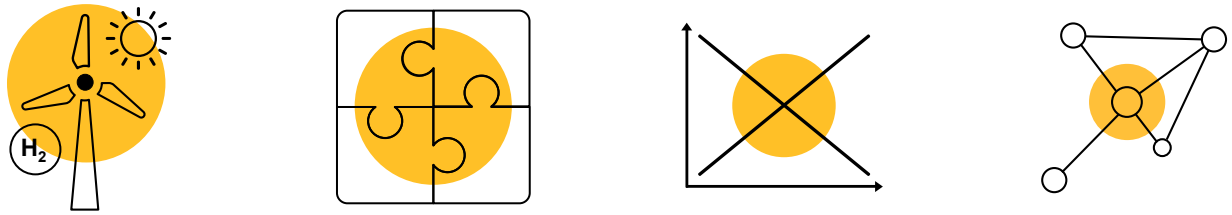
EWI-Analyse

10.10.2025

Abwärmenutzung in Fernwärmenetzen

Modellgestützte Analyse des Systemwerts exemplarischer Abwärmeprofile

Gefördert durch: Förderinitiative Wärmewende der Gesellschaft zur Förderung des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln e.V.



© EWI 2025

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (EWI)

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

+49 (0)221 650 853-60

https://www.ewi.uni-koeln.de

Verfasst von:

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Klaas (Projektleitung)
Maximilian Walde
Tobias Leibfritz

Bitte zitieren als:

EWI (2025): Abwärmenutzung in Fernwärmenetzen - Modellgestützte Analyse des Systemwerts exemplarischer Abwärmeprofile

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

1. Hintergrund und Motivation
2. Methodik und Szenariorahmen
3. Ergebnisse
4. Gegenüberstellung zu Kosten der Abwärmenutzung

Anhang

Zusammenfassung (1/3): Motivation und Methodik

Motivation

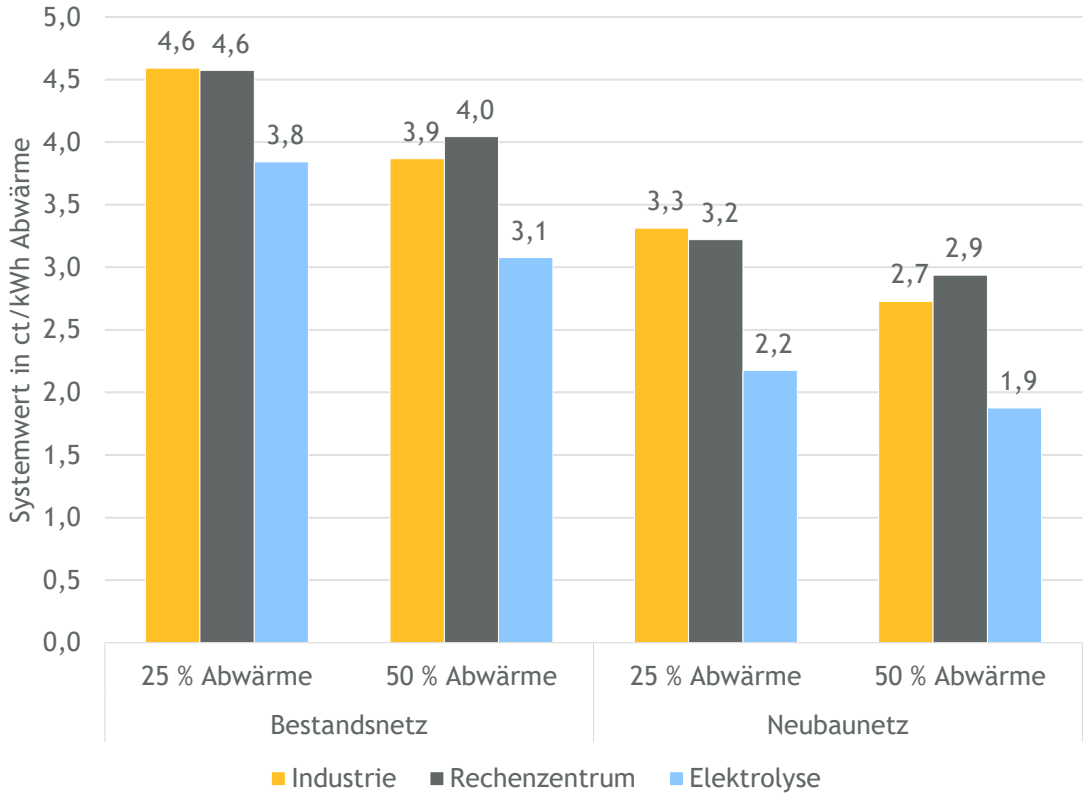
- Um die Klimaziele zu erreichen, muss der Gebäudesektor seine Emissionen stark reduzieren. Die Integration von Abwärme in Fernwärmenetzen kann dabei zur Reduktion der Gesamtemissionen beitragen.
- In Deutschland sind in 2025 Abwärmepotenziale von rund 245 TWh/a auf der Plattform für Abwärme (PfA) registriert. Im Jahr 2024 wurden lediglich 9,8 TWh Abwärme genutzt. Das entspricht 4 % des gemeldeten Potenzials. Mit neuen Abwärmequellen wie Rechenzentren und Elektrolyseuren könnte das Abwärmepotenzial signifikant steigen.
- Im Jahr 2024 traten mehrere Gesetze in Kraft, die die Nutzung von Abwärme begünstigen oder verpflichtend machen. Dazu gehört das Wärmeplanungsgesetz (WPG), das Wärmenetzbetreiber zu vorgegebenen Anteilen erneuerbarer Wärme verpflichtet. Unvermeidbare Abwärme kann zur Deckung des regulatorisch vorgeschriebenen erneuerbaren Wärmeanteils beitragen.
- Diese Analyse untersucht die Wirtschaftlichkeit von Abwärmenutzung in Fernwärmenetzen unter dem aktuellen regulatorischen Rahmen. Dies soll eine Einschätzung der potenzieller Abwärmeprojekte fördern.

