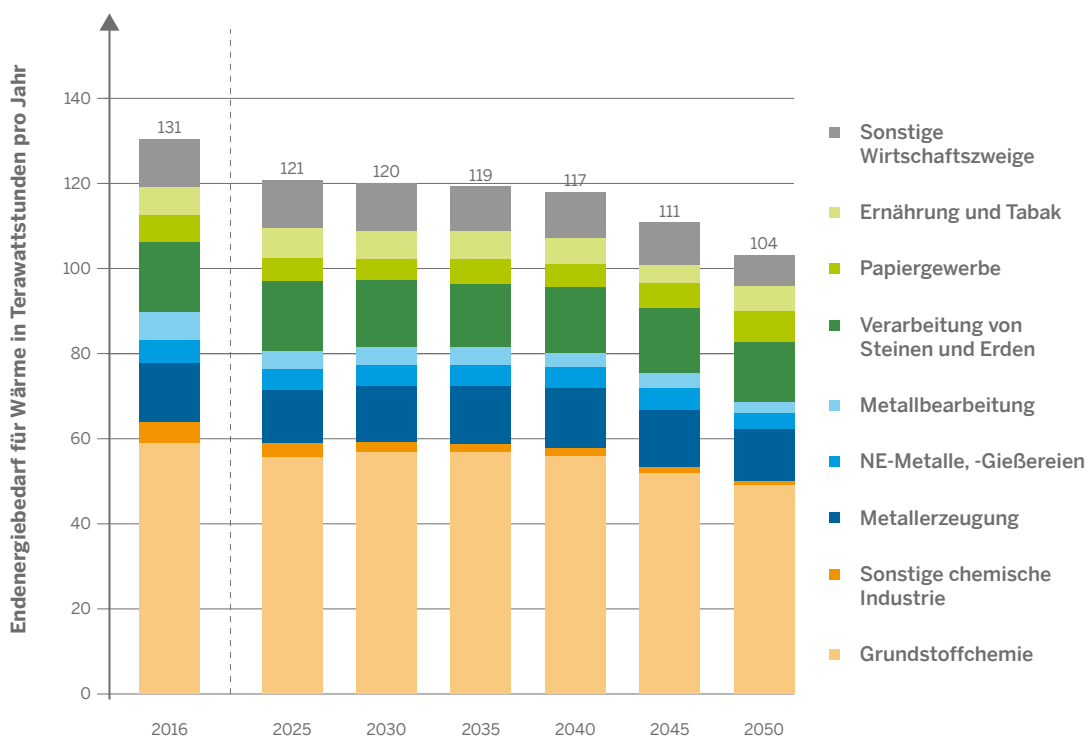


Abbildung 3: Klimaschutzszenario für die Entwicklung des Endenergiebedarfs für Wärme der nordrhein-westfälischen Industrie (ohne Raffinerien, Reduktionsmitteleinsatz in der Stahlindustrie und Strom-einsatz für Elektrolyse in der Aluminiumindustrie); Quelle: Szenario des Wuppertal Instituts für ein klimaneutrales NRW 2050

2.3 HEUTIGE FOSSILE WÄRMEBEREITSTELLUNG

Die Wärmebereitstellung erfolgt heutzutage größtenteils mittels Verbrennung fossiler Rohstoffe (siehe Tabelle 1). Zwar werden häufig hocheffiziente Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) oder auch in manchen Anwendungen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen (KWKK) eingesetzt, die insgesamt einen bedeutend besseren Wirkungsgrad und geringeren spezifischen THG-Ausstoß im Vergleich zu reinen Feuerungsanlagen und Kondensationskraftwerken aufweisen. Dennoch werden in der Mehrheit dieser Anlagen nach wie vor fossile Brennstoffe eingesetzt, mit denen ein klimaneutraler Betrieb – zumindest ohne den Einsatz von CCS – nicht möglich sein wird. Je nach Prozess und örtlichen Gegebenheiten lässt sich industrielle Abwärme intern oder extern für andere Prozesse oder Unternehmen nutzen und so der Brennstoffbedarf weiter verringern, jedoch meist nicht komplett vermeiden.

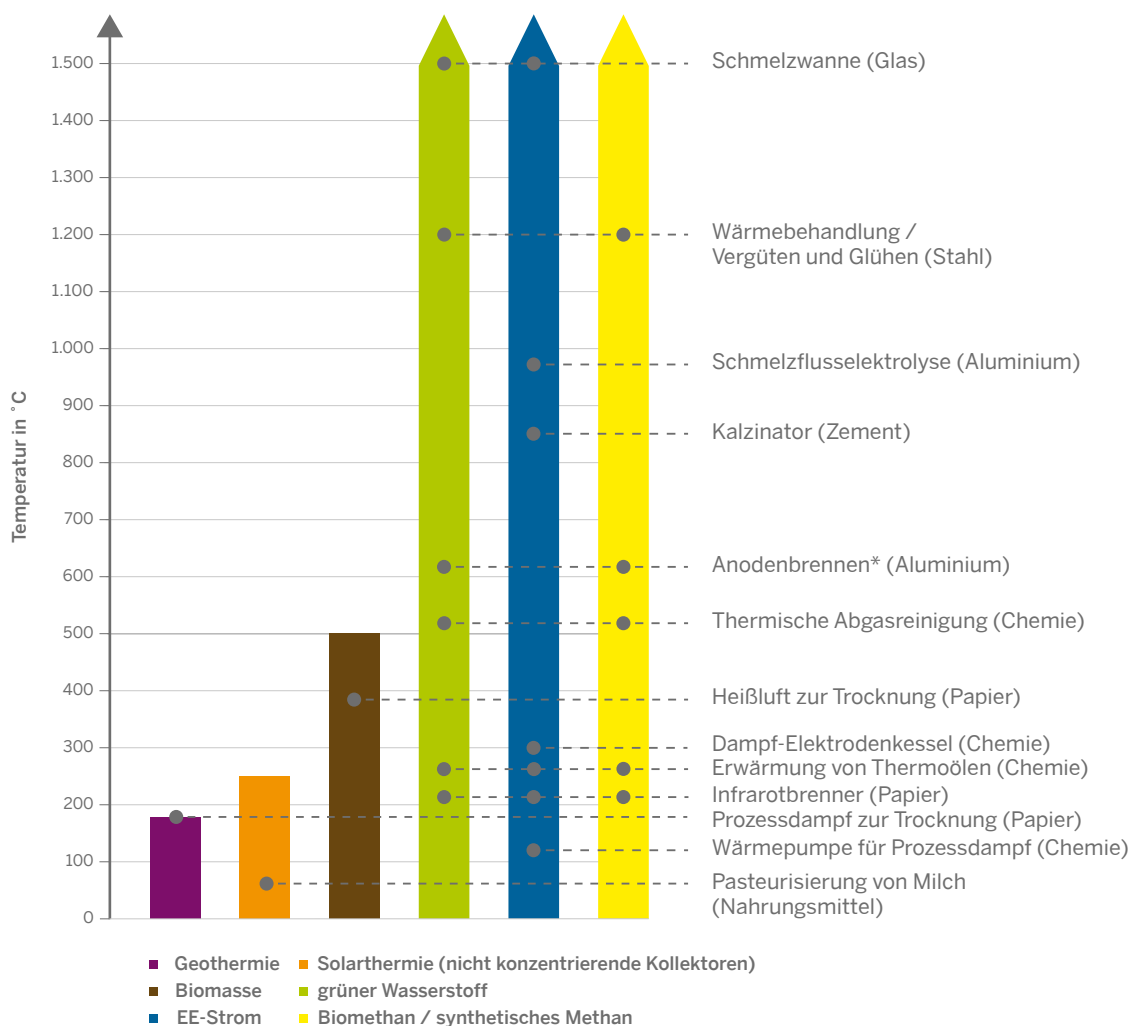
Perspektivisch kann eine vollständige Defossilisierung jedoch nur erfolgen, wenn die primäre Wärmeerzeugung auf Erneuerbaren Energien basiert. Eine zentrale Herausforderung wird dabei sein, für die jeweiligen Anwendungsbedingungen (Branche, Prozess, Temperaturniveau und weitere thermodynamische Anforderungen) die passende Wärmeversorgungstechnologie zu identifizieren und in den Markt zu bringen. In den Kapiteln 2.4 und 3 wird dies genauer beleuchtet. Soll bzw. muss (aus Potenzialgründen) zukünftig die gesamte Bandbreite der zur Verfügung stehenden erneuerbaren Technologien genutzt werden, so ist es erforderlich, das passende Temperaturniveau zur Wärmebereitstellung zu beachten – z. B. kann es zweckmäßig sein, im unteren Temperaturbereich der Wärmebereitstellung Wärmepumpen zur Aufwertung von Umwelt- oder Niedertemperaturabwärme einzusetzen. Neben der Energieeffizienz spielt hier also die optimale Nutzung der „Wertigkeit“ des eingesetzten Energieträgers, d. h. die effiziente Nutzung der Exergie (siehe **Infobox**) eine bedeutende Rolle.

Infobox zur Exergie

Mit Blick auf die Potenziale zukünftiger treibhausgasarmer Versorgungsoptionen wird deutlich, dass die Wertigkeit der Energie in Zukunft eine viel stärkere Rolle spielen muss, als es bisher der Fall ist. In der Thermodynamik wird für diese Wertigkeit der Begriff des „Exergiegehalts“ verwendet, der Werte zwischen Null (0 Prozent) und Eins (100 Prozent) annehmen kann. Exergie ist definiert als derjenige (von den Umgebungsbedingungen abhängige) Anteil der Energie, der zur Abgabe von Arbeit in der Lage ist. Der Exergiegehalt der besonders hochwertigen Energieform „Elektrische Energie“ liegt beispielsweise bei 100 Prozent, das heißt Strom lässt sich – zumindest in einem idealisierten Prozess – zu 100 Prozent in Arbeit umwandeln. Im Gegensatz dazu beträgt der Exergiegehalt von Wärme auf Umgebungstemperaturniveau 0 Prozent. Beispielfähig liegt der benötigten Exergiegehalt zugeführter Wärme bei ca. 7 Prozent für die Bereitstellung von Raumwärme (20 °C), bei ca. 15 Prozent zur Erwärmung von Trinkwarmwasser (55 °C) und ca. 28 Prozent zum Kochen (BMW und IBP 2009). Aus thermodynamischer Sicht ist es sehr ineffizient, zu Heizzwecken fossile Brennstoffe bei mehreren hundert bis über tausend Grad Celsius zu verbrennen, um eine Raumtemperatur von nur ca. 20 °C zu erzielen. Solche Umwandlungsprozesse gehen mit hohen „Exergieverlusten“ einher. Um Energieressourcen optimal nutzen zu können, dürfen Energieträger mit hohem Exergiegehalt („High-Ex“), wie z. B. Brennstoffe oder elektrische Energie, nur für hochwertige Anwendungen eingesetzt werden: Hochtemperaturprozesswärme, Antriebe, elektrochemische Prozesse oder Stromerzeugung. Um den Raumwärmebedarf von gut gedämmten Gebäuden zu decken, reichen hingegen „Low-Ex“-Niedertemperaturquellen, wie sie beispielsweise solar, geothermisch, aus der Umgebung (über Wärmepumpen) oder aus industrieller bzw. KWK-Abwärme gewonnen werden können. Bei Wärmeanwendungen auf der Nachfrageseite ist eine Unterscheidung der Temperaturniveaus zwingend erforderlich, um exergetisch optimale Versorgungslösungen darauf abzustimmen.

