

*BMWK-Fachtagung „Klimaschutz durch Abwärmenutzung“ | Düsseldorf*

# Wissenschaftliche Perspektiven und Ansätze für eine schnelle Umsetzung von Abwärmenutzungsoptionen

---

19. Oktober 2023

**Dietmar Schüwer (Senior Researcher)**

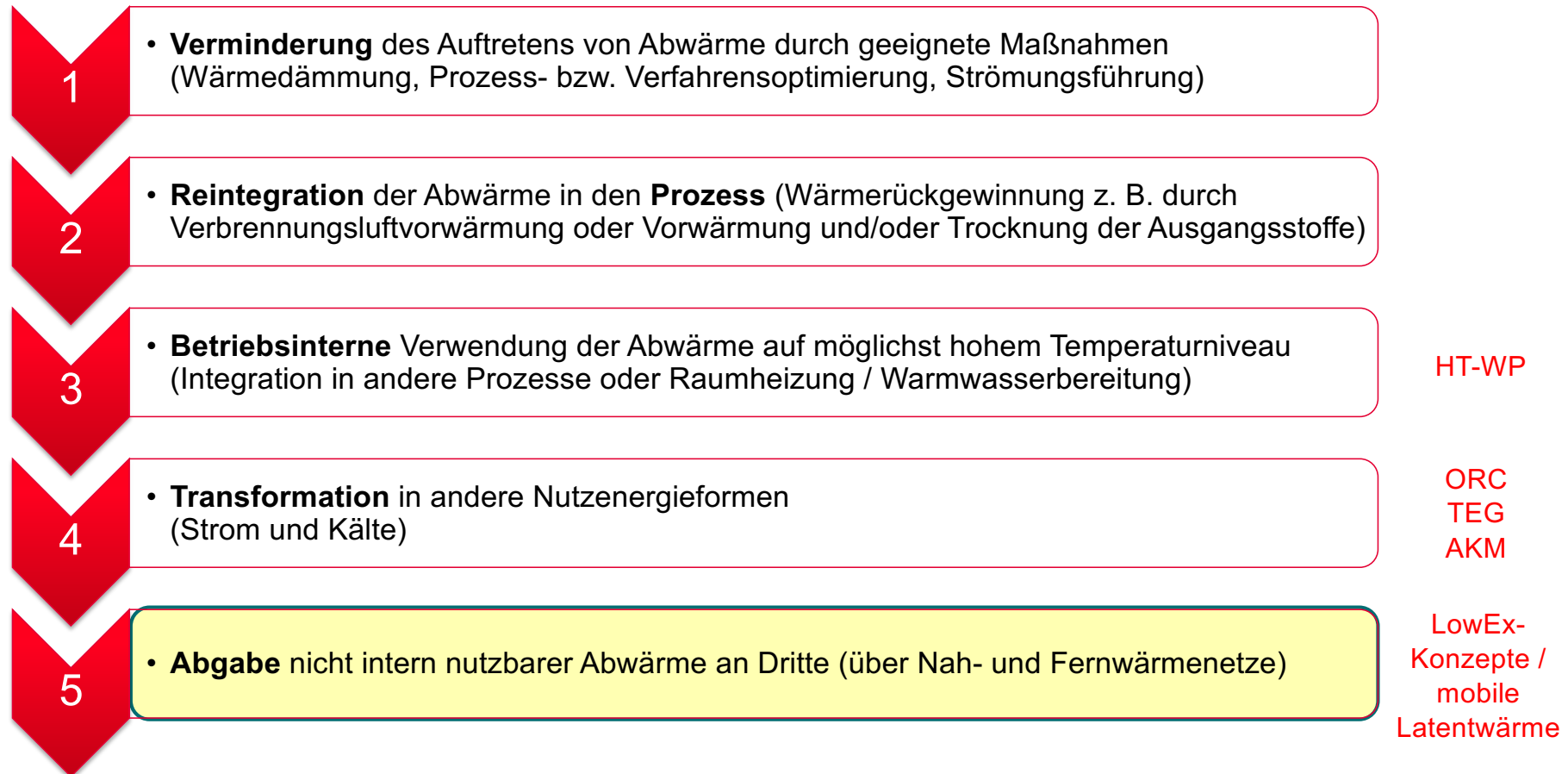
Abteilung Zukünftige Energie- und Industriesysteme

**Prof. Dr. Manfred Fishedick** (Präsident des Wuppertal Instituts)

**Dr. Sascha Samadi** (Co-Leiter des Forschungsbereichs Sektoren und Technologien)

**Jenny Kurwan** (Researcherin)

## Priorisierung der Abwärmenutzung und Einsatz innovativer Technologien & Konzepte



Quelle: Eigene Darstellung (nach SAENA 2012)