Methodik

- Diese Analyse ermittelt den Systemwert der Abwärme und stellt diesen Systemwert den Kosten zur Erschließung der Abwärmequellen gegenüber, um mit der daraus resultierenden Marge die Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzung zu bewerten.
- Mit dem EWI-Fernwärmemodell DINO werden Investition und Betrieb von Wärmeerzeugern eines Fernwärmesystems optimiert; Ziel ist die Minimierung der Gesamtsystemkosten. Der Systemwert der Abwärme ergibt sich aus der Differenz der Systemkosten zwischen einem Referenzfall ohne Abwärme und Musterfällen mit kostenloser Abwärme.
- Zur Betrachtung der Abwärme werden drei exemplarische Profile modelliert: Ein *Industrie*-Profil, das volatil und nur werktags verfügbar ist; ein *Elektrolyse*-Profil, das ebenfalls volatil ist und mit niedrigen Strompreisen korreliert; sowie ein *Rechenzentrum*-Profil, das fast kontinuierlich Abwärme liefert.
- Es werden zwei Wärmenetztypen betrachtet: ein Bestandsnetz, welches das Fernwärmenetz einer Großstadt abbildet, sowie ein kleineres Neubaunetz. Die Modellierung erfolgt in stündlicher Auflösung für die Jahre 2025, 2030, 2035, 2040 und 2045.

Zusammenfassung (2/3): Systemwert der Abwärmenutzung

Durchschnittlicher Systemwert[1] der Abwärmenutzung



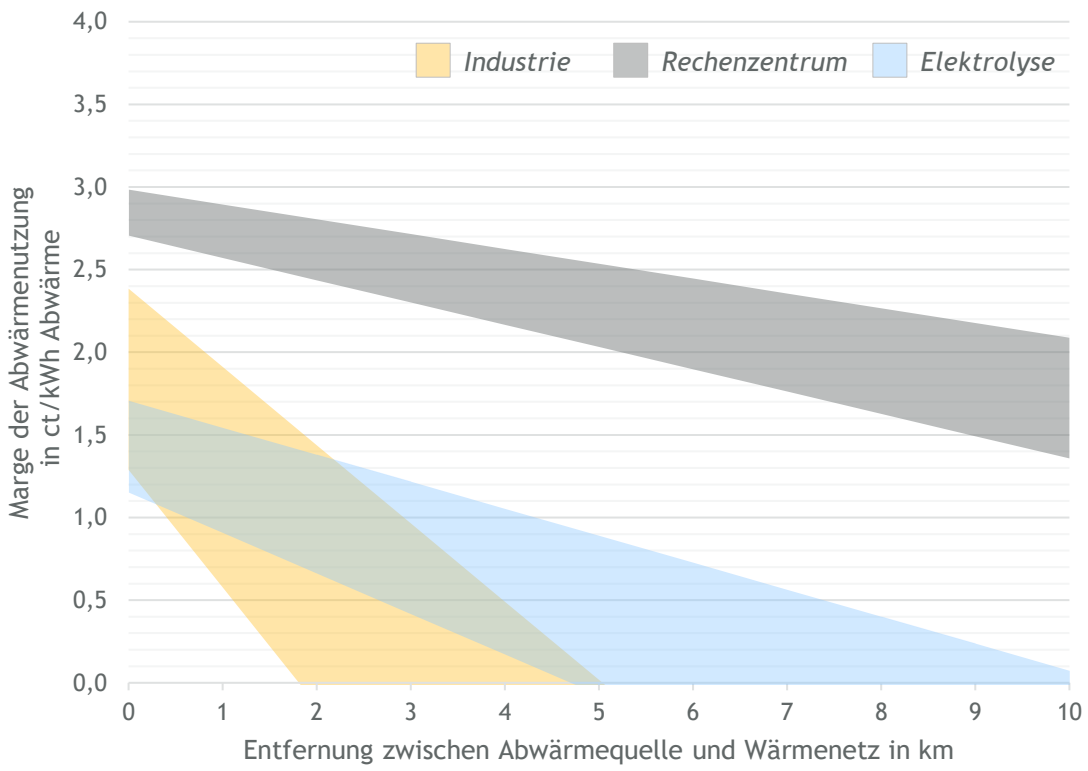
1: Spezifischer Systemwert (Differenz der Systemkosten) bezogen auf die Abwärmemenge

Fazit

- Der ermittelte Systemwert von Abwärme variiert zwischen 1,9 und 4,6 ct/kWh erzeugter Abwärme. Dabei ist der Systemwert im Bestandsnetz höher als im Neubaunetz. Da im Neubaunetz ein Großteil der Wärme durch Wärmepumpen mit hoher Effizienz erzeugt wird, verdrängt Abwärme dort günstigere Erzeugung. Im Bestandsnetz ersetzt Abwärme dagegen häufiger teurere Erzeugung, was zu einem höheren Systemwert führt.
- Mit steigendem Abwärmeanteil sinkt der Systemwert, da zunehmend kostengünstige Erzeugung verdrängt wird.
- Abwärme aus *Rechenzentrum* und *Industrie* erzielt die höchsten Systemwerte, auch wenn diese beiden Profile unterschiedliche Charakteristika aufweisen. Während das Abwärmeprofil *Rechenzentrum* kontinuierlich verfügbar ist, steht das Abwärmeprofil *Industrie* nur sehr fluktuierend zur Verfügung. Die Systemwerte zeigen, dass bei einem steigenden Abwärmeanteil die Grundlastverfügbarkeit des *Rechenzentrum*-Profils wertvoller wird.
- Demgegenüber weist Abwärme aus *Elektrolyse* einen niedrigeren Systemwert auf. Grund dafür ist die Verfügbarkeit in Zeiten niedriger Strompreise, in denen Wärmepumpen ohnehin günstige Wärme erzeugen können.