2.4 ZUKÜNFTIGE WÄRMEBEREITSTELLUNG AUF BASIS ERNEUERBARER ENERGIEN

Es werden bislang kaum Erneuerbare Energien zur Wärmebereitstellung in der Industrie eingesetzt. Im Jahr 2019 beispielsweise deckten regenerative Quellen lediglich 4,4 Prozent des industriellen Wärmebedarfes² (BMWi 2020b). In Zukunft muss die EE-Nutzung deutlich ausgebaut werden, um eine klimaneutrale industrielle Wärmeversorgung realisieren zu können. Abbildung 4 stellt einige Prozessbeispiele und technisch realisierbare Möglichkeiten zur Wärmebereitstellung auf Basis Erneuerbarer Energien und die in diesen Prozessen erreichbaren Temperaturniveaus dar.





* Die Umstellung auf THG-arme Energieträger für das Anodenbrennen stellt eine Übergangstechnologie dar. Perspektivisch wird dieser Prozessschritt entfallen und in der Aluminiumindustrie auf inerte Anoden umgestellt werden.

Abbildung 4: Erzielbare Temperaturen auf Basis Erneuerbarer Energien in NRW und potenzielle industrielle Anwendungen; eigene Darstellung basierend auf AEE 2017.

² Im hier angegebenen Wärmebedarf sind Raumwärme, Warmwasser und sonstige Prozesswärme inbegriffen.

Im Folgenden werden für einige zukünftig relevante Technologien zur Wärmebereitstellung auf Basis Erneuerbarer Energien die technischen Potenziale und Begrenzungen diskutiert. Zur Identifikation geeigneter Wärmequellen kann die Gegenüberstellung der jeweiligen Vor- und Nachteile verschiedener zukunftsfähiger Wärmeversorgungstechnologien behilflich sein.

Solarthermie: Solarthermie beruht auf der Nutzung der solaren Einstrahlung zur Erwärmung eines Wärmeträgermediums. Hierbei lassen sich zwei grundlegende Formen von Solarkollektoren unterscheiden: Mit nicht konzentrierenden Kollektoren können Temperaturen bis ca. 250 °C erreicht werden, während konzentrierende Kollektoren (z. B. Parabolrinnen oder Solartürme) deutlich höhere Temperaturen bis über 1.000 °C erreichen können. Allerdings sind konzentrierende Solarkollektoren auf direkte Solarstrahlung angewiesen, weshalb ihr Einsatz aufgrund der geografischen und klimatischen Voraussetzungen in Deutschland voraussichtlich für industrielle Wärmeanwendungen nicht in Frage kommt. Nicht konzentrierende Solarkollektoren dagegen nutzen sowohl direkte als auch diffuse Solarstrahlung und sind daher auch in unseren Breiten zur Wärmebereitstellung geeignet. Aufgrund der volatilen Verfügbarkeit in Abhängigkeit von Tageszeit und Bedeckungsgrad bietet sich die Solarthermie vor allem in Kombination mit einem Wärmespeicher im Bereich der Prozesswärme als unterstützendes Element für die Wärmebereitstellung von Trocknungs- und Beheizungsprozessen an. Des Weiteren bietet die Solarthermie Potenziale in Kopplung mit hybriden Technologien wie z. B. in Kombination mit Hochtemperatur-Wärmepumpen, der Kopplung mit einer Biomassefeuerung oder einer zukünftigen Wasserstofffeuerung.

	
<ul style="list-style-type: none"> • emissionsfreier Betrieb • keine Brennstoffkosten • gut kombinierbar mit (innovativer) KWK bzw. mit solarer Kühlung, da im Sommer KWK-Stromerzeugung unrentabel ist 	<ul style="list-style-type: none"> • dargebotsabhängig (saisonale, tageszeitliche und witterungsbedingte Schwankungen), daher in der Regel Wärmespeicher und Backup erforderlich • lokal ausreichende Flächenverfügbarkeit erforderlich • vergleichsweise niedriges Temperaturniveau

Geothermie: Die Geothermie basiert darauf, dass der Untergrund mit zunehmender Tiefe immer wärmer wird. Ein grober, globaler Richtwert sind Temperaturgradienten von 3 °C pro 100 Meter Tiefe. In NRW liegt der geothermische Gradient je nach Standort bei 3,2 bis 3,8 °C pro 100 Meter. Geothermie stellt dabei eine regenerative und zugleich grundlastfähige Wärmequelle dar und eignet sich somit gut für den Einsatz in der Industrie. Trocknungsprozesse bis ca. 180 °C, bspw. in der Papier-, Textil- oder Lebensmittelindustrie, könnten je nach lokalem Geothermiedargebot komplett auf diese Quelle umgestellt werden. Um das für die industrielle Anwendung benötigte Temperaturniveau zu erreichen, sind Bohrungen bis in einige Kilometer Tiefe erforderlich, in diesen Fällen (ab 400 Metern) spricht man von Tiefengeothermie. Das konkrete Geothermiedargebot ist stets vom geologischen Aufbau des tieferen Untergrundes am Standort und dem lokalen Temperaturgradienten abhängig, da diese Faktoren für die Nutzbarkeit der geothermalen Wärme maßgeblich sind. In NRW bietet sich aufgrund der Untergrundbeschaffenheit für die industrielle Anwendung speziell die Nutzung in Form einer hydrothermalen Dublette (siehe **Infobox**) an.

Infobox hydrothermale Dublette

Bei der hydrothermalen Dublette wird heißes Wasser aus i.d.R. in mehreren Kilometern Tiefe befindlichen wassergesättigten Gesteinsschichten (Aquiferen) gefördert, oberirdisch über einen Wärmetauscher geleitet und das abgekühlte Wasser in einiger Entfernung wieder in den Untergrund eingeleitet. Ein solches System besteht aus einer Förder- und einer Injektionsbohrung (Dublette). Grundsätzlich ist eine Kombination von mehreren Förder- und Injektionsbohrungen möglich. Die Technik ist weitgehend ausgereift und wird bereits in Frankreich, Italien, Polen, Österreich und Deutschland (z. B. Neustadt-Glewe, Waren, Unterhaching, Bruchsal) seit einigen Jahren, teilweise seit Jahrzehnten angewandt (Stober et al. 2016).



- emissionsfreier Betrieb
- keine Brennstoffkosten
- grundlastfähig
- kaum Flächenverbrauch
- Einsatz in hocheffizienter KWK möglich
- Potenzial zur (saisonalen) Wärme- und Kältespeicherung in Aquiferen
- sehr hohe Bergbau- und Geothermie-Kompetenz in NRW



- lokale Verfügbarkeit und Potenziale in NRW noch weitreichend unbekannt
- vergleichsweise niedriges Temperaturniveau
- Fündigkeitsrisiko (v. a. bei Tiefengeothermie)
- in NRW noch keine etablierten Industrieprojekte

EE-Strom: Strom aus Erneuerbaren Energien kann direkt und indirekt zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden (siehe **Infobox**) – als Überbegriff für solche Prozesse hat sich die Bezeichnung „Power-to-Heat“ (PtH) etabliert. Schon heute kann Prozesswärme bis zu 1.000 °C mit vorhandener Technologie direktelekttrisch erzeugt werden. Hochtemperaturprozesse über 1.000 °C auf Basis der Elektrifizierung befinden sich größtenteils noch im Prozess der Forschung und Entwicklung (F&E) oder maximal in der Pilotphase (Roelofsen et al. 2020). Für einzelne Prozesse sind Anlagen kommerziell verfügbar wie z. B. Elektrolichtbogenöfen in der Stahlindustrie. Mit Blick auf die in Kapitel 2.1 und 2.2 diskutierten Temperaturniveaus des industriellen Wärmebedarfs bedeutet dies, dass aus technischer Sicht – unter der Voraussetzung entsprechender Strominfrastruktur – heute schon ca. 50 Prozent der Wärmeerzeugung elektrifizierbar sind. Elektrische Kessel, die industrielle Wärme bis 350 °C erzeugen, sind kommerziell verfügbar. Industrieöfen hingegen, die Wärme bis 1.000 °C erzeugen, sind zwar technisch möglich, aber noch nicht kommerziell erhältlich.



Im Wärmepumpenprozess wird Nutzwärme nur indirekt auf Basis von Strom erzeugt. Der Strom wird hier zum Betrieb des Verdichters verwendet. Durch die Verdichtung des im Prozess zirkulierenden Arbeitsmediums (in der Regel organische Kältemittel) auf einen höheren Druck kann das Arbeitsmedium, das zuvor bei niedrigerem Druck Wärme auf Niedertemperaturniveau aufgenommen hat, wieder Wärme auf einem höheren Temperaturniveau abgeben. Auf diese Weise kann Niedertemperaturwärme „aufgewertet“ werden (siehe **Infobox** zur Exergie, S. 12). Im Gebäudebereich wird so in der Regel Luft- oder Erdwärme zur Bereitstellung von Raumwärme nutzbar gemacht. In der Industrie kann durch Wärmepumpen z. B. Niedertemperaturabwärme aus Prozessen genutzt werden.

Infobox zur Abgrenzung von Elektrifizierungsoptionen

Im vorliegenden Papier wird im Zusammenhang mit Power-to-Heat zwischen direkt- und indirektelektrischer Wärmeerzeugung unterschieden. In anderen Publikationen wird diese Abgrenzung bei gleichem „Wording“ teilweise anders verwendet. Daher sei die hier angewandte Abgrenzung der Begriffe im Folgenden kurz erläutert:

- **„direktelektrische Wärmeerzeugung“:** Elektrischer Strom wird direkt zur Wärmeerzeugung eingesetzt, z. B. in einer Widerstandsheizung, bei der sich ein elektrischer Leiter bei Stromdurchfluss erwärmt und so Wärme in ein Medium einträgt (Elektrokessel). In der Industrie sind ebenfalls induktive Systeme gängig, bei denen z. B. ein zu erwärmendes Bauteil mit einer Wechselstromspule umwickelt und so ein Wirbelstrom in dieses Bauteil induziert wird, der es erwärmt, z. B. bei Induktionsöfen zum Schmelzen von Metallen. Andere relevante direktelektrische Industrieprozesse sind z. B. Elektrodenkessel zur Heißwasser- oder Prozessdampferzeugung oder Elektrolichtbogenöfen zur Stahlschmelze (s. Kapitel 3.3).
- **„indirektelektrische Wärmeerzeugung“:** Die Wärmeerzeugung erfordert elektrischen Strom, der jedoch nicht direkt in Wärme umgewandelt, sondern z. B. zur Verdichtung eines Arbeitsmediums eingesetzt wird. In dem vorliegenden Papier sind hiermit insbesondere Wärmepumpenprozesse gemeint, bei denen der Verdichter mit elektrischem Strom betrieben wird, um eine Niedertemperaturwärmequelle für die Wärmeabgabe auf einem höheren Temperaturniveau nutzbar zu machen. Nicht unter den Begriff der „indirektelektrischen Wärmeerzeugung“ fasst dieses Papier die Verbrennung von mit Strom produziertem grünem Wasserstoff oder synthetischem Methan.