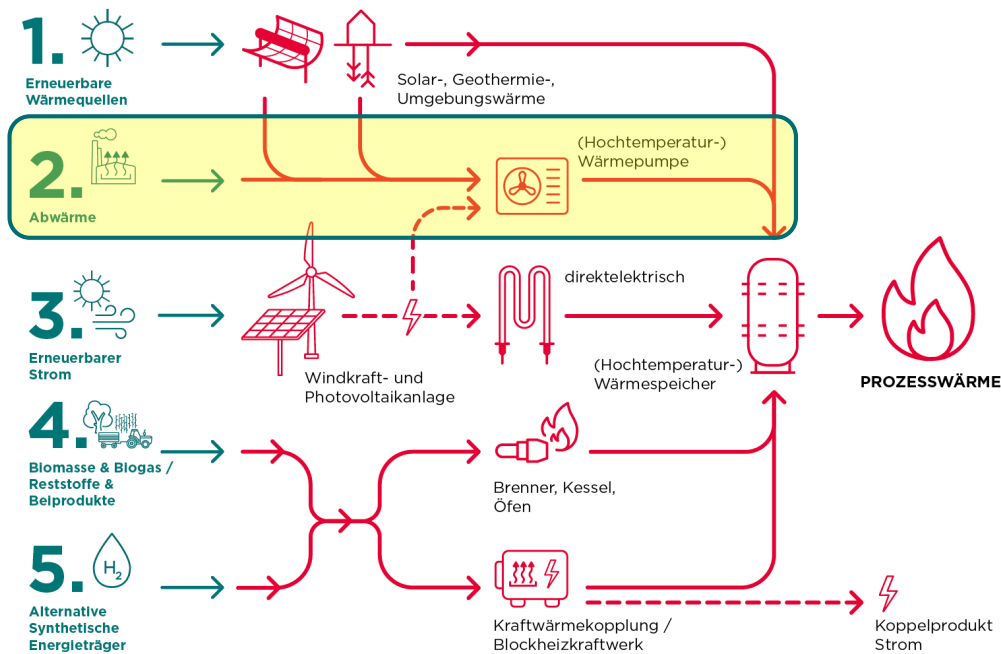
## Abwärmenutzung (industriell / kommunal / gewerblich) erfordert eine ganzheitliche Bewertung und eine sorgfältige **SWOT-Analyse**

INTERN	<ul style="list-style-type: none"><li>› (Bilanziell) <b>CO<sub>2</sub>-freie</b> und kostenlose/<b>günstige Wärmequelle</b>, sofern sie als ein unvermeidbares Nebenprodukt eines ohnehin notwendigen Prozesses entsteht und genutzt werden kann</li><li>› Sehr <b>große theoretische Potenziale</b> aus kommunalen (Abwasser, Klärwerke...), gewerblichen (Rechenzentren...) und industriellen (Prozesswärme) Quellen</li><li>› Nur relativ <b>geringer</b> (zusätzlicher) <b>Flächenbedarf</b> für Wärmetauscher, Filter, Pumpen und Leitungen</li></ul>	<b>Stärken</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>› <b>Quellen-Senken-Beziehung:</b><ul style="list-style-type: none"><li>• Ggf. kostenintensive <b>Transportleitung</b> erforderlich</li><li>• Ggf. <b>Mismatch</b> von Temperaturen oder Lastprofilen (z.B. durch Schicht- oder diskontinuierlichen Betrieb) -&gt; Investitionen in Wärmespeicher, Booster und/oder Backup-Systeme erforderlich</li></ul></li><li>› Ggf. abrasive oder <b>korrosive Abwärmeströme</b> -&gt; teure Wärmetauscher bzw. Filter</li><li>› <b>Strahlungswärme</b> technisch schwierig nutzbar</li></ul>	<b>Schwächen</b>
	EXTERN	<ul style="list-style-type: none"><li>› Nutzung kann aktive und kostenintensive <b>Kühlung und ökologische Gewässerbelastung</b> durch Wärmeeintrag <b>verringern</b></li><li>› <b>Innovationen</b> zur Nutzung von Strahlungswärme wie z.B. Thermo-elektrische Generatoren (<b>TEG</b>)</li><li>› Mit <b>Wärmepumpen</b> auch Niedertemperaturabwärme nutzbar</li><li>› Chance zur <b>Imageverbesserung</b> eines Abwärme liefernden Unternehmens</li><li>› Hohe politische und gesellschaftliche <b>Akzeptanz</b></li></ul>	<b>Chancen</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>› <b>Potenziale</b> vor Ort häufig im Detail <b>unbekannt</b></li><li>› Potenzielles <b>Ausfallrisiko</b> (in Menge, Leistung oder Temperatur) durch Produktionsausfall, Produktionsverlagerung oder Produkt- bzw. Prozesswechsel</li><li>› <b>Fehlendes Interesse</b> seitens der Industrie, Abwärme zu liefern (bislang keine Abwärmenutzungspflicht)</li></ul>