Zusammenfassung (3/3): Gegenüberstellung zu Kosten der Abwärmenutzung

Marge[1] der Abwärmenutzung im Musterfall *Neubaunetz* | *25 %*



Fazit

- Dem Systemwert der Abwärme stehen die Kosten für die Einbindung der Abwärme gegenüber. Dafür werden Komponenten wie Wärmetauscher, Pumpen und Leitungen benötigt, die anhand der Abwärmeleistung dimensioniert werden.
- Die Leitungskosten steigen zusätzlich mit steigender Entfernung. Außerdem muss eine zusätzliche Wärmepumpe zur Nutzung der Abwärme installiert werden, wenn die Temperatur der Abwärmequelle unter der Vorlauftemperatur des Wärmenetzes liegt.
- Das Abwärmeprofil *Rechenzentrum* weist einen hohen Systemwert und eine hohe Auslastung der Komponenten auf. Damit ergibt sich im Neubaunetz die höchste Marge (Differenz aus Systemwert und Kosten für die Einbindung). Die Abwärmeprofile *Industrie* und *Elektrolyse* sind aufgrund geringerer Auslastung sensibler hinsichtlich der Entfernung der Wärmequelle zum Netz.
- Im Bestandsnetz zeigt das Abwärmeprofil *Industrie* die höchste Marge, da aufgrund hoher Abwärmetemperaturen keine zusätzliche Wärmepumpe notwendig ist.

1: Die Marge der Abwärmenutzung ist definiert als die Differenz des Systemwerts und den Investitions- und Betriebskosten der Abwärmenutzung. Der durch den Erzeuger verlangte Abwärmepreis wird vernachlässigt.

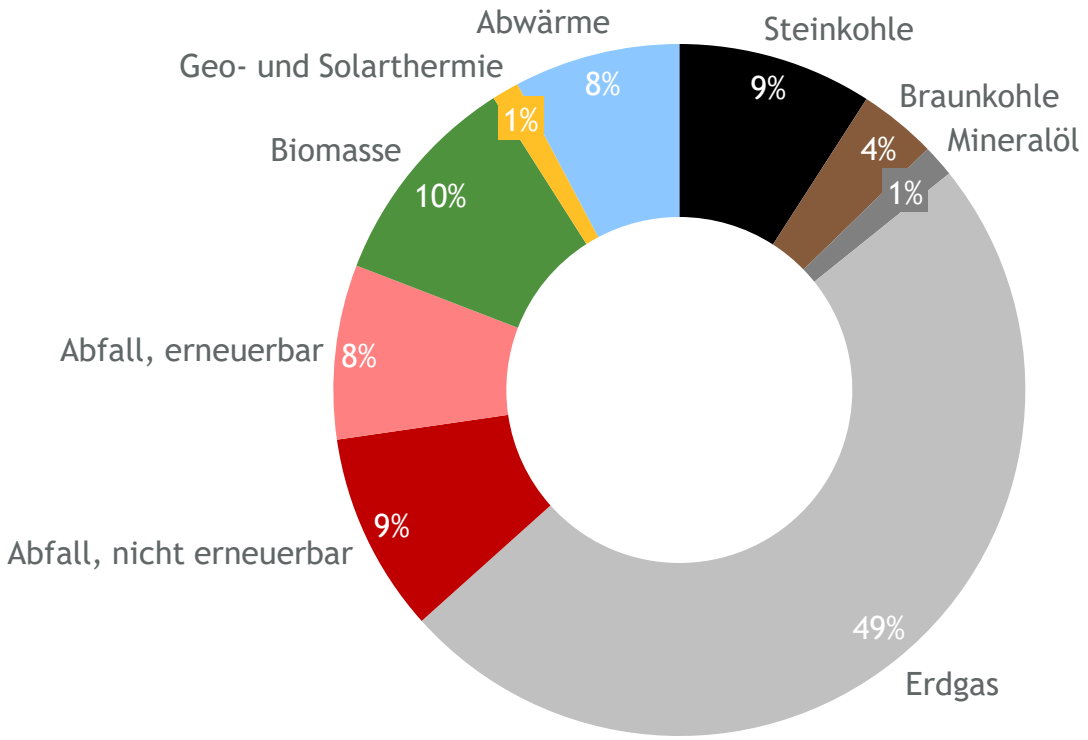
1

Hintergrund und Motivation

© EWI 2025

Die Nutzung von Abwärme kann zur Dekarbonisierung der Wärmenetze in Deutschland beitragen

Anteile Energieträger an der Nettowärmeerzeugung in Wärmenetzen im Jahr 2024[1]