Der aktuelle Stand der Technik bei konventionellen Niedertemperaturwärmepumpen ermöglicht eine Nutzwärmebereitstellung bei einer Maximaltemperatur bis ca. 100 °C. Erste Entwicklungen für große Industriewärmepumpen, die höhere Temperaturen bereitstellen und für die Erzeugung von Prozesswärme geeignet sind, sind derzeit für Temperaturniveaus von ca. 150 °C verfügbar. Diese Anwendungen bieten noch Entwicklungspotenziale z. B. hinsichtlich der Kältemittel, Systemeinbindung und Effizienz. Werden Industriewärmepumpen zur Dampferzeugung eingesetzt, so ermöglichen nachgeschaltete mechanische Brüdenverdichter das Anheben des mit der Wärmepumpe erzeugten Dampfes (in diesem Zusammenhang auch „Brüden Dampf“ genannt) auf ein höheres Druck- und Temperaturniveau, um diesen für den Prozesseinsatz nutzbar zu machen. Auf diese Weise können überhitzte Dampfungstände von bis zu 320 °C (bei einem Druck von 12 bar absolut) erzielt werden.



	
<ul style="list-style-type: none"> • lokal emissionsfrei • Potenzial zur Verbesserung der Prozesseffizienz (keine Abgasverluste, zielgenaue Dosierung der Energiemengen) • Flexibilität durch gute Kombinierbarkeit mit KWK bzw. innovativer KWK • günstige Speicherbarkeit in Form von Hochtemperaturwärme in industriellem Maßstab für die Dauer von Stunden bis wenigen Tagen 	<ul style="list-style-type: none"> • ausreichende EE-Strom-Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungskapazitäten als Voraussetzung für emissionsfreie elektrische Wärmeerzeugung (PtH)
<p>Wärmepumpe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • elektrische Wärmeerzeugungstechnologie mit höchster Energieeffizienz (Jahresarbeitszahl von 2 bis 5, abhängig vom Temperaturhub) • Möglichkeit zur Wärme-Kälte-Kopplung (Wärmeschaukel) 	<p>Wärmepumpe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erschließung einer Wärmequelle (Abwärme, Umweltwärme, Geothermie, Solarenergie) in ausreichender Leistung und auf ausreichendem Temperaturniveau erforderlich (dazu entsprechende Infrastruktur, z. B. Niedertemperaturwärmenetze erforderlich)
<p>Elektrodenkessel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • energieeffizient bei hohen Temperaturen (hohe Exergie) • geeignet für Regelenergieeinsatz (sehr schnelle Reaktionszeit) 	<p>Elektrodenkessel:</p> <ul style="list-style-type: none"> • möglicherweise Verstärkung der Kapazität des Übertragungsnetzes und der Netzanschlusskapazität erforderlich

Biomasse: Biogene Rohstoffe werden heute schon als emissionsarme Brennstoffe eingesetzt. Die nachhaltig gewinnbaren Potenziale für Biomasse sind allerdings limitiert. Das in Deutschland verfügbare Biomaspotenzial wird auf etwa 1.000 Petajoule (ca. 278 Terawattstunden) geschätzt (Lenz et al. 2020). Signifikante Einsatzsteigerungen sind nicht zu erwarten, da heute verfügbare Biomasseströme schon weitgehend genutzt werden und weitere Erhöhungen zu Nutzungskonkurrenzen um Flächen für Ökosysteme (z. B. Wälder, Moore) bzw. zur landwirtschaftlichen Nutzung (Nahrungsmittelproduktion) führen würden. Zur Wärmeerzeugung wird feste Biomasse heutzutage überwiegend für Prozesse unter 200 °C oder zur Gebäudebeheizung eingesetzt und nur in geringem Umfang für Hochtemperaturprozesse. Es gilt jedoch, die verfügbaren Ressourcen gezielt und so effizient wie möglich einzusetzen. Daraus ergibt sich die Empfehlung, die vorhandenen Mengen für industrielle Hochtemperaturprozesse einzusetzen, speziell in der Kalk- und Zementindustrie, da Biomassenutzung dort bereits etabliert ist, sowie in der chemischen Industrie, da hier perspektivisch eine gleichzeitige stoffliche Nutzung möglich ist (Jordan et al. 2020, Lenz et al. 2020).



Auch das Deutsche Biomasseforschungszentrum und das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung sprechen sich vor dem Hintergrund eines ganzheitlichen Lebenszyklusansatzes für die Nutzung in Kaskaden- und Koppelnutzungen aus (DBFZ und UFZ 2020). Im Bereich der stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse in Hochtemperaturprozessen besteht noch F&E-Bedarf. In Elektroöfen zur Stahlherstellung werden biogene Kohlenstoffe zur Schaum Schlackenbildung voraussichtlich benötigt werden. Auch wird die Substitution des Kokses in brennstoffbefeuerten Öfen in der Eisen- und Stahlindustrie durch sogenannten „Biokoks“ untersucht. Mit Biokoks lassen sich auch höhere Temperaturen als in Abbildung 4 dargestellt realisieren. Biogene Rohstoffe werden außerdem als Möglichkeit gesehen, zukünftig negative THG-Emissionen zu erzielen, indem Biomassefeuerungen mit „Carbon Capture and Storage“ (CCS) zu BECCS, d.h. „Bioenergy with Carbon Capture and Storage“, kombiniert werden, z. B. bei der Zement- und Kalkherstellung (Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut 2020, Lenz et al. 2020).

+	-
<ul style="list-style-type: none"> • nachwachsender, einfach speicherbarer Energieträger • grundlastfähig • Entlastung von Flächen durch Reststoffnutzung • Hocheffizienter Einsatz möglich: zum energetischen und stofflichen Einsatz geeignet (z. B. in der chemischen Industrie) • Möglichkeit zur Erzeugung negativer Emissionen in Kombination mit CCS (BECCS) 	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Flächenbedarf (bei Anbaubiomasse) • begrenzt verfügbare nachhaltige Potenziale (Monokultur, Düngung etc.) und hohe Nutzungskonkurrenz (zu Sektoren Energiewirtschaft, Haushalte und Verkehr)

Grüner Wasserstoff: Sogenannter grüner Wasserstoff, der in der Regel durch Wasserelektrolyse mit EE-Strom produziert wird, bietet sich neben dem stofflichen Einsatz, z. B. in der Stahl- oder chemischen Industrie, auch als zukünftiger Brennstoff an, da sich mit ihm zahlreiche (Verbrennungs-)Prozesse defossilisieren lassen. Der Aufbau einer umfassenden Wasserstoffwirtschaft inklusive Erzeugung, Transport- und Importstrukturen etc. ist politischer Wille (BMWi 2020a). Durch die Verbrennung von reinem Wasserstoff lassen sich theoretisch Temperaturen von über 2.000 °C (bei der Verbrennung mit Luft) bzw. über 3.000 °C (bei Verbrennung mit reinem Sauerstoff) realisieren. Zur großskaligen Wärmeerzeugung mit reinem Wasserstoff sind jedoch neben vielen regulatorischen auch noch einige technologische Entwicklungen und Hürden zu meistern, hierauf wird in Kapitel 3.4 noch detaillierter eingegangen. Während die Beimischung zu Erdgas in Größenordnungen von bis zu 20 Volumenprozent zumindest in den Fällen ausschließlich energetischer Nutzung kein größeres Problem darstellt, müssen für eine Verbrennung von reinem Wasserstoff noch Entwicklungen erfolgen. Die Brennertechnik muss dafür z. B. im Bereich des Flammenrückschlags weiterentwickelt werden. Da das Brennverhalten von Wasserstoff u. a. hinsichtlich der Wärmeübertragung, Flammtemperatur, -form und -geschwindigkeit sowie Strahlungswärme anders als bei Erdgas ist, müssen die Prozesse insgesamt adaptiert und der Einfluss auf die Produktqualität hinreichend untersucht werden. Auch ist zu berücksichtigen, dass bei einer Wasserstofffeuerung (aufgrund des niedrigeren Heizwertes von Wasserstoff im Vergleich z. B. zum Erdgas) der rund dreifache Volumenstrom in den Prozess eingebracht werden muss, wenn derselbe Wärmebedarf im Prozess notwendig ist. Ist zusätzlich zur energetischen eine stoffliche Nutzung des Wasserstoffs vorgesehen, ist es vorteilhaft, das Gas sortenrein dem Prozess zuzuführen. Dafür kann es sinnvoll sein, die Netze auf der Fernleitungsstufe als dezidierte Wasserstoffleitungen zu betreiben und Beimischungen auf die Verteilnetzebene zu beschränken.

	
<ul style="list-style-type: none"> • weitgehend emissionsfreier Betrieb (Haupt-Verbrennungsprodukt: Wasser) • perspektivisch Substitution bestehender Erdgaskessel, -brenner und KWK möglich • direkter Einsatz in hocheffizienten Brennstoffzellen • für Hochtemperaturanwendungen geeignet (hohe Flammentemperatur) • speicherbarer Energieträger (flüssig, gasförmig, Trägermedium (z. B. LOHC)) 	<ul style="list-style-type: none"> • im Vergleich zur Elektrifizierung hohe Effizienzverluste bei Synthese • ausreichende EE-Strom-Erzeugungskapazitäten als Voraussetzung für emissionsfreie Elektrolyse • mögliche NO_x-Emissionen (prozess- und temperaturabhängig) • die Lagerung oder der Transport in flüssiger Form erfordert extrem niedrige Temperaturen und somit eine permanente Energiezufuhr

Biomethan/synthetisches Methan: Mit Biomethan (aus der Aufbereitung von Biogas) oder synthetischem Methan lassen sich im Prinzip die gleichen Prozessbedingungen realisieren wie mit fossilem Erdgas. Allerdings sind sie aus Kosten- und Effizienzgründen bei einer vollständig klimaneutralen Wärmeversorgung lediglich Optionen in Bereichen, wo Prozessanforderungen nicht durch eine Elektrifizierung oder durch Verbrennung von reinem Wasserstoff erfüllt werden können. Ihre Nutzung bietet sich vor allem an, wenn zusätzlich zur Wärme auch noch Kohlenstoff direkt in den Prozess mit eingebracht werden muss (z. B. in der Primärstahlerzeugung). Synthetisches Methan wird idealerweise in CCU-Prozessen unter Verwendung erneuerbaren Stroms und grünen Wasserstoffs hergestellt. Der dafür benötigte Kohlenstoff kann hierbei entweder aus Biomasse stammen, durch das Direct-Air-Capture-Verfahren (DAC) aus der Luft gefiltert oder aus den rohstoffbedingten unvermeidbaren CO₂-Mengen in Kombination mit einer CO₂-Abtrennung (z. B. aus der Zementindustrie) gewonnen werden. Eine weitere Zukunftstechnologie kann die Methanpyrolyse darstellen, wenn aus Biogas gewonnenes Biomethan als Ausgangsstoff und EE-Strom als Energiequelle eingesetzt werden. Wird der dabei entstehende biobasierte Pyrolyse-Kohlenstoff gelagert oder dauerhaft gebunden, stellt dies, wie BECCS mit Biomasse, auch eine sogenannte „Carbon Negative Technology“ dar.