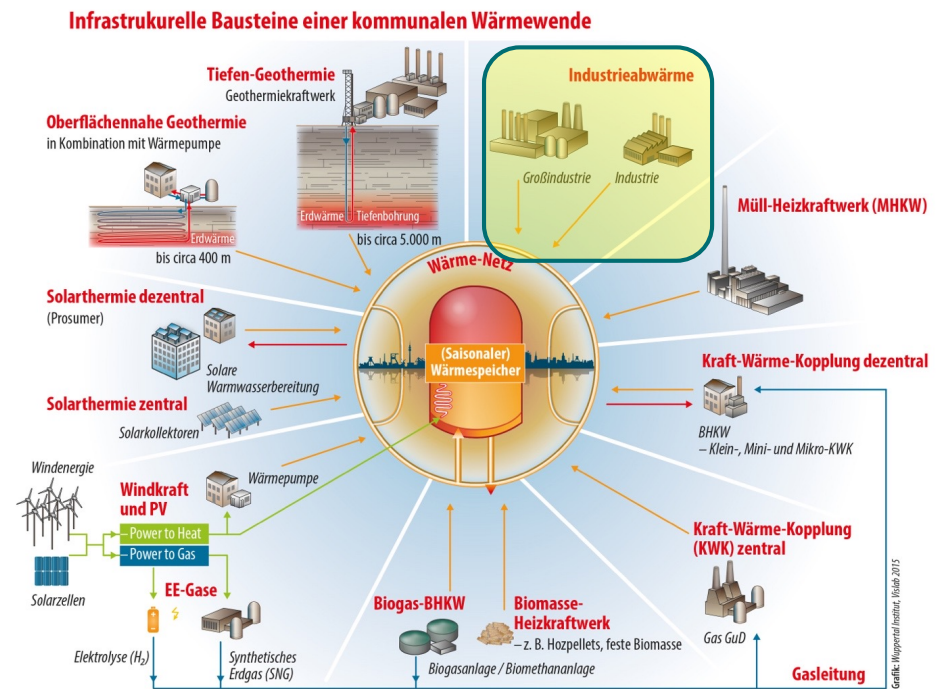
# Abwärme kann ein bedeutender Baustein werden für die Dekarbonisierung...

... der industriellen Prozesswärmeversorgung

... UND der kommunalen Wärmeversorgung



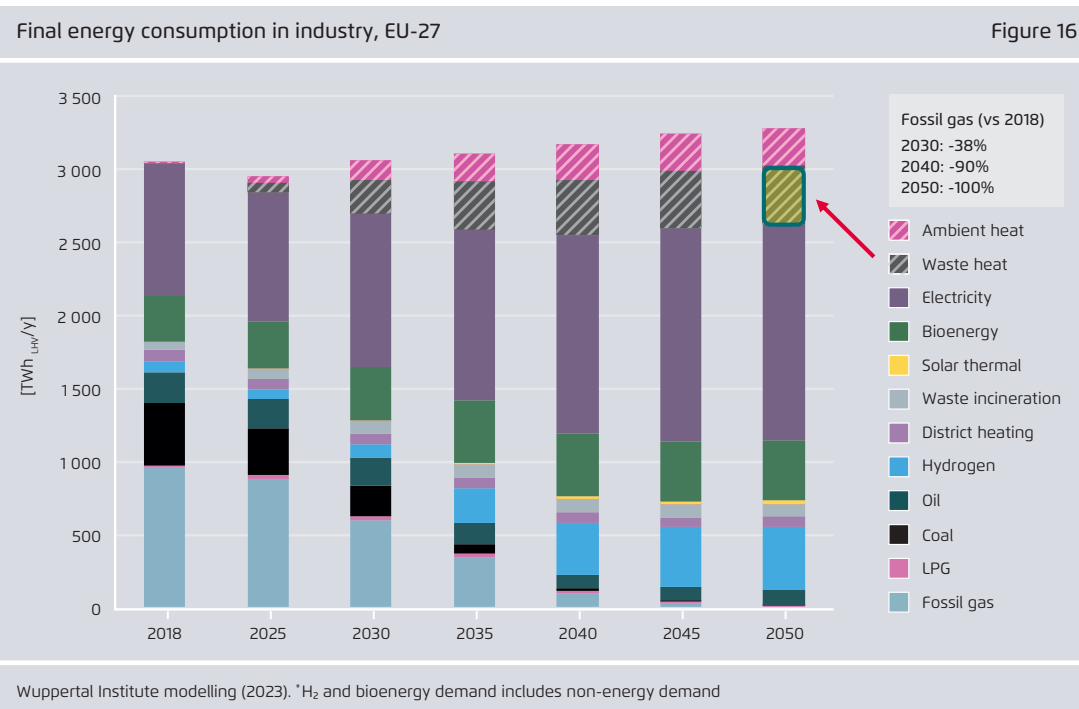
Quelle: Schüwer und Holtz in et 10/2023



Quelle: Wuppertal Institut

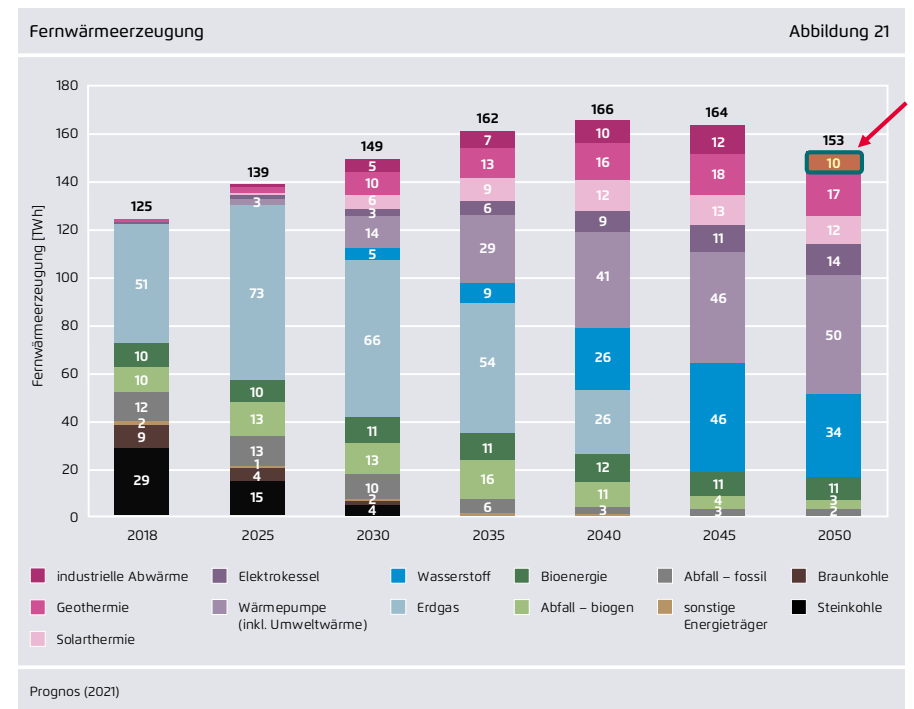
# Abwärme kann ein bedeutender Baustein werden für die Dekarbonisierung...