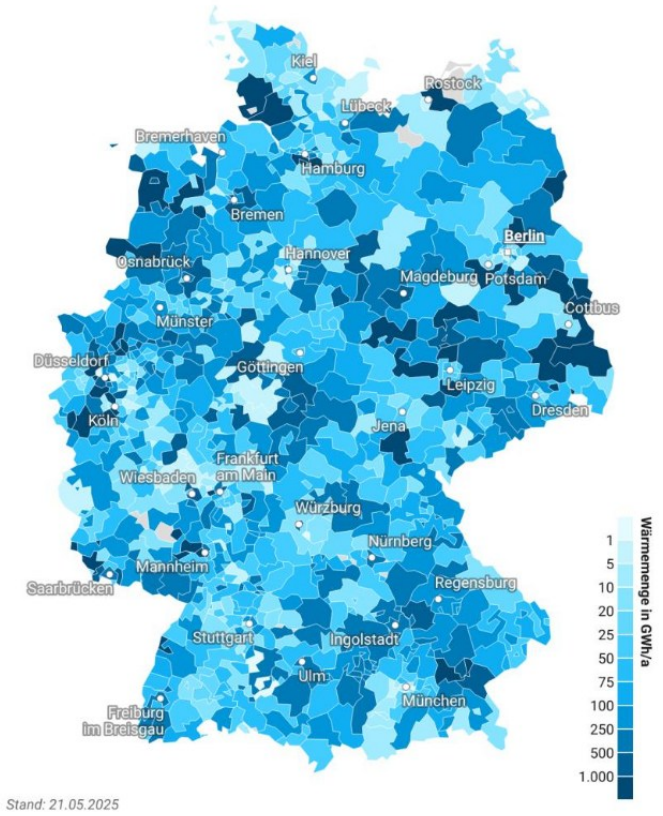
Motivation

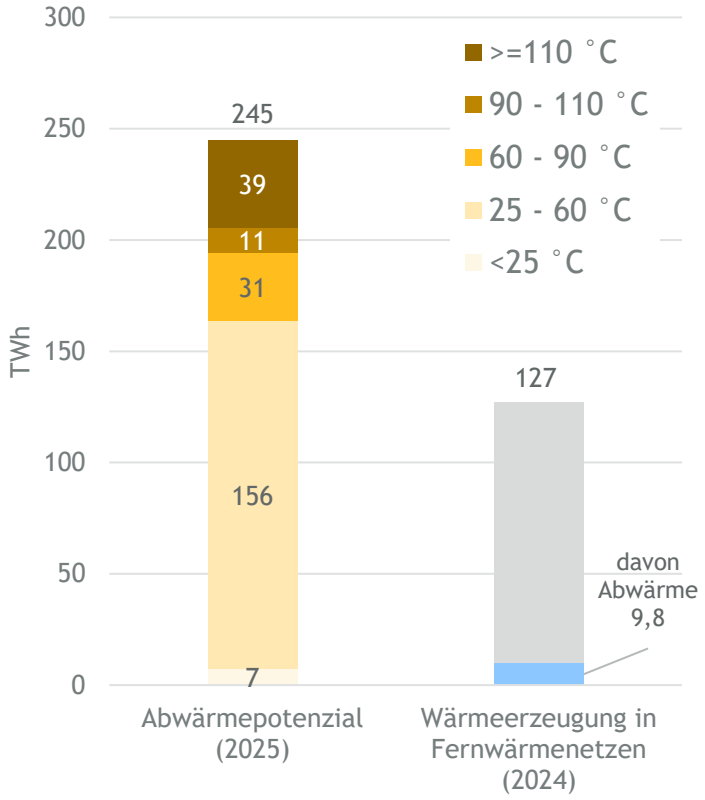
- Die Fernwärmeversorgung in Deutschland beruht zu großen Teilen auf der Nutzung nicht erneuerbarer Energieträger. So waren im Jahr 2024 von 127 TWh ca. 72 % nicht erneuerbar.[1]
- In der „Erklärung Fernwärmegipfel“[2] im Jahr 2023 wurde zusätzlich vereinbart, den Ausbau der Wärmenetze deutlich zu beschleunigen: Bis 2045 soll sich die Zahl der angeschlossenen Gebäude etwa verdreifachen, wofür mittelfristig jährlich mindestens 100.000 Gebäude neu angeschlossen werden müssen.
- Zur Dekarbonisierung der Wärmenetze müssen daher Bestandsnetze sowie Neubaunetze mit klimaneutralen Energiequellen versorgt werden. Die Integration von Abwärme kann zu dieser Dekarbonisierung der Wärmenetze beitragen.

1: BDEW (2025) | 2: BMWK (2023)

In Deutschland sind Abwärmepotenziale von fast 250 TWh/a vorhanden - nur ein Bruchteil des Potenzials wird aktuell genutzt

Abwärmepotenziale in Deutschland regional[1] und absolut[2,3]





Kommentare

- Die Plattform für Abwärme (PfA) erfasst auskunftspflichtige Daten nach §17 EnEfG zur Abwärmeverfügbarkeit. Meldepflichtig sind Unternehmen mit einem Gesamtenergieverbrauch > 2,5 GWh im Dreijahresdurchschnitt.[4]
- Im September 2025 enthält die PfA eingetragene Potenziale von 245 TWh/a bei 25.817 gemeldeten Abwärmequellen. Weitere Potenziale sind bei kleineren, nicht-meldepflichtigen Betrieben zu erwarten. In der Zukunft dürfte der Zubau von Elektrolyseuren und Rechenzentren die Potenziale weiter steigern.
- Im Jahr 2024 wurden lediglich 9,8 TWh Abwärme genutzt. Das entspricht 4 % des gemeldeten Potenzials der PfA. Es wird also nur ein Bruchteil des Potenzials genutzt.

1: BFEE (2025a) | 2: BFEE (2025b) | 3: BDEW (2025) | 4: EnEfG (2025)

Durch Inkrafttreten mehrerer Gesetze in 2024 wird die Nutzung von Abwärme interessanter, besonders für Wärmenetzbetreiber

Relevante Gesetze zur Abwärmenutzung

Abwärmeerzeuger

- Energieeffizienzgesetz

Wärmenetzbetreiber

- Wärmeplanungsgesetz
- Bundesförderung effiziente Wärmenetze
- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Abwärmenutzer