	
<ul style="list-style-type: none"> • einfache Anwendung in vorhandenen Kesseln, Brennern und hocheffizienter KWK • für Hochtemperaturanwendungen geeignet • speicherbarer Energieträger 	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂- und mögliche NO_x-Emissionen (prozess- und temperaturabhängig) <p>synthetisches Methan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • im Vergleich zur Elektrifizierung sehr hohe Effizienzverluste bei Synthese • ausreichende EE-Stromerzeugungskapazitäten als Voraussetzung für emissionsfreie Synthese • zusätzlich nicht-fossile Kohlenstoffquelle (aus Luft oder Biomasse) erforderlich (Verfügbarkeit, Kosten, Energieaufwand) <p>Biomethan:</p> <ul style="list-style-type: none"> • sehr hoher Flächenbedarf (bei Biomasseanbau) sowie begrenzt verfügbare nachhaltige Potenziale (Monokultur, Düngung...) und hohe Nutzungskonkurrenz • zusätzlicher Energieaufwand zur Biogasaufbereitung

3. VIER-STUFEN-MODELL DER KLIMANEUTRALEN WÄRMEVERSORGUNG

Das Ziel einer zukünftig klimaneutralen Wärmeversorgung (mit intensiver Nutzung der in Kapitel 2.4 diskutierten Technologien) stellt eine enorme Herausforderung dar und erfordert auf unterschiedlichen Ebenen Optimierungen, Umstellungen und Alternativen zur bisherigen Wärmebereitstellung. Nur im Zusammenspiel und unter Ausnutzung aller zur Verfügung stehenden Stellschrauben lässt sich dieses Ziel erreichen. Um THG-Emissionen in der industriellen Wärmeversorgung möglichst schnell zu verringern, sollten primär Effizienzpotenziale gehoben, Abwärme erst intern möglichst vollständig ausgenutzt und Anreize gesetzt werden, um weitere Potenziale durch unternehmensübergreifende Abwärmekooperationen über Nah- oder Fernwärmenetze Dritten verfügbar zu machen. Solche Maßnahmen sind wichtig, werden aber nicht zu einer vollständigen Verhinderung der gesamten CO₂-Emissionen führen, da die CO₂-Entstehung nur reduziert, aber nicht vermieden wird. Perspektivisch erfordert eine klimaneutrale Wärmeversorgung daher die vollständige Umstellung auf regenerative Energien. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die vier wichtigsten Stufen einer klimaneutralen Wärmeversorgung – Steigerung der Effizienz, Erschließung regenerativer Wärmequellen, direkte Nutzung erneuerbaren Stroms, Einsatz alternativer Energieträger – näher erläutert. Abbildung 5 veranschaulicht diesen stufenweisen Weg zu einer zukünftig klimaneutralen Wärmeversorgung und dem übergeordneten Ziel einer vollständigen CO₂-Vermeidung in einem Vier-Stufen-Modell. Die Priorisierung ergibt sich bei den Stufen zwei bis vier aus den absteigenden Gesamtwirkungsgraden unter Berücksichtigung der Verluste in den Umwandlungsketten PtH (Stufe drei) und PtG (Stufe vier).

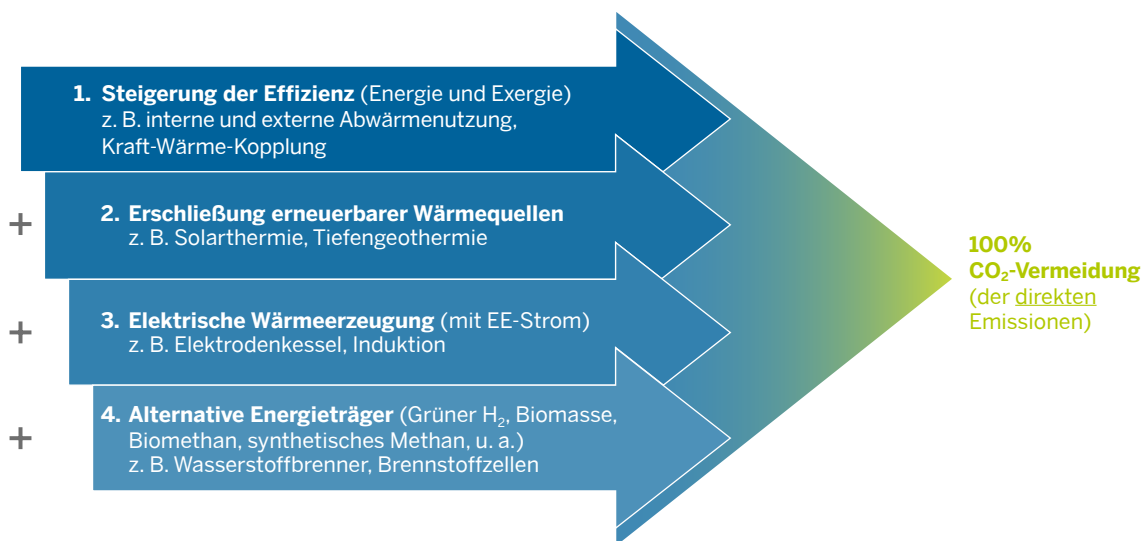


Abbildung 5: Vier-Stufen-Modell einer klimaneutralen Prozesswärmeversorgung

(Die Stufen bilden die Prüfungsschritte ab, die jedes Industrieunternehmen individuell durchlaufen sollte. Die Priorisierung dieser Schritte folgt einem gesamtsystemischen Effizienzansatz und kann aufgrund von Standortfaktoren individuell zu abweichenden Ergebnissen führen.)

3.1 ENERGIEEFFIZIENZ SOWIE ABWÄRMENUTZUNG

Mit Blick auf die Wärmewende sollten Effizienzmaßnahmen als primäre Maßnahmen bzw. als **erste Stufe** des in Abbildung 5 dargestellten Vier-Stufen-Modells forciert werden. Wärme, die gar nicht erst benötigt wird und daher nicht erzeugt werden muss, hat die beste THG-Bilanz. Perspektivisch müssten dann nur noch die „unvermeidbaren Abwärmemengen“ so gut wie möglich intern oder extern genutzt werden. Das technisch verfügbare Potenzial in NRW liegt bei 88 bis 96 Terawattstunden pro Jahr, wovon ca. 50 Prozent (ca. 44 bis 48 Terawattstunden) als technisch verwendbar eingeschätzt werden (LANUV 2019).

Zukünftig gilt es jedoch, die innerbetrieblich nicht direkt nutzbare Abwärme zwischenspeichern (z. B. in geeigneten (Feststoff-)Speichern), mit (Hochtemperatur-)Wärmepumpen aufzuwerten oder mit geeigneten Organic-Rankine-Cycle-Prozessen (ORC) zu verstromen. Gleichzeitig ist anzustreben, überschüssige Abwärme für andere Sektoren verfügbar zu machen. Dafür müssen eine entsprechende Infrastruktur (teilweise) geschaffen und räumliche Nähe zu Abnehmern hergestellt werden, sofern dies im Rahmen einer Stadtplanung oder Industrieneuansiedlung möglich ist. Idealerweise lassen sich benachbarte Betriebe identifizieren, die einen dauerhaften Wärmebedarf haben und auch in den Sommermonaten überschüssige Wärmemengen abnehmen können.

Im Folgenden sind Beispiele für industrielle Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und Nutzung prozessbedingter Abwärme aufgeführt. Die Priorisierung der Maßnahmen ist dabei wie folgt:

(0. Verringerung des Primärwärmebedarfs durch Prozessoptimierung bzw. -umstellung)

1. **Vermeidung bzw. Verminderung von Wärmeverlusten durch z. B. Wärmedämmung**
2. **Rückführung der Abwärme in den Prozess, z. B.**
 - Brennluft-, Brennstoff-, Einsatzstoff- oder Produktvorwärmung
 - Speisewasservorwärmung
 - Trocknungsprozesse
 - Wärmerückgewinnung aus Abwässern
3. **Betriebsinterne Verwendung der Abwärme im Gebäudebereich, z. B.**
 - Erwärmung und /oder Kühlung der Hallenluft (z. B. Kreislaufverbundsystem)
 - Fußboden- oder Deckenheizung (bei Neu- oder Umbau)
 - Warmwassererzeugung für Sanitäranlagen

Standortabhängig und individuell sollte dann geprüft werden, ob eine interne Nutzung der Abwärme unter Inkaufnahme von Umwandlungsverlusten (4.a) oder eine externe Nutzung (4.b) praktikabler ist. Sofern in räumlicher Nähe geeignete Abnehmer zur direkten Abwärmennutzung verfügbar sind, ist dies in der Regel effizienter als die Umwandlung am Standort selbst.



4.a Umwandlung der Wärme in andere Energieformen

- Verstromung (ORC, TEG, Wasserdampfturbinen)
- (Kraft-)Wärme-Kälte-Kopplung zur Kälteerzeugung für Kühlprozesse

4.b Externe Verwendung der Abwärme

- Einleitung ins Fernwärmenetz (Energieversorger)
- Einleitung in ein Nahwärme- / Quartiersnetz (Sekundärnutzung bspw. in Gewächshäusern, benachbarten Unternehmen oder Wohngebäuden)
- Dampferzeugung und -transport (bis zu einer Entfernung von ca. 2 km wirtschaftlich)
- Speicherung und Transport der Wärme in mobilen Speichern (z. B. für Schwimmbäder)

Allgemein lassen sich folgende Vor- und Nachteile hinsichtlich der Nutzung „unvermeidbarer Abwärmemengen“ festhalten:

	
<ul style="list-style-type: none"> • emissionsfrei (kein zusätzlicher Primärenergieeinsatz) • keine zusätzlichen Brennstoffkosten • je nach Prozess(fahrweise) grundlastfähig • kaum Flächenverbrauch • ggf. zusätzliche Energieeinsparung durch Verzicht auf aktive Kühlung • große ungenutzte Potenziale in NRW 	<ul style="list-style-type: none"> • teilweise unzureichendes Temperaturniveau (aber in Kombination mit z. B. Wärmepumpe oder Brüdenverdichter höhere Temperaturniveaus erreichbar) • Verfügbarkeit abhängig vom Lastprofil der Abwärmequelle • Individuelles Ausfallrisiko von Unternehmen, Branchen und Prozessen (z. B. Wegfall von Produkten oder Produktion) • Örtliche Nähe von Abwärmequelle und Wärmesenke erforderlich und / oder entsprechende Infrastruktur (Nah- und Fernwärmenetze) • Zurechnung der Emissionsminderung bei Lieferanten bzw. Nutzer muss noch klar geregelt werden

3.2 ERSCHLIESSUNG LOKALER ERNEUERBARER WÄRMEQUELLEN

Da die in Kapitel 3.1 diskutierten Maßnahmen zur Stoff- und Energieeffizienz sowie Abwärmennutzung den industriellen Wärmebedarf nicht so weit senken können, dass Klimaneutralität erreicht werden kann, ist die Erschließung und direkte Nutzung erneuerbarer Wärmequellen unerlässlich. Sie stellt die **zweite Stufe zur Transformation der Wärmeversorgung** dar (siehe Vier-Stufen-Modell in Abbildung 5). Im Gegensatz zu Maßnahmen der Stufen drei und vier fallen bei der direkten Nutzung von erneuerbarer Wärme keine zusätzlichen Umwandlungsverluste an. Allerdings sind die in NRW zur Verfügung stehenden erneuerbaren Wärmequellen hinsichtlich des technisch-wirtschaftlich nutzbaren Temperaturniveaus beschränkt (siehe Abbildung 4) und eignen sich daher nicht für alle Branchen in gleichem Maße. Kann aber ein Wärmebedarf ganz oder teilweise aus einer lokalen, erneuerbaren Wärmequelle gedeckt werden, so ist dies die hinsichtlich der Systemeffizienz zu bevorzugende Maßnahme. Auch wenn der Wärmebedarf hierdurch nicht vollständig gedeckt werden kann, verringert jede Nutzung einer erneuerbaren Wärmequelle den verbleibenden und auf anderen Pfaden – ggf. durch Energieimporte – zu deckenden Energiebedarf.