... der industriellen Prozesswärmeversorgung



Agora et al.: Breaking free from fossil gas (Mai 23)

... UND der kommunalen Wärmeversorgung

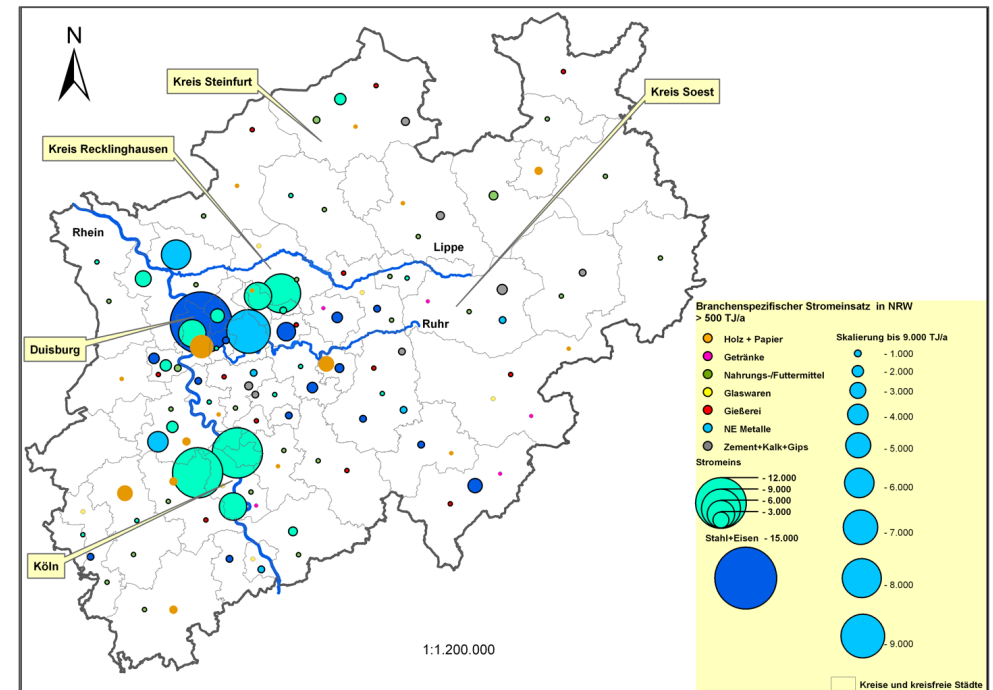
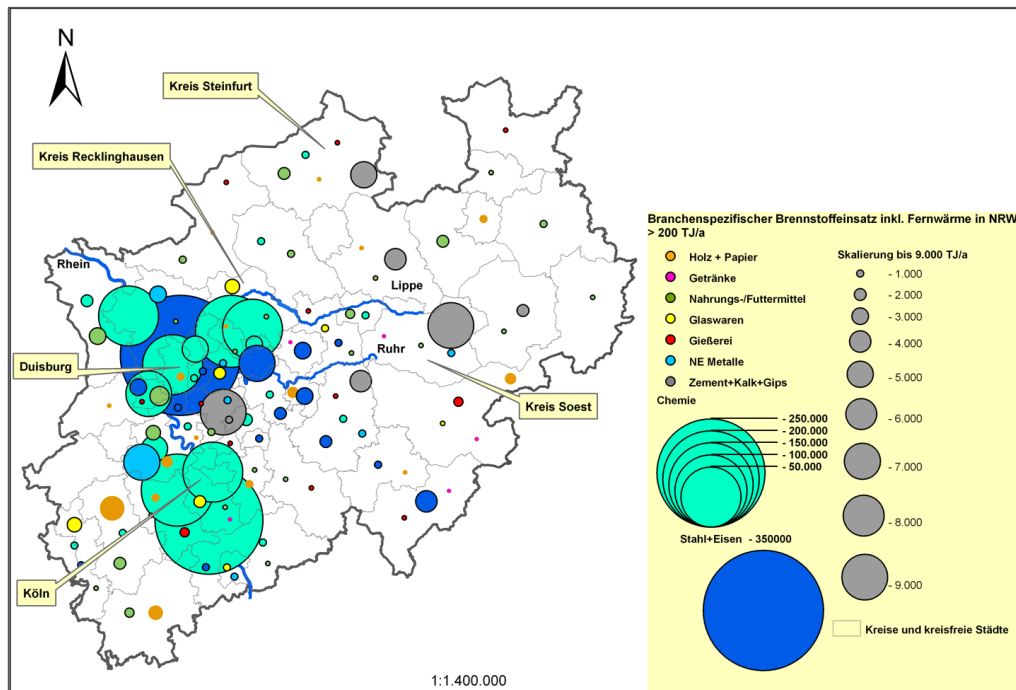