- Gebäudeenergiegesetz

Kommentare

- Die Nutzung von Abwärme wird seit 2024 über das Energieeffizienzgesetz (EnEfG), das Wärmeplanungsgesetz (WPG) und das Gebäudeenergiegesetz (GEG) an verschiedenen Stellen in der Wertschöpfungskette geregelt. Zusätzlich wird die Nutzung von Abwärme über die Bundesförderung effiziente Wärmenetze (BEW) und das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) gefördert.
- Im EnEfG[1] werden Unternehmen zur Erfassung und Meldung von Abwärmepotenzialen verpflichtet. Zudem werden Betreiber von Rechenzentren dazu verpflichtet, mindestens 10 % der anfallenden Abwärme wiederzuverwenden, wodurch Anreize zur Vermarktung von Abwärme steigen.
- Im WPG[2] werden den Wärmenetzbetreibern Vorgaben zu Anteilen erneuerbarer Wärme im Versorgungsmix gemacht: In Bestandsnetzen ab 2030 30 %, ab 2040 80 % und ab 2045 100 %. In Neubaunetzen ab 2025 65 % und ab 2045 100 %. Die Nutzung von „unvermeidbarer Abwärme“ wird dabei auf den Anteil erneuerbarer Abwärme angerechnet. Daraus besteht für Wärmenetzbetreiber seit 2024 ein neuer Anreiz zur Nutzung von Abwärme.
- In der BEW[3] wird die Einbindung von Abwärme als direkte Wärmequelle, im KWKG[4] die Nutzung von Abwärme zur Erzeugung von Wärme und Strom sowie die Speicherung von Abwärme für Wärmenetzbetreiber gefördert.
- Im GEG[5] müssen Endverbrauchende ab 2024 bei neu installierten Heizungssystemen einen Anteil von 65 % erneuerbarer Wärme vorweisen. Auch hier gilt „unvermeidbare Abwärme“ als erneuerbare Wärme.

1: § 8, 11, 16 & 17 EnEfG | 2: § 29 & 30 WPG | 3: Abschnitt 4 & 7 BEW | 4: § 1, 6, 18, & 22 KWKG | 5: § 71 GEG

In dieser Analyse soll die Wirtschaftlichkeit von Abwärme unter dem aktuellen regulatorischen Rahmen untersucht werden

1. Welchen Systemwert hat die Integration exemplarischer Abwärmeprofile in Wärmenetzen mit verschiedenen Charakteristika?

2. Unter Berücksichtigung des Systemwerts und der Kosten der Abwärmenutzung, in welchen Fällen ist Abwärme wirtschaftlich nutzbar?

Das EWI hat bereits eine Analyse zu regulatorischen, technischen und ökonomischen Aspekten zur Integration von Abwärme erstellt

EWI-Analyse „Integration von Abwärme“[1] aus dem Jahr 2024

Kommentare

- Im Januar 2024 hat das EWI die Analyse „Integration von Abwärme“ veröffentlicht.
- In der Analyse werden folgende Themen qualitativ analysiert:
  - Definition von Abwärme
  - Entwicklung und aktueller Stand der Regulatorik zu Abwärme
  - Relevante technische und ökonomische Kriterien bei der Nutzung von Abwärme
- Seit Veröffentlichung wurden keine signifikanten Änderungen der Regulatorik vorgenommen.
- Die Datenbasis der PfA erlaubt nun die Ergänzung einer quantitativen modellbasierten Analyse.

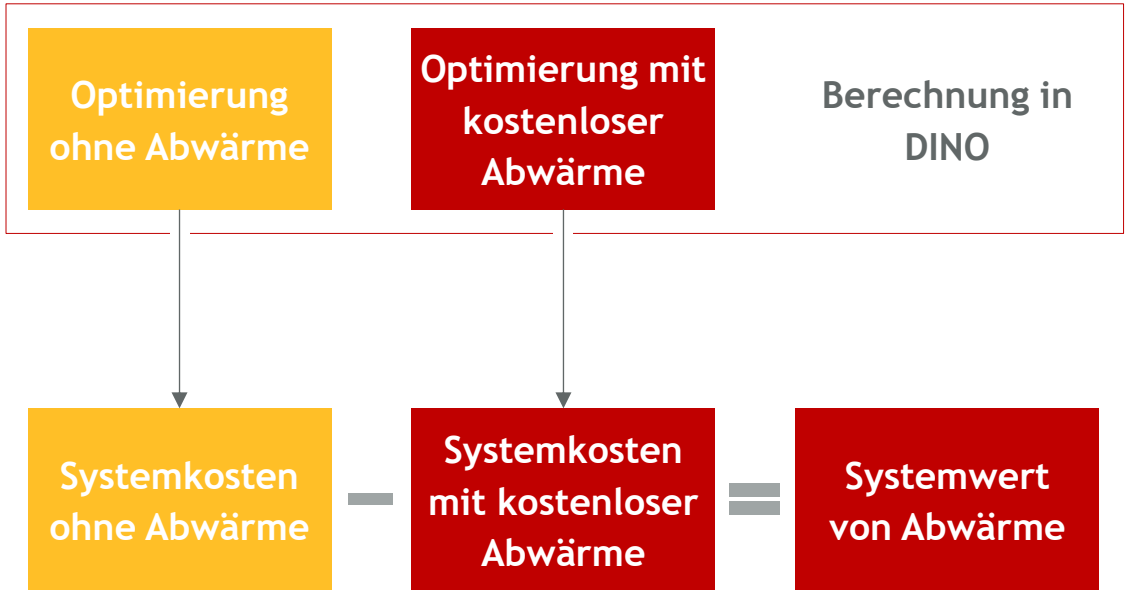
1: EWI (2024)

2

Methodik und Szenariorahmen

Der Systemwert von Abwärme wird durch die Differenz in den Systemkosten ohne und mit kostenloser Abwärme bestimmt

Berechnung des Systemwerts von Abwärme mit EWI-Modell DINO



Kommentare

- Der Systemwert der Abwärme entspricht der Kosteneinsparung durch Abwärmenutzung im Fernwärmenetz ohne Berücksichtigung der Kosten für die Abwärmenutzung.
- Die Kosteneinsparung lässt sich mit dem EWI-Fernwärmemodell DINO berechnen. DINO minimiert die Systemkosten der Fernwärmeversorgung, indem es die optimalen Investitions- und Betriebsentscheidungen für ein vorgegebenes Fernwärmenetz trifft.
- Mit DINO wird zuerst ein Basisfall ohne die Nutzung von Abwärme optimiert. Dann werden dem Modell in weiteren Musterfällen kostenlose Abwärmeprofile zur Verfügung gestellt.
- Im Anschluss ergibt sich der Systemwert der Abwärme aus der Differenz der Systemkosten des Basisfalls und jeweils eines Abwärmefalls. Die absolute Kostendifferenz wird auf eine kWh bereitgestellter Abwärme bezogen.
- Zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Abwärmeprofile wird die verfügbare Wärmemenge über alle betrachteten Quellen hinweg konstant gehalten.