Die Nutzung von Solarthermie ist in NRW, wie in ganz Deutschland, aufgrund der geografischen Gegebenheiten nur in begrenztem Maße möglich. Zwar lassen sich Temperaturen bis etwa 150 °C gut und mittels spezieller Kollektortechnik auch bis zu 250 °C erzeugen, jedoch erfolgt die Wärmebereitstellung fluktuierend in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit sowie Bedeckungsgrad. Eine Verstetigung der Wärmeversorgung aus Solarthermie kann durch Kombination mit Wärmespeichern erfolgen, eine weitere Möglichkeit ist die Kopplung mit Wärmepumpen. Die solarthermische Prozesswärmebereitstellung eignet sich unter Berücksichtigung begrenzter Deckungsanteile in NRW somit gut zur unterstützenden Bereitstellung von erneuerbarer Wärme für Niedertemperaturanwendungen wie Trocknungs- und Beheizungsprozesse, z. B. in der Nahrungsmittelindustrie. Eine mögliche Zukunftstechnologie könnte die Kombination mit einer Photovoltaikanlage sein. Es gibt Hybridkollektoren, die Photovoltaik und Solarthermie vereinen, diese werden als Photothermie oder Thermovoltaik bezeichnet.

Die Nutzung von Geothermie, für die industrielle Anwendung vor allem von Tiefengeothermie (Bohrtiefen über 400 Meter), weist ein enormes theoretisches Potenzial zur Deckung nennenswerter Anteile des in NRW bestehenden Heiz- und Prozesswärmebedarfes im Temperaturbereich bis etwa 180 °C auf.

Als erneuerbare und grundlastfähige Wärmequelle eignet sich Geothermie in besonderem Maße zur verlässlichen Versorgung industrieller Prozesse im unteren bis mittleren Temperaturbereich (z. B. Trocknungsprozesse in der Papierindustrie) und lässt sich darüber hinaus bei Bedarf gut mit Wärmepumpen kombinieren, um das Temperaturniveau anzuheben. Die aus geothermalen Quellen gewinnbare thermische Energie ist sowohl hinsichtlich des verfügbaren Temperaturniveaus als auch der nutzbaren Wärmeleistung maßgeblich vom Aufbau des tiefen Untergrundes abhängig. Zwar herrschen in NRW verbreitet vielversprechende Temperaturgradienten von 3,2 bis 3,8 °C pro 100 Meter, jedoch finden sich nicht an allen Standorten geeignete Gesteinsschichten in den erforderlichen Tiefenlagen. Die Erforschung des Untergrundes von NRW, beispielsweise durch seismische Messkampagnen oder tiefe Forschungsbohrungen in die relevanten geologischen Horizonte, stellt demnach den wichtigsten Schritt zur landesweiten Etablierung der tiefengeothermischen Nutzung dar.

3.3 ELEKTRISCHE WÄRMEERZEUGUNG / PTH

Nachdem alle technischen Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Nutzung regenerativer Wärmequellen (Stufen eins und zwei) ausgeschöpft sind, sollte in nächster Instanz – d. h. als **dritte Stufe im Vier-Stufen-Modell** – die elektrische Wärmeerzeugung mit EE-Strom betrachtet werden. Dies gilt auch für den Fall, dass Standortfaktoren oder Prozessanforderungen die Einbindung von Solar- oder Geothermie nicht möglich machen. Die Möglichkeit der Elektrifizierung von Industrieprozessen mit EE-Strom sollte aufgrund des höheren Wirkungsgrades in jedem Falle vor einer möglichen Nutzung alternativer Brennstoffe (siehe Kapitel 3.4) ausgeschöpft werden. Eine gute Übersicht an Technologien für die elektrische Wärmeerzeugung (Power-to-Heat, kurz PtH), ist unter anderem in (Perkin 2000) zu finden. Prinzipiell kommen die nachfolgenden Technologien in verschiedenen Branchen und Prozessen in Betracht:

1. Erwärmungsverfahren für Prozesse (mit typischen Anwendungsbeispielen)

- Konduktiver Widerstand (z. B. Erwärmung von Halbfabrikaten aus Stahl, Schmelzen von Glas, Schmelzflusselektrolyse von Aluminium)
- Induktiver Widerstand (z. B. Induktionshärten und-schmelzen, Induktive Erwärmung bei Walzwerken und Schmieden)
- Hochfrequenz (z. B. Trocknung von Textil-, Papier- oder Glasfasern)
- Magnetischer Gleichstrom (z. B. Erwärmung von Extrusionsblöcken)
- Infrarot (z. B. Trocknen und Polymerisieren von Farben und Lacken)
- Lichtbogen oder Plasmastrahl (z. B. Elektrostahlproduktion, Stahlguss)

2. Erwärmungsverfahren für Wärmeträgermedien (z. B. Heißwasser und Dampf)

- Elektrokessel oder Elektrodenkessel (ggf. in Kombination mit in KWK integrierten Wärmespeichern oder elektrischen Dampfüberhitzer)
- Elektrische Wärmepumpen (ggf. in Kombination mit in KWK integrierten Wärmespeichern, mechanischen Brüdenverdichtern oder elektrischen Dampfüberhitzern)

Die Beispiele für Elektrifizierungstechnologien unterscheiden sich in ihren jeweiligen physikalischen Prinzipien, Leistungsgrößen, Wirkungsgraden, Temperaturniveaus und somit auch in ihrer Eignung für Anwendungen in bestimmten Prozessen und Branchen. Die unter 1. genannten Erwärmungsverfahren sind prozessspezifisch. Nicht zuletzt aufgrund ihrer meist hohen Energieeffizienz und guten Regelbarkeit weisen sie häufig Vorteile hinsichtlich Produktqualität oder Produktoutput (Prozessgeschwindigkeit) auf und haben in vielen industriellen Anwendungen bereits heute brennstoffbasierte Erwärmungsverfahren verdrängt. Die unter 2. genannten Verfahren sind allgemeiner und als Querschnittstechnologie anwendbar und stehen bei der Ausschöpfung ihres Elektrifizierungspotenzials noch ganz am Anfang. Hier sind es weniger die technischen als die ökonomisch-regulativen Hürden sowie der im europäischen Vergleich bislang noch relativ hohe Emissionsfaktor des deutschen Strommixes, die einen Durchbruch bisher

verhindert haben. Bei einer großflächigen Umstellung auf elektrische industrielle Wärmebereitstellung, die nicht wechselweise mit Strom und Gas betrieben werden kann, müsste mit Blick auf das Gesamtsystem weiterhin berücksichtigt werden, dass sich der Bedarf an gesicherter Leistung (z. B. durch gasbetriebene Reservekraftwerke) entsprechend erhöht.

PtH als Technologiebaustein zur thermischen Speicherung von EE-Strom

Über die genannten Elektrifizierungstechnologien industrieller Prozesse hinaus bietet Power-to-Heat (PtH) zudem ganz allgemein Potenziale zur Integration Erneuerbarer Energien. Vor dem Hintergrund einer zunehmend volatilen Energieerzeugungscharakteristik ist dies von nennenswerter Bedeutung, um die Energiebereitstellung abzusichern und weil Wärmespeicher oft deutlich kostengünstiger sind als Stromspeicher. Durch PtH können Prozesse flexibel betrieben und auf diese Weise eine Lastverschiebung erzielt werden, wenn fluktuierende regenerative Energieerzeugung und benötigte Wärme zeitlich entkoppelt sind. Es gibt unterschiedliche Technologien zur Wärmespeicherung, die sich je nach Temperatur (bis über 500 °C) und Speicherdauer (Stunden bis Monate) unterscheiden (IRENA 2020, Stadler et al. 2020). Bei elektrischer Erwärmung von höhersiedenden Wärmeträgern (z. B. Flüssigsalz, das weltweit großtechnisch in solar-thermischen Kraftwerken als Medium für die Speicherung von Hochtemperaturwärme eingesetzt wird) können mit diesen Wärmeträgern bei der Übertragung der Wärme auf Wasser Dampfdrücke von mehr als 100 bar und Temperaturen über 500 °C erreicht werden. Für industrielle Anwendungen, insbesondere in Kombination mit der Möglichkeit einer teilweisen Rückverstromung der gespeicherten Wärme, ist dieser Hochtemperaturbereich interessant. Diese sektorübergreifende Technologie bietet eine Möglichkeit zur Optimierung der Stromnetznutzung und zur Erhöhung der Integration von volatilen erneuerbarem Strom, sie stellt aber auch zusätzliche Anforderungen an den Ausbau der Stromnetzinfrastruktur.

Eine Weiterentwicklung unter Nutzung des PtH-Prinzips stellen Strom-Wärme-Strom-Speicher (Dumont et al. 2020) dar. Diese Carnot-Batterien oder auch „Wärmespeicherkraftwerke“ genannten Anlagen speichern elektrische Leistungsspitzen in thermischen Hochtemperatur-Energiespeichern. In Zeiten niedriger Stromkosten wird über eine Wärmepumpe oder einen Heizstab thermische Energie im Speicher eingespeichert, in Zeiten hoher Stromkosten wird z. B. über einen ORC- oder einen Joule-Kreisprozess die Wärme rückverstromt. Zentraler Vorteil ist die Unabhängigkeit von räumlichen Gegebenheiten und die gute Skalierbarkeit (Olympios et al. 2021). Zudem ergeben sich durch Power-to-Heat-to-Power (PtHtP) neue Möglichkeiten durch Flexibilitätsdienstleistungen zur Optimierung der Auslastung des Stromübertragungsnetzes beizutragen, sowohl für Industriestandorte als auch für den zentralen Energieerzeugungssektor (z. B. durch den Umbau von ehemaligen Kohlekraftwerken zu Wärmespeicher- bzw. Reservekraftwerken). Hier erfolgen derzeit einige Demonstrationsvorhaben und Entwicklungen, z. B. das Projekt „StoreToPower“ im Rheinischen Revier.

3.4 ALTERNATIVE ENERGIETRÄGER

Die Verbrennung von alternativen Energieträgern wie Wasserstoff und synthetischem Methan, die langfristig ausschließlich auf Basis von Strom aus Erneuerbaren Energien hergestellt werden, sowie von Biomasse oder Biomethan ist die **vierte Stufe im Vier-Stufen-Modell** der Transformation zur klimaneutralen Wärmeversorgung der Industrie. Sie sollte von Unternehmen erst nach Überprüfung und Ausschluss der in den Abschnitten 3.2 und 3.3 genannten Optionen in Erwägung gezogen werden. Bei der Erzeugung alternativer Energieträger sind fast immer die Wirkungsgradketten und weitergehenden Umwandlungsverluste zu berücksichtigen (siehe Abbildung 6), die zu einem Mehrbedarf an EE-Erzeugungsanlagen zur Deckung des erforderlichen Strombedarfes führen.