Prognos et al.: Klimaneutrales Deutschland 2045 (Jun 21)

# Identifikation regionaler Abwärme-Hot Spots über branchenspezifische Energieeinsätze

Spez. Brennstoffeinsatz (inkl. Fernwärme) > 200 TJ/a (55,6 GWh)

Spez. Stromeinsatz > 500 TJ/a (138,9 GWh)

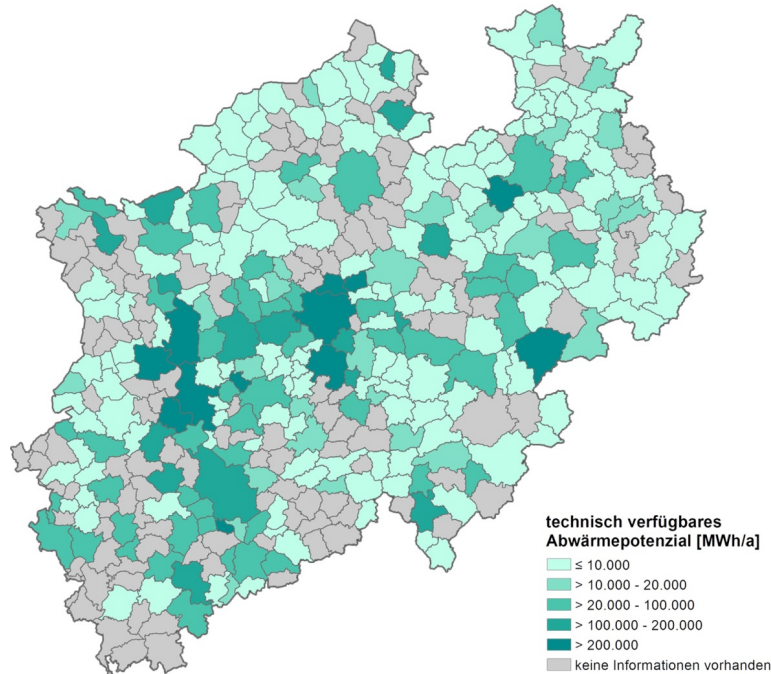


# Abwärmenutzung kann helfen, den notwendigen Umbau auf grüne Fernwärme zu ermöglichen

## Abwärmepotenziale NRW 2019

Aggregation der standortscharfen Abwärmepotenziale je Gemeinde

**Summe:** 88 bis 96 TWh technisch verfügbar  
davon ca. 50% verwendbar: 44 bis 48 TWh



LANUV 2019: Potenzialstudie Industrielle Abwärme - LANUV-Fachbericht 96

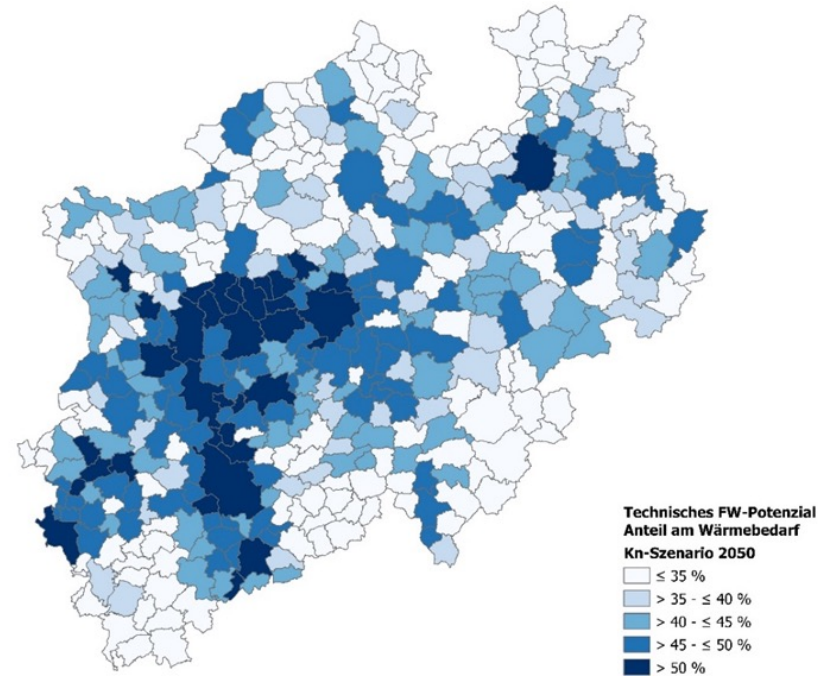
## Technische FW-Potenziale NRW im Klimaschutzscenario Kn 2050

in % Anteil am Gesamtwärmebedarf

(Mindest-Wärmeliniendichte: 750 kWh/m-a, Anschlussgrad: 50 - 70%)

