

Die Rolle der Abwärme in Klimaschutzszenarien

Dietmar Schüwer, Jenny Kurwan und Sascha Samadi

Die Nutzung unvermeidbarer Abwärme gilt als ein wichtiger Baustein zur Dekarbonisierung von industrieller Prozesswärme und Fernwärme. In diesem Artikel werden die Ergebnisse einer Metaanalyse zur Rolle der Abwärme in verschiedenen Klimaschutzszenarien für Deutschland vorgestellt.

Die vorliegende Metaanalyse untersucht acht Szenariostudien (Sz. 1 bis Sz. 8), die im Zeitraum von Juni 2021 bis Mai 2023 veröffentlicht wurden und die sich auf den Bilanzraum Deutschland beziehen. Sie setzen das Erreichen der Klimaneutralität spätestens bis zum Jahr 2045 voraus und sind kompatibel mit den aktuellen deutschen Klimaschutzziele. Lediglich die in der Metaanalyse von ESYS untersuchten Szenarien basieren z.T. noch auf dem älteren nationalen Klimaschutzziel, welches Klimaneutralität erst für 2050 vorsieht.

Zusätzlich wird beispielhaft mit der Gexit-Studie (Sz. EU) ein Szenario mit einem auf Europa erweiterten Bilanzraum untersucht, welches (auch quantitative) Angaben zur Abwärme macht. Diese Studie ist mit dem europäischen Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 zielkonform. In Tab. 1 sind die jeweiligen Titel, Auftrag- bzw. Fördermittelgeber, bearbeitenden Institute sowie die Namen der betrachteten Szenarien zusammengestellt.

In der Metaanalyse wurden die Häufigkeit der Nennung des Begriffes Abwärme, der

Kontext, in dem das Thema behandelt wird, sowie qualitative und – sofern vorhanden – quantitative Aussagen zur Abwärmebereitstellung und Nutzung untersucht.

Die Häufigkeit der Nennung des Begriffes Abwärme schwankt dabei zwischen „0“ (Treibhausgasneutrales Deutschland bis 2045) und „10“ (Klimapfade 2.0). Diese Zahlen legen bereits eine relativ geringe Beschäftigung mit dem Thema Abwärme in vorliegenden Klimaschutzszenarien nahe. Selbst in der Studie mit den meisten Treffern (10) ist der Begriff

Kurztitel & Link	Langtitel	Veröffentlicht	Auftrag- / Fördermittelgeber	Bearbeiter	Klimaschutzszenarien
1) Ariadne-Report	Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich	Okt. 21	BMBF	Ariadne-Konsortium aus 13 Instituten (u.a. DLR, Fraunhofer, IER, PIK)	Sechs Zielerreichungsszenarien
2) BMWK Langfristszenarien 3	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Szenarien T45	Nov. 22	BMWK	Consentec, Fraunhofer ISI, ifeu, TU Berlin	Fünf Zielerreichungsszenarien
3) dena-Leitstudie	dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe	Okt. 21	dena	EWI et al.	Hauptszenario Klimaneutralität 100 (KN100) mit vier Pfadausprägungen
4) ESYS¹⁾	Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement	Feb. 23	acatech, Leopoldina und Akademieunion	Ragwitz, M./ Weidlich, A. et al.	Metaanalyse von 16 Szenarien aus 7 Energiesystemstudien Ergänzung um eigene Modellrechnungen
5) Klimapfade 2.0	Klimapfade 2.0: Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft	Okt. 21	BDI	Boston Consulting Group (BCG)	Zielfad
6) KNDE 2045	Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann	Jun. 21	Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut	Szenario Klimaneutral 2045
7) S4C 2023	Treibhausgasneutralität bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW	Mrz. 23	MWIKE NRW	Wuppertal Institut und Institut der deutschen Wirtschaft	SCI4climate.NRW-Klimaneutralität (S4C-KN)
8) Treibhausgasneutrales Deutschland bis 2045	Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045	Aug. 22	FZ Jülich (IEK-3)	FZ Jülich, Institut (IEK-3); Stolten, D./ Markewitz, P. et al.	Zielszenario KSG2045
EU Gexit¹⁾²⁾	Breaking free from fossil gas. A new path to a climate-neutral Europe	Mai 23	Agora Energiewende	Artelys, TEP Energy, Wuppertal Institut	EU Gas Exit Pathway

¹⁾ Alle Studien mit Ausnahme der Metaanalyse von ESYS (teilweise 2045, teilweise 2050) und Gexit (2050) haben 2045 als Zieljahr für die Klimaneutralität.