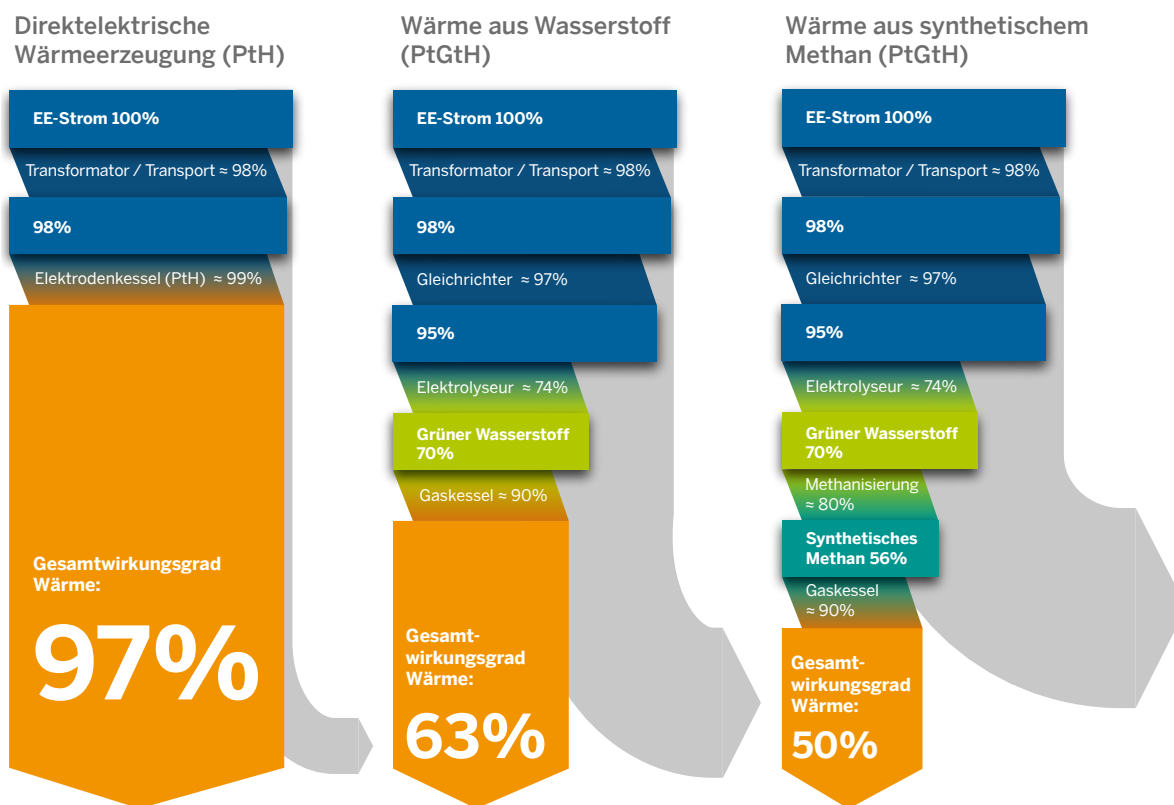


Abbildung 6: Wirkungsgradketten und Umwandlungsverluste von Power-to-Heat, Wasserstoffverbrennung und Verbrennung von synthetischem Methan (Eigene Darstellung basierend auf: Ausfelder et al. 2015, Schmidt et al. 2018, Milanzi et al. 2018, ergänzt um eigene Abschätzungen)

Verbrennungsprozesse werden langfristig notwendig bleiben. Gründe hierfür können zum Beispiel sein:

- Durch die Erschließung erneuerbarer Wärmequellen oder Elektrifizierung lassen sich keine ausreichend hohen Prozesstemperaturen realisieren,
- die Größe und Morphologie der Produkte ermöglicht keine elektrische Erhitzung (z. B. beim Freiformschmieden großer Bauteile),
- zur Einstellung der gewünschten Produkteigenschaften ist eine spezielle Ofenatmosphäre und Flammenstrahlung notwendig (z. B. Ziegelherstellung) oder
- der Energieträger erfüllt gleichzeitig auch einen stofflichen Einsatzzweck (z. B. als Reduktionsmittel in der Primärstahlherstellung mittels Direktreduktion oder als Aufkohlungsmittel in der Gusseisenproduktion).

Solange großskalige elektrische Systeme noch nicht verfügbar sind oder ihr Einsatz aufgrund der langen Reinvestitionszyklen bestehender Anlagen noch nicht wirtschaftlich ist, stellt unter Umständen der Einsatz von Erdgas eine unvermeidliche Brückentechnologie dar. In bestehenden Erdgasbrennern kann die sukzessive Substitution von Erdgas durch alternative Energieträger wiederum den Übergang zur Defossilisierung ebnen. Durch den Einsatz von Wasserstoff lassen sich dabei insbesondere mit Blick auf die kurz- und mittelfristigen Klimaziele bis zum Jahr 2030 vergleichsweise einfach THG-Einsparungen erzielen. So wird z. B. in der Glasindustrie aktuell die Glasschmelze sowohl mit Mischgas (Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas) als auch mit reinem Wasserstoff als Brennstoff erprobt. Dabei werden Prozesstemperaturen von über 1.600 °C erreicht. Mittel- bis langfristig ist hier auch die Umstellung der Anlagen auf Strom eine Option, aber entsprechende Technologien sind in der erforderlichen Anlagengröße bislang nicht am Markt verfügbar. Kann die Wärmeversorgung nicht vollständig elektrifiziert werden, sollte zunächst eine hybride Beheizung mit Strom und die Zufeuerung mit alternativen Energieträgern als Option überprüft werden, bevor eine vollständige Umstellung auf alternative Energieträger erfolgt, da so die zusätzlichen Umwandlungsverluste zur Herstellung dieser Energieträger im Gesamtsystem möglichst geringgehalten werden.

Dies geschieht bereits in der Glasindustrie (induktive elektrische Heizung in der Glaswanne mit zusätzlicher Gasverbrennung oberhalb der Glaswanne) und ist zukünftig auch in der Zementbranche angedacht (elektrisches LEILAC-Verfahren mit elektrisch beheiztem Kalzinator und alternativen Brennstoffen im Hauptbrenner des Drehrohrofens).

Biomasse steht prinzipiell schon heute als erneuerbare Wärmequelle zur Verfügung, wird bislang aber kaum in industriellen Hochtemperaturprozessen eingesetzt. Biomasse ist gut lagerbar und kann daher zur grundlastfähigen Prozesswärmeerzeugung genutzt werden. Vorteilhaft ist außerdem ihre Eignung zum gekoppelten Einsatz als Energieträger und als THG-neutrale Kohlenstoffquelle (z. B. in der chemischen Industrie oder der Eisen- und Stahlindustrie). Technologien zur Nutzung von biogenen Brennstoffen sind bereits teilweise vorhanden, müssen jedoch insbesondere für die industrielle Hochtemperaturanwendung und speziell für die gekoppelte und Kaskadennutzung entwickelt und in die Anwendung gebracht werden (Lenz et al. 2020, DBFZ und UFZ 2020). Problematisch ist die Verfügbarkeit von Biomasse, die insbesondere durch die möglichen Anbauflächen limitiert ist, da Flächennutzungskonflikte mit der Landwirtschaft und ein Verlust an Biodiversität durch übermäßigen Anbau schnellwachsender Baumarten vermieden werden müssen. Die vorhandenen Potenziale reichen nicht aus, um die komplette Industrie in NRW zu versorgen, weshalb der Einsatz so zielgerichtet und effizient wie möglich erfolgen sollte. Dabei bestehende Nutzungskonflikte mit anderen Sektoren wie der Energieversorgung oder der Wärmeerzeugung zur Gebäudeheizung sollten berücksichtigt werden. Perspektivisch sollten bisherige Niedertemperaturanwendungen zugunsten von Hochtemperaturanwendungen in der Industrie auf alternative Wärmeversorgungssysteme umgestellt werden (Lenz et al. 2020). So kann die verfügbare Biomasse dort eingesetzt werden, wo es am wirksamsten und sinnvollsten ist.

Synthetisches Methan und Biomethan sollten aufgrund ihres Kohlenstoffgehalts (die chemische Formel von Methan ist CH_4) nur im Übergang eingesetzt werden bis industrielle Wasserstoffbrennertechnologien verfügbar sind bzw. nur wenn der Produktionsprozess einen Resteinsatz von Kohlenstoff erfordert (Primärstahlherstellung). Die Nutzung kohlenstoffhaltiger Energieträger erzeugt bei der Verbrennung unweigerlich CO_2 -Mengen, die in einer klimaneutralen Industrie nicht in die Atmosphäre emittiert werden sollten. Darüber hinaus erhöht die Nutzung dieser Energieträger den Energiebedarf des Gesamtsystems (durch Synthetisierung, CO_2 -Abscheidung, Biogasaufbereitung sowie deren Umwandlungsverluste).

Der großskalige Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff in der Industrie wird in Zukunft signifikante Wasserstoffbedarfe erzeugen. Die Spanne zwischen den in verschiedenen Studien prognostizierten Bedarfen ist dabei groß: Modellrechnungen für die „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“ (dena 2018) ergeben für Anwendungen dieser Art (ohne stoffliche Nutzung von Wasserstoff) im Jahr 2050 einen gesamtdeutschen Wasserstoffbedarf von 40 Terawattstunden. Die Szenarioberechnungen im Rahmen der „Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen“ (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH 2019) zeigen sogar einen möglichen gesamtdeutschen Bedarf von 150 Terawattstunden. Diese enorme Spanne verdeutlicht gut, dass der schlussendliche reale Bedarf maßgeblich davon abhängen wird, wie früh auch kleinere energieintensive Industriebetriebe verlässlich mit Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen versorgt werden können. Ebenso hat der zunehmende Grad an Elektrifizierung des Wärmebedarfes (siehe Abschnitt 3.3) einen Einfluss auf die Höhe der zukünftigen Wasserstoffnachfrage. Der notwendige Wasserstoffinfrastrukturaufbau ist eine langfristige Aufgabe, die parallel zum Aufbau der Erzeugungsstrukturen geleistet werden muss. Entlang des Transformationspfads kann daher auch übergangsweise der Einsatz blauen Wasserstoffs aus Dampfreformierung von Erdgas mit CO_2 -Abscheidung notwendig sein, um Versorgungssicherheit für die Industrie herzustellen. Dies wiederum setzt aber eine CO_2 -Speicherungsinfrastruktur voraus, die ebenfalls mit entsprechendem zeitlichem Vorlauf erschlossen werden muss. Darüber hinaus muss Versorgungssicherheit durch enge Kooperationen innerhalb Europas (z. B. zwischen Nordrhein-Westfalen und den Niederlanden, Flandern, Schottland etc.), aber auch mit potenziellen Wasserstoffexportnationen (z. B. in Nordafrika) frühzeitig aufgebaut werden. Um im Falle einer Umrüstung auf gänzlich neue Technologien, wie z. B. die Umstellung der Hochofenroute auf Direktreduktionsanlagen, diese zu ermöglichen und Lock-In-Effekte zu vermeiden, kann der übergangsweise Erdgasbetrieb in diesem Falle eine sinnvolle Brücke darstellen, bis ein Betrieb mit Wasserstoff möglich ist. Es ist nicht zu erwarten, dass in der Hochlaufphase einer großskaligen Wasserstoffwirtschaft alle Industrieprozesse, die aktuell bereits mit Erdgas betrieben werden (wie z. B. nicht elektrifizierbare Hochtemperaturerzeugung für metallurgische Prozesse in Walzwerken und Schmieden oder nicht vollständig elektrifizierbare Schmelzprozesse bei der Flachglasherstellung),

sofort mit ausreichenden Mengen an klimafreundlich erzeugtem Wasserstoff versorgt werden können. Für solche Prozesse kann mittelfristig die Weiternutzung von Erdgas als Energieträger unumgänglich sein, bis Wasserstoff in großen Mengen verfügbar ist.