**Summe: 46 TWh** (= 44 % vom Gesamtwärmebedarf 2050)

zum Vergleich Potenzial aus Projekt „Strom zu Gas und Wärme“ 2018:  
**28 bis 84 TWh** (> 30 bzw. 10 GWh/km<sup>2</sup>a, Szenario mit 50% Wärmebedarfsreduktion)



LANUV 2021: Potenzialstudie Kraft-Wärme-Kopplung - LANUV-Fachbericht 116



# Screening von „Abwärme“ in neun aktuellen Klimaneutralitäts-Studien (Jun 21 bis Mai 23)

Studie	Datum	Kontext / Kapitel	Anzahl Nennung	Quantitative Aussagen 2045	Qualitative Aussagen	Impact industr. Transformation
Ariadne-Report	Okt. 21	Wärmewende (Instrumente und Maßnahmen)	1	k.A. (ggf. unter 30 - 50% für Wärmepumpe)?	Vorschlag, sukzessive <b>anwachsende Mindestanteile an erneuerbaren Energien und Abwärme</b> in Fernwärmesystemen einzuführen (S. 106)	Kein Stichwort "Abwärme" in Industriekapitel
BMWK Langfrist-szenarien Foliensätze a) Energie b) Industrie c) Wärme	Nov. 22	a) Szenarienvergleich Wärmenetze (D/Europa) b) Methodik c) k.A.	1 1 0	k.A. (ggf. unter 116 - 138 TWh für Groß-Wärmepumpe)?	a) Foliensatz Energiewirtschaft: „Andere Wärmequellen wie industrielle Abwärme könnten <b>den Bedarf an Großwärmepumpen weiter reduzieren</b> “ (F56) b) Foliensatz Industrie: Graphik zur Methodik des Simulationsmodell FORECAST: <b>Industrie mit</b> (nicht näher erläuterten) <b>Auswirkungen auf die "Interfaces" "Abwärmepotenziale"</b> (sowie weitere "CCS, regionale Analyse und stündliche Lastkurve & DSM") c) Begriff „Abwärme“ kommt nicht vor	s. qualitative Aussage b)
dena-Leitstudie	Okt. 21	Energiesektor (FW-Nachfrage und -Erzeugung)	3 (+5 in Kurzgutachten)	<b>2030: 7 TWh</b> (von 124 TWh) <b>2045: 14 TWh</b> (von 109 TWh) <b>2050: 14 TWh</b> (von 101 TWh) bei HT-Groß-WP >130°C: <b>20% Abwärme</b> (pdf-S. 769)	"Um <b>langfristig klimaneutrale Fernwärme</b> bereitzustellen, werden <b>individuelle Kombinationen neuer Wärmequellen</b> wie Geothermie, Solarthermie, industrielle <b>Abwärme</b> , Großwärmepumpen und Power-to-Heat (Elektrodenkessel) sowie Biomasse und Wasserstoff eingesetzt." (S. 110) Kurzgutachten " <b>Technische Senken</b> ": Temperaturniveau von <b>NT-DAC-Anlagen</b> (80–120°C) kann durch entweder Abwärme von Industrie- und Kraftwerksanlagen oder von HT-Wärmepumpen bereitgestellt werden (pdf-S. 575 f.) Kurzgutachten " <b>Innovative Technologien</b> ": <b>Gesamtwirkungsgrad</b> von <b>HT-Speichern</b> (30-80%) abhängig vom Grad der Abwärmenutzung (pdf-S. 748) Abwärme und Abwasser als <b>nicht-erneuerbare Wärmequellen</b> für <b>Groß-WP</b> (pdf-S. 769)	Kein Stichwort "Abwärme" in Industriekapitel
ESYS		Szenario-Metaanalyse: Fernwärmef...			Verstärkte Nutzung von Fernwärme insbesondere in <b>Ballungsgebieten</b> ; neben erneuerbaren Wärmequellen können diese <b>auch Abwärme</b> einbinden, vor allem <b>aus Industrie &amp; Abwasser.</b> " (S. 49) <b>Keine Graphik zur Fernwärmestruktur</b> , nur Fußnote zu 2045:	Kein Stichwort



## Screening von „Abwärme“ in neun aktuellen Klimaneutralitäts-Studien (Jun 21 bis Mai 23)

- › **Häufigkeit** der Nennung des Begriffs „Abwärme“:  
zwischen „0“ (Treibhausgasneutrales Deutschland bis 2045) und „10“ (Klimapfade 2.0)
- › Nur 4 Studien mit **quantitativen Aussagen** zur Abwärmenutzung in der FW bzw. 2 Studien in der industriellen Prozesswärme:

Abwärme / Fernwärme / Prozesswärme in TWh	2018	2030		2045		2050	
	Abwärme	Abwärme	Anteil an FW/PW	Abwärme	Anteil an FW/PW	Abwärme	Anteil an FW/PW
<b>Dena Leitstudie:</b> Fernwärme	-	7	6 % (von 124)	14	13 % (von 109)	14	14 % (von 101)
<b>GExit (EU 27<sup>1)</sup>):</b> 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)
<b>Klimapfade 2.0:</b> Fernwärme	-	5	3 % (von 157)	10	6 % (von 163)	-	-
Prozesswärme <sup>2)</sup>	-	36	8 % (von 444)	15	4 % (von 366)	-	-
<b>KNDE:</b> Fernwärme	2	5	3 % (von 149)	12	7% (von 164)	10	7% (von 153)