DINO optimiert Investitions- und Betriebsentscheidungen verschiedener Erzeuger für vorgegebene Bedarfsprofile

Schematische Darstellung von DINO (District heating INvestment Optimization)

Musterfälle

- Wärmenachfrage
- Vorlauftemperatur
- Verluste
- Abwärmeprofile
- Ggf. Bestandsinfrastruktur

Szenariorahmen

- Stündliche Bedarfszeitreihen
- Spez. Investitions- und Betriebskosten
- Strom- und Brennstoffpreise
- Regulatorische und betriebliche Vorgaben

Investitions- und Betriebs-optimierung

Outputs

- Investition in und Dimensionierung von Erzeugern und Speichern
- Betriebsprofile
- Strombezug und -verkauf
- Systemkosten
- Erneuerbarer Anteil und CO_2-Emissionen

Kommentare

- Die wichtigsten Outputs des DINO-Modells sind Systemkosten sowie Investitions- und Betriebsentscheidungen.
- Das Wärmeverbrauchsprofil der Wärmenetze wird als exogener Input vorgegeben. Technische Details zu Hydraulik und Temperatur werden vernachlässigt.
- Die angenommene Vorlauftemperatur dient zur Berechnung der Effizienzen der Wärmepumpen. Verluste werden pauschal berechnet.
- Der Szenariorahmen steht übergreifend fest und legt Kostendaten sowie einzuhaltenden Vorgaben fest.
- Die Modellierung erfolgt in stündlicher Auflösung und betrachtet fünfjährige Stützjahre von 2025 bis 2045.

In der Modellierung werden aktuelle regulatorische und technische Rahmenbedingungen angenommen

Zugelassene Technologien

- In der Modellierung wird der Betrieb von Erzeugungsanlagen erlaubt, die üblicherweise in Wärmenetzen zur Verfügung stehen. Konkret sind folgende Technologien verfügbar:
  - Gas-, Wasserstoff- und Biomasse-BHKW
  - Gas-, Wasserstoff-, Biomasse- und Elektrokessel
  - Großwärmepumpe
  - Wärmespeicher
- Der Bau neuer Anlagen ist ab 2030 möglich. Der Bau von Wasserstoffanlagen ist erst ab 2035 möglich.
- Pro Technologie können von 2025 bis 2045 nur zwei Ausbaustufen durchgeführt werden, um Vorlaufzeiten und Planungszyklen von Wärmenetzbetreibern zu berücksichtigen.

Regulatorische Rahmenbedingungen

- Die betrachteten Wärmenetze unterliegen in der Modellierung den Vorgaben des WPGs[1].
- Konkret müssen Bestandsnetze daher folgende Vorgaben erfüllen:
  - Ab 2030: 30 % erneuerbare Wärme
  - Ab 2040: 80 % erneuerbare Wärme
  - Ab 2045: 100 % erneuerbare Wärme
- Für neue Wärmenetze gilt:
  - Ab 2025: 65 % erneuerbare Wärme
  - Ab 2045: 100 % erneuerbare Wärme
- Unvermeidbare Abwärme kann zur Deckung des regulatorisch vorgeschriebenen erneuerbaren Wärmeanteils beitragen.

Ersatzinfrastruktur

- Wärmenetzbetreiber sind nach AVBFernwärmeV[2] dazu verpflichtet, Wärme im vereinbarten Umfang jederzeit bereitzustellen.
- Wärmenetze werden daher unter dem N-2 Konzept[3] betrieben. Demnach muss die zur Verfügung stehende Erzeugungsleistung bei Ausfall der beiden größten Anlagen immer noch die Spitzenlast decken können. Dieses Konzept wird zur Besicherung der Wärmeversorgung angewandt, sodass auch bei unerwarteten Anlagenausfällen die Wärmeversorgung gewährleistet werden kann.
- Volatile Erzeuger, bspw. Abwärme, werden dabei nicht als zur Verfügung stehende Leistung gezählt. Für die Leistung der Abwärmequelle muss daher zusätzlich zum N-2 Konzept immer steuerbare Ersatzinfrastruktur vorhanden sein.

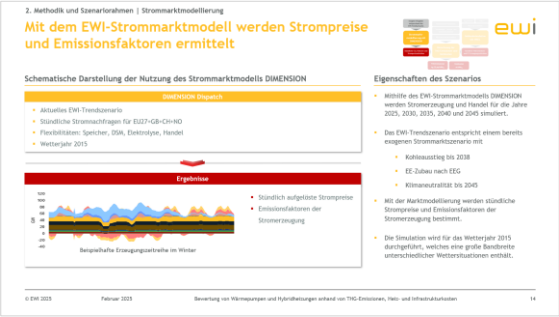
1: § 29 & 30 WPG | 2: § 5 Abs. 1 AVBFernwärmeV | 3: Quelle: Experteninterviews mit Wärmenetzbetreibern

Der Szenariorahmen aus Kostendaten, Preiszeitreihen und Bedarfszeitreihen wird aus früheren EWI-Studien übernommen

Investitions- und Betriebskostendaten

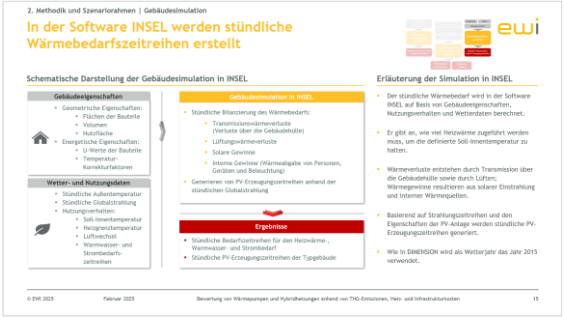
- Die Investitions- und Betriebskosten für Technologien stammen aus dem Technologiekatalog der Danish Energy Agency, Fassung Februar 2025[1].
- Es werden aktuelle Investitionskosten-projektionen für die Jahre 2030 und 2050 verwendet – Zwischenwerte werden linear interpoliert.