4. HERAUSFORDERUNGEN DER WÄRMEWENDE

Die Transformation des Wärmesystems ist eine enorme Herausforderung, die ökonomische, regulatorische, technologische und gesellschaftliche Ebenen umfasst. Nachfolgend werden konkrete Hemmnisse auf dem Weg zu einer klimaneutralen Prozesswärmeversorgung sowie entsprechende Lösungsansätze aufgeführt.

...auf ökonomischer/regulatorischer Ebene:



Hemmnisse

Lösungen

- **hohe CAPEX** (bei erneuerbaren Wärmequellen und bei notwendiger redundanter System-Auslegung)
- **hohe OPEX** (bei EE-Elektrifizierung und erneuerbaren Brennstoffen)
- **Kostenbelastung durch EEG- und weitere Umlagen** bei zunehmend stromintensiver Wärmeerzeugung (PtH)

- **Nachjustierung des Abgaben- und Umlagensystems**, um systematisch Anreize für klimaneutrale Technologien zu setzen und PtH mit grünem Strom ebenso zu fördern bzw. zu entlasten wie die Produktion von grünem Wasserstoff
- **Anschubförderungen** (insbesondere zur Einbindung regenerativer Wärme, z. B. Geothermie) und Fördermechanismen für Projekte für CAPEX und OPEX (z. B. durch Klimaschutzverträge³)
- **Planbarer** Anstieg der CO²-Bepreisung für fossile Energieträger (zusammen mit einem notwendigen umfassenden Carbon-Leakage-Schutz für die energieintensive Industrie)
- **Neue und klimafreundliche Technologien müssen** im Vergleich zu fossilen Lösungen wirtschaftlich zu betreiben **sein** (welche Technologie bzw. welcher -mix jeweils passend ist, sollte **technologieoffen** entsprechend des Vier-Stufen-Modells geprüft werden)

- Hohe Anforderungen an **Refinanzierung** seitens der Banken

- **Verbesserung der Kreditkonditionen** für nachhaltige Projekte
- Einführung eines „Bankentags“ zum **regelmäßigen engen Austausch zwischen Banken und Unternehmen**

³ Klimaschutzverträge, häufig auch unter dem Begriff „Carbon Contracts for Difference“ diskutiert, sollen Investitionen in Schlüsseltechnologien für die Industrietransformation ermöglichen (IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021).

Hemmnisse

Lösungen

<ul style="list-style-type: none"> • Risiko, Entlastungen zu verlieren, wenn die Leistungsabnahme mit Blick auf die Nutzung von Überschussstrom flexibilisiert wird (Regelung nach Strom NEV § 19 Abs. 2 Satz 2) • Marktmechanismen und preisliche Anreize für Flexibilitätskonzepte fehlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt der Anreize für netzstabilisierende gleichmäßige Stromentnahme über die Regelung nach § 19 Abs. 2 StromNEV, aber gleichzeitig flankierende Ausweitung geeigneter Marktmechanismen, um einen netzdienlichen Anlagenbetrieb bzw. das Anbieten von Energiedienstleistungen ökonomisch attraktiver zu gestalten • Transparenz im Hinblick auf momentane Netzauslastung für Industrieabnehmer (und BNetzA) durch ÜNB (intelligente Stromnetze) und darauf aufbauend effektive Preisgestaltung für ein Demand-Side-Management
<ul style="list-style-type: none"> • Verzögerungen aufgrund von langen Genehmigungsverfahren • hoher bürokratischer Aufwand von Förderanträgen und lange Dauer 	<ul style="list-style-type: none"> • Genehmigungsverfahren modernisieren und beschleunigen (u. a. bei Untergrunduntersuchungen für Tiefengeothermie), insbesondere auf NRW-Landesebene (ohne auf adäquate Beteiligungsprozesse zu verzichten) • Vereinfachung der Antragsprozesse
<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende einheitliche Bewertungssystematiken in Bezug auf grünen Strom und Gase erschweren langfristige Planung und Kalkulation 	<ul style="list-style-type: none"> • Der Bezug von grünem Strom und Gas (z. B. Wasserstoff) muss einheitlich und auf bilanzieller Basis geregelt werden, z. B. über Herkunftsnachweise • Erleichterung von Kalkulationen (z. B. für Förderanträge) durch übergeordnete Bereitstellung exemplarischer Effizienz- und Emissionsfaktoren (siehe auch F&E-Bedarf)

...auf technischer Ebene:

Hemmnisse	Lösungen
<ul style="list-style-type: none"> • Mangelnder Ausbau von Infrastrukturen für Wärmetransport & -verteilung und für Erneuerbare Energien (Strom und Wärme); darunter fällt auch der Ausbau von Fernwärmenetzen bzw. deren Anschluss an die wärmeintensive Industrie • Keine ausreichende bzw. unsichere Stromnetzanschlusskapazität und -verfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastrukturausbau beschleunigen (Netze, Speicher und Sektorenkopplung) zur Gewährleistung von Versorgungssicherheit • Verpflichtende Erstellung kommunaler Wärmepläne (s. o.) • Ausreichende Berücksichtigung von PtH und PtG in den NEP Strom und Gas (s. o.)
<ul style="list-style-type: none"> • Natürliches Potenzial regenerativer Energien im Verhältnis zum Energiebedarf in NRW gering (Solar) oder zu wenig bekannt (Geothermie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigung des Ausbaus Erneuerbarer Energien auch in NRW (s. o.) • Erkundung des tiefengeothermischen Potenzials in NRW (wie bspw. in Bayern und den Niederlanden)
<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung wechselweise und ergänzender hybride betreibbarer industrieller Wärmeversorgungskonzepte zu wenig bekannt • Existierende Technologien teilweise nicht auf Prozesse anwendbar oder noch nicht industriell verfügbar • Niedertemperatur (Ab)Wärme bislang kaum nutzbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung des Forschungsbedarfes insbesondere in den nachfolgenden Bereichen und Unterstützung der Hochskalierung von Technologien zur industriellen Anwendung: • Prozessspezifische Technologien zur Wärmespeicherung und Nutzbarmachung von niederkalorischer (Ab)Wärme (100- 450 °C), bspw.: Hochtemperatur-Wärmepumpen, Hochtemperatur-Wasserstoff-Brennstoffzellen, hybride Systeme • Einsatz erneuerbarer (grüner) Energieträger in vorhandenen Thermoprozess-Komponenten und -Anlagen unter Beachtung des Einflusses auf Prozesskriterien (Mengen, Temperaturen, Qualität) vorhandener Prozesse (z. B. Schmelzen von Metallen) • Entwicklung und Förderung von Konzepten zur systematischen Minimierung von Prozesstemperaturen (LowEx) und von Abwärme-Kaskadennutzung

- übergeordnete Ermittlung exemplarischer Effizienz- und Emissionsfaktoren, die sich durch den stufenweisen Einsatz von erneuerbaren Energieträgern zur Substitution fossiler Energieträger ergeben

... auf gesellschaftlicher Ebene:

- Geringe **Akzeptanz für Industrie** in einigen gesellschaftlichen Gruppen und damit auch der zu transformierenden Energieversorgung
- geringe gesellschaftliche Akzeptanz für den Ausbau von **neuen Infrastrukturen** (u. a. für Wärmetransport und -verteilung, Stromnetz- und H₂- und O₂-Gasnetzausbau)
- teilweise geringe Bereitschaft zur **Zahlung höherer Preise für klimaneutrale Produkte**

- Diskursive **und kommunikative Einbettung** in Gesamttransformationsszenarien
- Transparente **Planungsprozesse**, attraktive Beteiligungsformate und effektive Anreize
- Wärmewende kann auch Industrieakzeptanz erhöhen: **Kommunikationsstrategien weiterentwickeln**

5. WIE MACHEN WIR UNS JETZT AUF DEN WEG?

Wie die vorherigen Kapitel verdeutlichen, wird eine klimaneutrale industrielle Wärmeversorgung neben der direkten Nutzung von lokalen erneuerbaren Wärmequellen und unvermeidbarer Abwärme sowohl auf regenerativ erzeugten Strom angewiesen sein als auch auf klimaneutrale Brennstoffe, wie z. B. grünen Wasserstoff, da deren Einsatz eine zeitliche Entkoppelung von der fluktuierenden EE-Strom-Erzeugung ermöglicht. Bei der industriellen Wärmeversorgung sind Versorgungssicherheit einerseits und Energieeffizienz und Flexibilisierung der Prozesse andererseits von zentraler Bedeutung. Die zukünftige Wärmeversorgung beruht also auf verschiedenen Energieträgern und -quellen, weshalb insbesondere die Kopplung der Sektoren eine wichtige Rolle einnimmt. Damit die THG-Reduktionsziele erreicht werden können, muss **jetzt** eine entsprechende Planung der Erzeugungs-, Transport-, Speicher- und Verteilungsstrukturen (Strom-, Gas- und Wärmenetze) erfolgen, da die benötigten Energiemengen für klimaneutrale Wärme nicht durch heutige Erzeugungskapazitäten und die bestehende Infrastruktur gedeckt werden können. Von staatlicher Seite müssen entsprechende Strukturen aufgebaut werden, um die benötigte Menge an emissionsarmen Energieträgern bereitstellen zu können.

Parallel dazu muss auch die lokale Infrastruktur der industriellen Wärmeverbraucher angepasst werden, beispielweise durch eine dezentrale, auf Tiefengeothermie basierende Wärmeversorgung oder durch große Wärmespeicher, die die Wärmeversorgung im Allgemeinen resilienter gestalten, da Erneuerbare Energien wie Sonne und Wind den Bedarf in Deutschland nicht jederzeit allein decken können. Darüber hinaus gilt es, Nah- und Fernwärmenetze aufzubauen und zu erweitern, um die effiziente Nutzung von unvermeidbarer Abwärme zu ermöglichen. Parallel zu diesen Prozessen müssen Technologien (wie z. B. großskalige Wasserstoffbrenner, Hochtemperatur-Wärmepumpen und -speicher oder auch elektrische Glasschmelzwannen) bis zur Industriereife neu- und weiterentwickelt werden. All dies verdeutlicht, dass im Hinblick auf eine klimaneutrale Wärmeversorgung eine interdisziplinäre stakeholder- und sektorübergreifende ganzheitliche Planung maßgeblich ist. Dies macht eine erfolgreiche Wärmewende so komplex.

Was gilt es zu beachten?

Auf der Anwenderseite hat jedes Unternehmen **individuelle Anforderungen** hinsichtlich der benötigten Wärmemenge und des zu erreichenden Temperaturniveaus (siehe Tabelle 1). Aus diesem Grund kann es keine allgemeingültige Lösung zur Umstellung auf eine klimaneutrale Wärmeversorgung geben, weder pauschalisiert für NRW noch für ganz Deutschland. Nicht einmal für jede Branche lässt sich ein für alle Standorte anwendbares Wärmeversorgungskonzept erarbeiten, da hier Standortfaktoren eine Rolle spielen, wie z. B. bei der externen Abwärmenutzung (siehe Kapitel 3.1) oder der Nutzung erneuerbarer Wärmequellen (siehe Kapitel 3.2). Daraus ergibt sich **Handlungsbedarf für jedes Unternehmen**, entlang der beschriebenen Stufen in Abbildung 5, zukünftige Versorgungsmöglichkeiten zu prüfen und standortspezifische Konzepte zu erstellen, mit denen der direkte Ausstoß von THG vollständig vermieden und damit die Klimaziele erreicht werden. Die sich daraus ergebenden Energiebedarfe sollten so früh wie möglich in die Konsultationsprozesse der Netzentwicklungspläne (NEP) Strom und Gas der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) eingebracht werden (siehe Abbildung 7).