<sup>1)</sup> GExit-Studie: *Ambient and waste heat* gemeinsam ausgewiesen

<sup>2)</sup> Klimapfade 2.0: *Fernwärme und Abwärme* gemeinsam ausgewiesen

- › Insgesamt nur **wenige (detaillierte) Aussagen** zur Abwärme, quantitativ teilweise unscharf (z.B. subsummiert unter „Wärmepumpe“)
- › Kontext der Nennung i.d.R. **Energiesektor (Senke)**, nicht Industriesektor (Quelle), eine Studie (SCI4Climate.NRW) nennt Kontext Nutzung von Abwärme „*die energieeffizienten CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der Zementindustrie (Aminwäsche)*“
- › I.d.R. **keine Aussagen** über **Impact der Industrie-Transformation** (Dekarbonisierung) auf zukünftige Abwärmepotenziale

## Mögliche Auswirkungen der Industriedekarbonisierung auf die Nutzung industrieller Abwärme - eine erste qualitative Einordnung

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

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

Quelle: Wuppertal Institut

# Handlungsvorschläge für Abwärmenutzung

## WI-Studie 2015 zu Treibern & Hemmnissen industrieller Abwärmenutzung in NRW

- was hat sich geändert?

	übergreifend	Wärme-Einspeisung	NT-Wärme	Innovative Technologien
<b>technisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förderung einzelbetrieblicher Untersuchungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzausbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konzepte zur Minderung der Wärmenetz-Temp. (inkl. Low-Ex)</li> <li>• Berücksichtigung Abwasser-Abwärmenutzung bei Kanalsanierungen</li> <li>• WT-Vorrüstung bei Kanalsanierungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forschungsprojekt mobiler Transport von (Latent-)Wärme</li> <li>• Weiterentwicklung ORC / Stirling / TEG in Pilotanlagen</li> <li>• Potenzialanalyse &amp; Feldtest HT-Wärmepumpen</li> </ul>
<b>wirtschaftlich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planbare energiepolitische Rahmenbedingungen</li> <li>• CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Brennstoffe (→ externe Kosten)</li> <li>• Investitionsförderung von Abwärmenutzungs-Projekten</li> <li>• Einspeisegesetz für Abwärme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bürgschaften gegen Ausfallrisiko</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förderung von NT- und Kalte-Nahwärme-Konzepten</li> <li>• Investitionskostenzuschuss für Hausanschluss / Energiezentrale / Erschließung Wärmequelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investitionsförderung für innovative branchenspezifische Industrie-Prozesse</li> <li>• Anschubfinanzierung für Verstromungs-Technologien</li> </ul>
<b>organisatorisch-strukturell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zentrale koordinierende Stelle auf Landesebene (Netzwerk Abwärme NRW)</li> <li>• Abwärme- bzw. Senkenkataster</li> <li>• Info-Kampagne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meldepflicht Abwärmepotenziale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Systematische Prüfung auf Eignung von Abwasser-Wärmenutzung bei Neubau &amp; (Quartiers-)Sanierung</li> <li>• Entwicklung von Dargebotskarten</li> </ul>	
<b>rechtlich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sukzessives Verbot fossiler Einzelfeuerstätten (Bsp. Dänemark)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Straffung Genehmigungsverfahren</li> <li>• Klare Regelungen zur Einspeisung / Entnahme aus Wärmenetzen</li> <li>• Wärmeeinspeise bzw. -aufnahmepflicht</li> <li>• FW-Anschlusszwang</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einspeisevergütung für Abwärmeverstromung im KWKG</li> <li>• Verbindliche Abwärmenutzung (Verstromung)</li> </ul>

# Handlungsvorschläge für Abwärmenutzung

WI-Studie 2015 zu Treibern & Hemmnissen industrieller Abwärmenutzung in NRW

- was hat sich geändert?