²⁾ Alle Studien mit Ausnahme von Gexit (Bilanzraum Europa) beziehen sich auf Deutschland

Tab. 1 Liste der zum Thema Abwärme untersuchten Studien und ihrer Klimaschutzszenarien

im Verhältnis zu anderen Schlüsseltechnologien – wie z.B. Wärmepumpe mit 152 Treffern – stark unterrepräsentiert.

Der Kontext der Nennung ist i.d.R. der Energie- und Gebäudesektor, d.h. das Thema wird vorwiegend aus Sicht der Senke, also der Wärmenachfrage behandelt, seltener aus Sicht der Quelle (Industriesektor). Eine Studie (SCI4Climate.NRW) nennt die Nutzung von Abwärme im Kontext der „energieeffizienten CO₂-Abscheidung in der Zementindustrie (Aminwäsche)“. Dabei handelt es sich also um eine interne Nutzung von Abwärme, die im Rahmen der Industrietransformation relevant werden könnte, dann aber ggf. das extern nutzbare Potenzial mindern würde.

Quantitative Aussagen aus der Metaanalyse

Lediglich vier der neun betrachteten Studien treffen quantitative Aussagen zur zukünftigen Abwärmenutzung in der Fernwärme bzw. zwei Studien zur Nutzung in der industriellen Prozesswärme (Tab. 2).

Für die Nutzung in der **Fernwärme** werden in den nationalen Studien Zuwächse von ca. 2 TWh im Jahr 2018 auf **10 bis 14 TWh** in den Jahren 2045/2050 erwartet. Dies entspricht in den Zieljahren einem Anteil von **6 bis 14 %** an der gesamten Fernwärme, die mit 101 bis 164 TWh aufgrund unterschiedlicher Annahmen zu den Erfolgen bei der

Bedarfsreduktion und beim Ausbau der Fernwärme eine nicht unerhebliche Spannweite abdeckt. Die europäische Gexit-Studie weist (für Europa) Anteile von 22 bis 26 % für 2045 bzw. 2050 (von insgesamt 615 bzw. 585 TWh Fernwärme) aus. Diese Werte sind jedoch nicht direkt vergleichbar, da in dieser Studie die Abwärme mit Umgebungswärme (in unbekannter Höhe) aggregiert wird. Der tatsächliche Anteil an genutzter Abwärme liegt daher möglicherweise deutlich niedriger.

Bemerkenswert ist, dass in der einzigen nationalen Studie (Klimapfade 2.0), die Angaben zur Abwärmenutzung in der **Prozesswärme** macht (allerdings lediglich als Summe inkl. der Fernwärme), der Höhepunkt der Nutzung mit 36 TWh (= 8 % von 444 TWh) bereits 2030 erreicht wird und diese dann bis 2045 auf weniger als die Hälfte (**15 TWh = 4 % von 366 TWh**) zurückfällt. In der Studie für Europa wächst die Summe aus Abwärme- und Umgebungswärmenutzung in der Prozesswärme hingegen kontinuierlich auf 300 (2045) bis 400 TWh (2050) oder entsprechend 10 bis 12 % (von insgesamt 3.150 bzw. 3.300 TWh) an.

Insgesamt gibt es in den betrachteten Studien nur wenige (detaillierte) Aussagen zur Abwärme und die wenigen quantitativen Aussagen sind teilweise unscharf, beispielsweise weil die Abwärme unter dem Begriff „Wärmepumpe“ subsumiert ist oder weil „Umgebungswärme und Abwärme“ (Gexit, s.o.)

oder „Fernwärme und Abwärme“ (Klimapfade 2.0) aggregiert ausgewiesen werden.