Preiszeitreihen



- Aus einer früheren EWI-Studie[2] werden konsistente Brennstoff- und Strompreiszeitreihen bis zum Jahr 2045 verwendet.
- Die verwendeten durchschnittlichen CO_2-Preise für den EU-ETS 1[2] und EU-ETS 2[3] wurden auf Basis dieser konsistenten Strom- und Brennstoffzeitreihen berechnet.

Stündliche Wärmebedarfszeitreihen

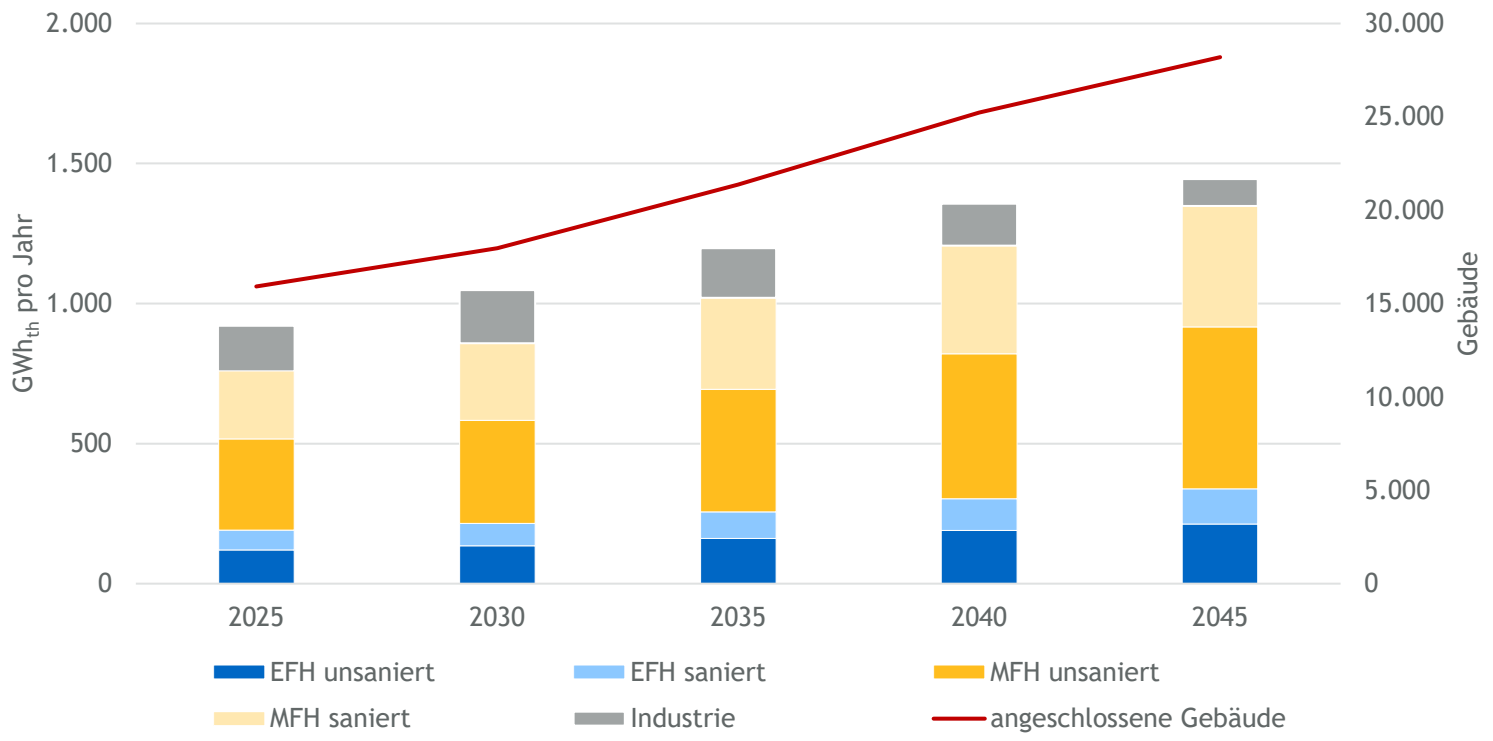


- Um die exogene Wärmenachfrage stündlich aufzulösen, werden Bedarfszeitreihen aus der gleichen EWI-Studie[2] verwendet.
- Die Bedarfszeitreihen liegen für ein Ein- und ein Mehrfamilienhaus in saniertem und unsaniertem Zustand sowie für die Industrie vor. Der Wärmebedarf der Gebäude umfasst Raumwärme und Warmwasser. Zusätzlich wird eine Industrienachfrage als Grundlast angenommen.