umgesetzt  
teilweise umgesetzt  
offene Baustelle



	übergreifend	Wärme-Einspeisung	NT-Wärme	Innovative Technologien
<b>technisch</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Förderung einzelbetrieblicher Untersuchungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Netzausbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konzepte zur Minderung der Wärmenetz-Temp. (inkl. Low-Ex)</li> <li>Berücksichtigung Abwasser-Abwärmenutzung bei Kanalsanierungen</li> <li>WT-Vorrüstung bei Kanalsanierungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forschungsprojekt mobiler Transport von (Latent-)Wärme</li> <li>Weiterentwicklung ORC / Stirling / TEG in Pilotanlagen</li> <li>Potenzialanalyse &amp; Feldtest HT-Wärmepumpen</li> </ul>
<b>wirtschaftlich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planbare energiepolitische Rahmenbedingungen</li> <li>CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Brennstoffe (→ externe Kosten) -&gt; ETS &amp; BEH</li> <li>Investitionsförderung von Abwärmenutzungs-Projekten</li> <li>Einspeisegesetz für Abwärme -&gt; in EnEFG (Rechenzentren)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bürgschaften gegen Ausfallrisiko</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Förderung von NT- und Kalte-Nahwärme-Konzepten</li> <li>Investitionskostenzuschuss für Hausanschluss / Energiezentrale / Erschließung Wärmequelle -&gt; BEW &amp; BEG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investitionsförderung für innovative branchenspezifische Industrie-Prozesse</li> <li>Anschubfinanzierung für Verstromungs-Technologien</li> </ul>
<b>organisatorisch -strukturell</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zentrale koordinierende Stelle auf Landesebene (Netzwerk Abwärme NRW)</li> <li>Abwärme- bzw. Senkenkataster -&gt; LANUV Wärmekataster</li> <li>Info-Kampagne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Meldepflicht Abwärmepotenziale -&gt; Neue Plattform im EnEFG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Systematische Prüfung auf Eignung von Abwasser-Wärmenutzung bei Neubau &amp; (Quartiers-)Sanierung</li> <li>Entwicklung von Dargebotskarten</li> </ul>	
<b>rechtlich</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sukzessives Verbot fossiler Einzelfeuerstätten (Bsp. Dänemark) -&gt; GEG 2024</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Straffung Genehmigungsverfahren</li> <li>Klare Regelungen zur Einspeisung / Entnahme aus Wärmenetzen</li> <li>Wärmeeinspeise bzw. -aufnahmepflicht</li> <li>FW-Anschlusszwang</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Einspeisevergütung für Abwärmeverstromung im KWKG</li> <li>Verbindliche Abwärmenutzung (Verstromung)</li> </ul>

- › **Große** theoretische und technische **Abwärmepotenziale** vorhanden
- › Abwärme - neben erneuerbaren Wärmequellen - ein zentraler Baustein sowohl für **kommunale Wärmewende** als auch für **klimaneutrale industrielle Prozesswärmeversorgung**
- › Potenziale können aber nur gehoben werden, wenn **alle Akteure** (Industrie, Kommunen, Politik, EVU, Wärmenetzbetreiber...) **gemeinsam** an einem Strang ziehen
- › Viele, seit langem bekannte **Hemmnisse** (Ausfallrisiko, hohe Erwartungen an ROI-Zeiten, Unkenntnis über tatsächliche Abwärmepotenziale vor Ort, Mangel an Kompetenz und Personal...) und **Vorschläge zur Abhilfe** (Ausfallbürgschaft, Garantiefond, Push- und Pull-Maßnahmen...) bleiben relevant
- › Technische Optionen & Hemmnisse sind i.d.R. schon bekannt, aber **Druck jetzt höher** (Kohleausstieg, THG-neutrale Industrie, Verpflichtung Wärmenetze 30 % bis 2030 (80 % bis 2040) klimaneutral, CO<sub>2</sub>-Bepreisung etc.)

- › **Forschungsbedarf** zu Auswirkungen der **industriellen Transformation** (inkl. Renewables Pull) auf Abwärmenutzungspotenziale
- › **Niedertemperatur-Potenziale** und deren Nutzung mit (HT-)Wärmepumpen können perspektivisch eine wesentliche Rolle spielen
- › Zusätzlich Erweiterung der Potenziale, wenn es (mittel- bis langfristig) gelingt, das Temperaturniveau von Wärmenetzen weiter abzusenken (**LowEx-Konzepte**)
- › **Ausbau Wärmenetze** ist Enabler
  - > Ausbau steht und fällt auch mit dessen **Akzeptanz**
  - > Transparente Preisgestaltung und **Schutz vor Monopolmissbrauch** essentiell!  
(Good Practice aus DK: genossenschaftlicher Betrieb von Wärmenetzen, Partizipation und finanzielle Beteiligung der angeschlossenen Haushalte an der eigenen Wärmeversorgung)

*Dietmar Schüwer | [dietmar.schuewer@wupperinst.org](mailto:dietmar.schuewer@wupperinst.org)*

**Vielen Dank für  
Ihre Aufmerksamkeit**

---

Weitere Informationen:

[www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org)



**Agora Energiewende (2023):** Breaking free from fossil gas. A new path to a climate-neutral Europe. Unter: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/breaking-free-from-fossil-gas-1/>

**BCG (2021):** Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gutachten für den BDI. Unter: <https://bdi.eu/artikel/news/klimapfade-2-0-deutschland-braucht-einen-klima-aufbruch>

**dena (2021):** dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Alle\\_Gutachten\\_dena-Leitsudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Alle_Gutachten_dena-Leitsudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf)

**Kopernikus-Projekt Ariadne (2021):** Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>

**Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021):** Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Unter: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_04\\_KNDE45/A-EW\\_231\\_KNDE2045\\_Langfassung\\_DE\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf)

**Ragwitz M./ Weidlich, A. et al. (2023):** Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2023.

**SCI4climate.NRW (2023):** Treibhausgasneutralität bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut & Institut der deutschen Wirtschaft. Unter: [https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse\\_SCI4climate.NRW/Szenarien/2023/treibhausgasneutralitaet-in-deutschland-bis-2045-szenario-cr-sci4climate.nrw.pdf](https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_SCI4climate.NRW/Szenarien/2023/treibhausgasneutralitaet-in-deutschland-bis-2045-szenario-cr-sci4climate.nrw.pdf)

**Schüwer und Holtz (2023):** Bereitstellung klimaneutraler Prozesswärme für die Industrie: Ein 4-Stufen-Modell. Energiewirtschaftliche Tagesfragen et 10/2023, S. 37 ff. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-84165>