Qualitative Aussagen aus der Metaanalyse

Für die **FW-Erzeugung** wird in den betrachteten Studien erwartet, dass die Nutzung von Abwärme Teil einer ortsspezifischen, individuellen Kombination verschiedener Wärmequellen sein wird. Weitere neue und erneuerbare Wärmequellen werden demnach beispielsweise Geothermie, Solarthermie, (Groß-) Wärmepumpen, Elektrodenkessel (Power-to-Heat) sowie Biomasse und mit grünem Wasserstoff betriebene KWK-Anlagen in Verbindung mit Wärmespeichern sein (Szenario 5). Für eine defossilisierte Fernwärme muss den vorliegenden Szenarien zufolge sowohl der Anteil erneuerbarer Wärme als auch der Beitrag der Abwärme steigen. Übereinstimmend wird erwartet, dass Groß-Wärmepumpen mit Umgebungs- und Abwärme als Wärmequellen eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung der Fernwärme spielen werden. (Industrielle) Abwärme kann dabei sowohl Wärmequelle für Großwärmepumpen sein oder – bei direkter Anwendung und entsprechend hohem Temperaturniveau – alternativ den Einsatz von Wärmepumpen reduzieren (Sz. 2).

In der Industrie wird die Abwärmenutzung zum einen als klassische Energieeffizienzmaßnahme für **industrielle Prozesse** gese-

Abwärme in der Fernwärme / Prozesswärme in TWh	2018	2030		2045		2050	
	Abwärme	Abwärme	Anteil an FW/PW	Abwärme	Anteil an FW/PW	Abwärme	Anteil an FW/PW
Dena Leitstudie:							
Fernwärme	-	7	6 % (von 124)	14	13 % (von 109)	14	14 % (von 101)
Klimapfade 2.0:							
Fernwärme		5	3 % (von 157)	10	6 % (von 163)		
Prozesswärme ²⁾	-	36	8 % (von 444)	15	4 % (von 366)	-	-
KNDE:							
Fernwärme	2	5	3 % (von 149)	12	7 % (von 164)	10	7 % (von 153)
EU-Szenario							
Gexit (EU 27)¹⁾:							
Fernwärme	2	48	7 % (von 710)	133	22 % (von 615)	154	26 % (von 585)
Prozesswärme	0	250	8 % (von 3.050)	300	10 % (von 3.150)	400	12 % (von 3.300)

¹⁾ Gexit-Studie: „Ambient and waste heat“ gemeinsam ausgewiesen

²⁾ Klimapfade 2.0: „Fernwärme“ und „Abwärme“ gemeinsam ausgewiesen

Tab. 2 Übersicht über quantitative Aussagen zur Abwärmeentwicklung in Klimaschutzszenarien

hen. Ein konkret genanntes Beispiel ist die Senkung des spezifischen Energiebedarfs bei der Glasherstellung durch Abwärmehückgewinnung (Sz. 4). Zum anderen ermöglichen Industrie-Wärmepumpen bis zu einem Temperaturniveau von etwa 200 °C die Aktivierung von (minderwertiger) Umgebungswärme oder recycelter Abwärme, so dass Wirkungsgrade von deutlich über 100 % erreicht werden (Sz. EU). Es wird darauf hingewiesen, dass alle industriellen Wärmeerzeuger in Deutschland durch eine erneuerbare Lösung ersetzt werden müssen, um das Ziel der THG-Neutralität zu erreichen (Sz. 5). Für niedrige Temperaturen bis etwa 130 °C ist dabei aus Sicht der Autoren von Sz. 5 der Einsatz industrieller Wärmepumpen wie auch der Anschluss an Fernwärme oder industrielle Abwärme die voraussichtlich günstigste Option. Daher wird erwartet, dass bis zum Jahr 2030 insbesondere im Nieder- und Mitteltemperaturbereich viele industrielle Prozesse durch den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrokesseln elektrifiziert werden, teilweise kombiniert mit der Nutzung von Abwärme (Sz. EU).