Auf der Dargebotsseite werden zukünftig nicht mehr nahezu universell einsetzbare und von Tages- und Jahreszeiten unabhängig verfügbare Energieträger existieren, wie derzeit Erdgas und Kohle. Vielmehr ist das Wärmesystem der Zukunft diversifiziert und basiert zu einem Großteil auf volatilen Quellen. Diese Volatilität stellt eine der größten Herausforderungen des zukünftigen Energiesystems dar und macht es erforderlich, Energie direkt oder durch Umwandlung speicherbar zu machen (Beispiele sind Stromspeicher: Batterien, PtHtP, PtHtP(+H); PtG: Wasserstoffspeicher; PtH: Wärmespeicher). Insbesondere für größere Industriestandorte können sich hieraus in Zukunft auch mögliche Geschäftsmodelle zur Anbietung von Systemdienstleistungen zur Stabilisierung der Netze (Regelenergie) ergeben. Damit solche Geschäftsmodelle möglich werden und allen voran Versorgungssicherheit durch ein insgesamt stabiles und funktionsfähiges Energiesystem gewährleistet werden kann, bedarf es **übergeordneter regulatorischer Leitplanken**. Diese müssen durch Parlamente und die **Ausführungsorgane der Politik (u. a. Behörden, Ministerien, BNetzA)** festgelegt und gelenkt werden. Dabei ist insbesondere die Wechselwirkung von Strom-, Gas- und Wärmenetzen eine Herausforderung, die zwingend im Zusammenspiel betrachtet, geplant und bewertet werden muss.

Grundlegende Voraussetzung für die Bereitstellung einer klimaneutralen Wärmeversorgung ist die Verfügbarkeit von Erneuerbarer Energie in ausreichender Menge. Das zukünftige Wärmesystem wird nicht nur einen deutlichen Mehrbedarf an EE-Strom für PtH-Anwendungen mit sich bringen, auch die Herstellung von alternativen Brennstoffen (z. B. grüner Wasserstoff aus Elektrolyse) wird große Mengen EE-Strom benötigen. Der **Ausbau entsprechend großer EE-Kapazitäten** (Erzeugung und Infrastruktur) stellt eine große Herausforderung dar. Vor allem auch der lokale Ausbau von EE in NRW – dabei insbesondere Onshore-Windkraft und Photovoltaik – muss daher intensiv vorangetrieben werden.

Wie sollte nun konkret am besten vorgegangen werden?

Aufgrund dieses wichtigen Zusammenspiels einzelner Unternehmen und übergeordneter Leitplanken ergibt sich derzeit eine Art „**Henne-Ei-Problematik**“, die in den vergangenen Jahren zu einer Stagnation der so wichtigen „Wärmewende“ geführt hat (siehe Abbildung 1). Unternehmen sind ohne Planungssicherheit hinsichtlich der Kosten und Verfügbarkeit von Energie nur schwer in der Lage, fundierte Energieversorgungskonzepte zu erstellen und die entsprechenden Bedarfe gegenüber den ÜNB zu melden. Auf der anderen Seite müssen für eine adäquate Netzplanung die industriellen Energiebedarfe (und Energieträger) einzelner Standorte bekannt sein, um diese bei der übergeordneten Infrastrukturplanung berücksichtigen zu können. Aus diesem Grund muss in einem instanzenübergreifenden Zusammenspiel und durch eine iterative Vorgehensweise Schritt für Schritt eine zukunftsfähige Wärmeversorgung etabliert werden (siehe Abbildung 7). Regelmäßige interdisziplinäre und sektorübergreifende Abstimmungs- und Dialogprozesse sind hierbei neben geeigneten Förderbedingungen für zukunftsweisende Pilotprojekte enorm wichtig. Genauso muss allerdings **jede Instanz bereits jetzt entsprechende Strategien erarbeiten und Schritte einleiten**, damit der Gesamtprozess angestoßen wird.

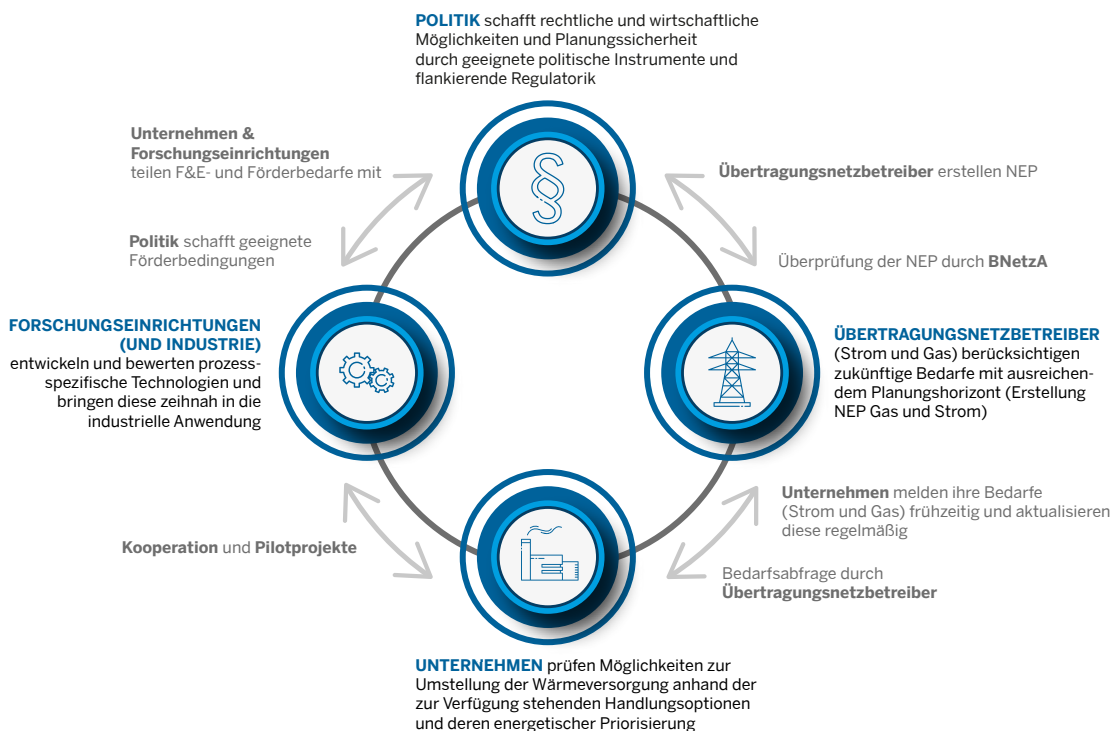


Abbildung 7: Instanzenübergreifendes Zusammenspiel und Vorgehensweise zum Aufbau einer zukunftsfähigen Wärmeversorgung

LITERATUR

- AEE 2017: Erzielte Temperaturen aus erneuerbaren Wärmequellen. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Abgerufen am 16. 03. 2021 von <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/erzielte-temperaturen-aus-erneuerbaren-waermequellen>
- Ausfelder, F. et al. 2015: Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. Chemie Ingenieur Technik, 87(1-2), S. 17-89. doi:10.1002/cite.201400183
- BMWi 2020a: Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin.
- BMWi 2020b: Zahlen und Fakten: Energiedaten. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 04. 03. 2021 von https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=131
- BMWi; IBP 2009: LowEx Symposium. Zum deutschen Projektverbund des BMWi. 28.10. – 29.10.2009. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Kassel. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- DBFZ; UFZ 2020: Empfehlungen des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) und der Bioökonomie-Plattform am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) für die deutsche Bioökonomie-Politik. Leipzig.
- dena 2018: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Deutsche Energie-Agentur, Berlin.
- Dumont, O. et al. 2020: Carnot battery technology: A state-of-the-art review. Journal of Energy Storage, 32, 101756. doi:10.1016/j.est.2020.101756
- Gerbert, P. et al. 2018: Klimapfade für Deutschland. The Boston Consulting Group und Prognos im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie e. V. (BDI).
- IN4climate.NRW (Hrsg.) 2021: Klimaschutzverträge für eine beschleunigte Transformation der Industrie. Positionspapier von IN4climate.NRW. Gelsenkirchen.
- IRENA 2020: Innovation Outlook: Thermal Energy Storage. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Jordan, M. et al. 2020: Robust bioenergy technologies for the German heat transition: A novel approach combining optimization modeling with Sobol' sensitivity analysis. Applied Energy, 262, 114534. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114534
- LANUV 2019: Potenzialstudie Industrielle Abwärme. LANUV-Fachbericht 96. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen.
- Lenz, V. et al. 2020: Status and Perspectives of Biomass Use for Industrial Process Heat for Industrialized Countries. Chemical Engineering Technology, 43(8), S. 1469-1484. doi:10.1002/ceat.202000077
- Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH 2019: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- Lutsch, W.; Witterhold, F.-G. 2005: Perspektiven der Fernwärme und der Kraft-Wärme-Kopplung: Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der AGFW-Studie „Pluralistische Wärmeversorgung“. Berlin: Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft, AGFW.

- Milanzi, S. et al. 2018: Technischer Stand und Flexibilität des Power-to-Gas-Verfahrens. Working Paper Energie und Ressourcen. Technische Universität Berlin.
- Olympios, A. V. et al. 2021: Progress and prospects of thermo-mechanical energy storage - A critical review. *Progress in Energy*, 3, 022001. doi:10.1088/2516-1083/abdbba
- Perkin, R. M. 2000: Electrically Generated Heat. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. doi:10.1002/14356007.b03_15
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut 2020: Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Berlin.
- Robinius, M. et al. 2020: Wege für die Energiewende - Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Schriften des Forschungszentrums Jülich, 499.
- Roelofsen, O. et al. 2020: Plugging in: What electrification can do for industry. McKinsey & Company.
- Rohde, C. 2016: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2015 mit Aktualisierungen der Anwendungsbilanzen der Jahre 2009 bis 2012. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), Karlsruhe.
- Schmidt, M. et al. 2015: roadmap | KWK.NRW – Einsatz von KWK-Technologien in NRW – Detailfragestellungen und Forschungsagenda. Abschlussbericht zum Verbundprojekt. Gas- und Wärme-Institut Essen (GWI) e.V., Lehrstuhl für Energietechnik (LET) und Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik der Universität Duisburg-Essen (LUAT), Essen.
- Schmidt, M. et al. 2018: Technologiebericht 4.2a Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch). In: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.
- Stadler, I. et al. 2020: Wärmespeicher in NRW. Thermische Speicher in Wärmenetzen sowie in Gewerbe- und Industrieanwendungen. Handlungsoptionen und Ergebnispapier der Expertengruppe AG 3B „Wärmespeicher“ im Netzwerk Netze und Speicher der EnergieAgentur.NRW. Düsseldorf: EnergieAgentur.NRW.
- Sterchele, P. et al. 2020: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg.
- Stober, I. et al. 2016: Tiefe Geothermie. Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Hannover.
- UBA 2021: Erneuerbare Energien in Zahlen. Abgerufen am 31.05.2020 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, Umweltbundesamt auf Basis AGEE-Stat; Stand 02/2021.
- von der Assen, N. et al. 2016: Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. *Environmental Science & Technology* 50(3), S. 1093-1101. doi:10.1021/acs.est.5b03474



Bildnachweis: istock / betoon



Kontakt: IN4climate.NRW
Munscheidstraße 14
45886 Gelsenkirchen
+49 209 40 85 99-0
post@in4climate.nrw
www.in4climate.nrw