Als **neue Anwendungen** sowohl für Fernwärme als auch für Abwärme werden Niedertemperatur-Direct-Air-Capture-Anlagen (mit einem Wärmebedarf in einem Temperaturbereich von 80 bis 120 °C) gesehen, die entweder direkt mit Abwärme von Industrie- und Kraftwerksanlagen oder alternativ mit Hochtemperatur-Wärmepumpen versorgt werden können (Sz. 3). Zukünftig könnten zudem als Alternative zu wasserstoffbetriebenen Kraftwerken (Power-to-Gas-to-Power) sog. Wärmespeicherkraftwerke (Power-to-Heat-to-Power) mit Hochtemperatur-Wärmespeichern zum Einsatz kommen. Deren Gesamtwirkungsgrade in der Kette vom Strom zu Strom liegen – insbesondere abhängig vom Grad der Abwärmenutzung – bei 30 bis 80 % (Sz. 3). Als weitere neue Anwendung sieht eine Studie die Nutzung von Abwärme zur Regeneration von aminwäschebasierter CO₂-Abscheidung (Sz. 7). Konkret wird für zwei der im Szenario längerfristig verbleibenden drei Klinkerproduktionsstandorte in Süddeutschland angenommen, dass im Jahr 2045 unter Nutzung von Abwärme auf energieeffiziente Weise 50 % (in Summe ca. 450.000 t CO₂) des entstehenden CO₂ abgechieden wird.

Als **politische Instrumente** zur Dekarbonisierung der Fernwärme werden die Förderung verschiedener Erzeugungstechnologien und der Wärmenetzausbau empfohlen (Sz. 5). Dabei sollten Großwärmepumpen, Biomasse, Geothermie, Groß-Solarthermie, die Anbindung von (Industrie-)Abwärme und schließlich der Fernwärmenetzausbau selbst (inklusive Temperaturabsenkungen) adressiert werden. Daneben wird vorgeschlagen, sukzessiv anwachsende Mindestanteile an erneuerbaren Energien und Abwärme in Fernwärmesystemen verbindlich vorzuschreiben (Sz. 1).

Grundsätzlich wird die Notwendigkeit gesehen, zum Erreichen der Klimaschutzziele Abwärmepotenziale aus Industrie, Gebäuden und Abwässern zu erschließen (Sz. 5). Das für Deutschland vorgezogene Klimaschutzziel der Klimaneutralität bis 2045 (statt bis 2050) erfordere dabei einen gegenüber der Vergangenheit schnelleren Markthochlauf der Abwärmenutzung (Sz. 6).

Es konnten in keiner der betrachteten Studien konkrete Aussagen über den erwarteten **Impact der Industrie-Transformation** im Rahmen der Dekarbonisierung auf zukünftige Abwärmepotenziale identifiziert werden. Das bedeutet, die Studien diskutieren nicht konkret, wie sich die Abwärmepotenziale zukünftig durch die notwendigen tiefgreifenden Änderungen bei industriellen Prozessen verändern werden. Es lassen sich jedoch indirekt Schlüsse ziehen, z.B. aus der Aussage der Studien, dass (Groß-)Wärmepumpen eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung sowohl der Fernwärme als auch industrieller Prozesswärme zugeschrieben wird. Abwärme kann, neben Umgebungswärme und geothermischer Wärme, dadurch in Zukunft zu einer zentralen Wärmequelle für den Einsatz von Wärmepumpen werden.

Die Ergebnisse der qualitativen Metaanalyse in Tabellenform sind einsehbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-85745>.

Fazit der Untersuchung

Das Abwärmekommen und seine potenzielle Nutzung wird in den betrachteten Szenariostudien eher am Rande betrachtet.

Die Analyse wird dadurch erschwert, dass manche Studien Abwärme unter dem Begriff „Wärmepumpe“ subsumieren oder „Umgebungswärme und Abwärme“ bzw. „Fernwärme und Abwärme“ aggregiert ausweisen. Die wenigen Studien, welche die Rolle der Abwärme explizit und quantitativ berücksichtigen, legen nahe, dass die Abwärmenutzung zukünftig ausgebaut werden könnte und sollte, und dass sie zumindest in der Fernwärmeerzeugung eine nicht unbedeutende Rolle für das Erreichen von Klimaneutralität spielen kann.

Eine tiefere Beschäftigung mit der Frage, wie sich im Rahmen der anstehenden Transformation der Industrie die Abwärmepotenziale verändern werden, findet in den betrachteten Szenariostudien nicht statt. Diese Forschungsfrage näher zu beleuchten, scheint angesichts der anstehenden tiefgreifenden Veränderungen jedoch sehr sinnvoll.

D. Schüwer, Senior Researcher, J. Kurwan, Researcherin und S. Samadi, Co-Leiter Forschungsbereich Sektoren und Technologien, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Kontakt:

dietmar.schuewer@wupperinst.org

Hinweis

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