1: DEA (2025a) | 2: EWI (2025a) | 3: EWI (2025b)

Es werden zwei exemplarische Wärmenetztypen betrachtet – das Bestandsnetz repräsentiert das Fernwärmenetz einer Großstadt

Annahmen im Wärmenetztyp Bestandsnetz[1]



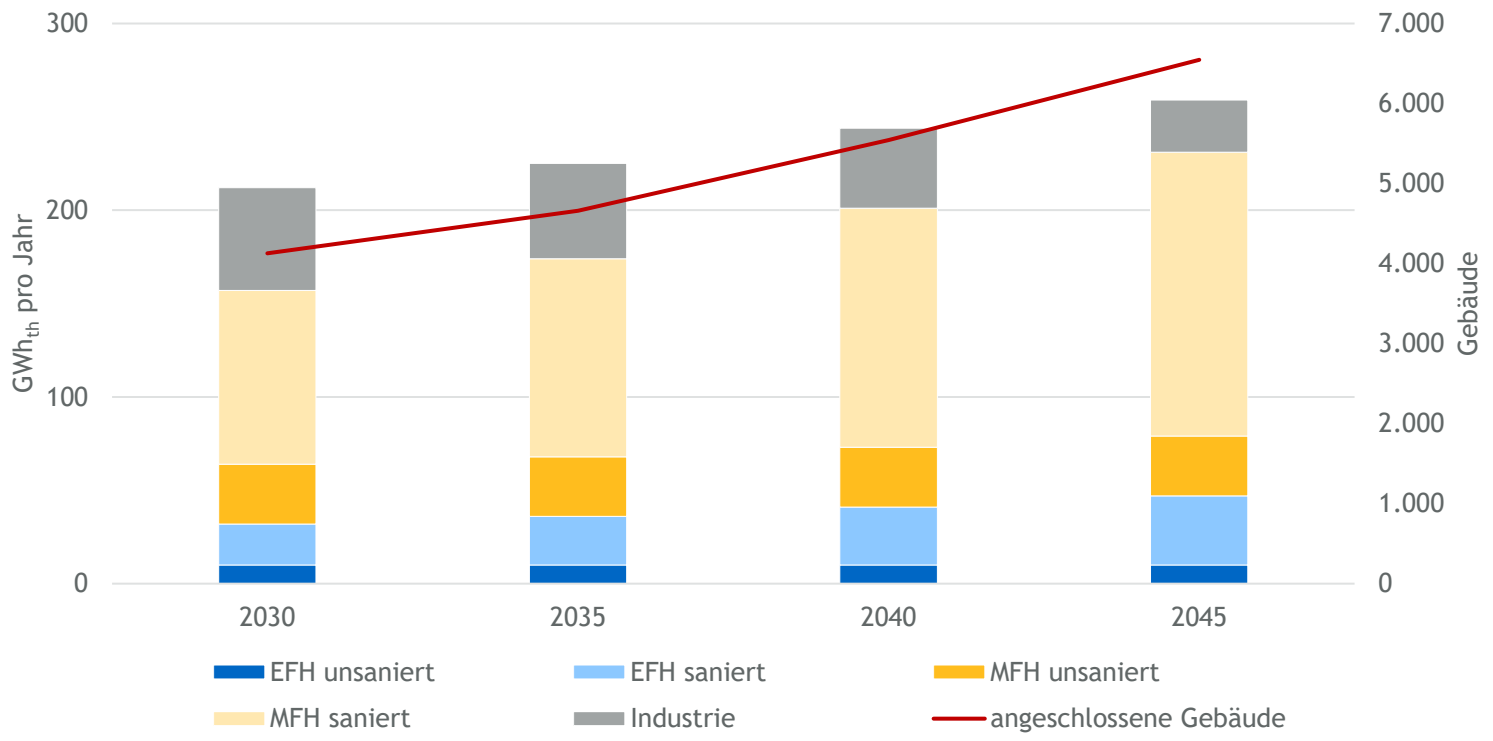
Kommentare

- Das Bestandsnetz repräsentiert ein Fernwärmenetz einer Großstadt. Es verfügt über eine typische Bestandsinfrastruktur im Jahr 2025 und verzeichnet einen deutlich steigenden Wärmebedarf aufgrund steigender Anschlusszahlen.
- Das Verhältnis zwischen sanierten und unsanierten Gebäuden sowie zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern ändert sich im Betrachtungszeitraum nur geringfügig.
- Der Wärmebedarf der Industrie ist ab 2030 rückläufig.
- Das Bestandsnetz wird bei 100 °C betrieben.
- Verluste werden zwischen Wärmeerzeugung und Wärmebedarf bilanziert und liegen bei 15 % der gesamten Wärmelast.

1: Eigene Annahmen basierend auf EWI (2024) und Pelda et al. (2021) | EFH: Einfamilienhaus | MFH: Mehrfamilienhaus

Es werden zwei exemplarische Wärmenetztypen betrachtet – das Neubaunetz ist kleiner dimensioniert und existiert erst ab 2030

Annahmen im Wärmenetztyp Neubaunetz[1]



Kommentare

- Das Neubaunetz repräsentiert ein neu aufgebautes Fernwärmenetz und ist damit kleiner dimensioniert als das Bestandsnetz.
- Es weist im Vergleich zum Bestandsnetz nur einen leicht steigenden Wärmebedarf auf, da sich neu angeschlossene Gebäude bereits in gutem energetischem Zustand befinden. Das Neubaunetz kann dadurch bei einer niedrigeren Vorlauftemperatur von 60 °C betrieben werden.
- Der Wärmebedarf der Industrie hat einen etwas höheren Anteil am Gesamtwärmebedarf als im Bestandsnetz und ist ebenfalls rückläufig ab 2030.
- Es wird angenommen, dass durch den Neubaustandard nur Verluste in Höhe von 5 % der gesamten Wärmelast auftreten.

1: Eigene Annahmen basierend auf EWI (2024) und Pelda et al. (2021) | EFH: Einfamilienhaus | MFH: Mehrfamilienhaus

Zur Einbindung von Abwärme in der Optimierung werden drei stündliche Abwärmeprofile mit verschiedenen Ansätzen erstellt

Ansätze zur Ermittlung stündlicher Abwärmeprofile

Modellierte Abwärmeprofile

Abwärmeprofil *Industrie*	Abwärmeprofil *Rechenzentrum*	Abwärmeprofil *Elektrolyse*
▪ Tatsächliches stündliches Gasverbrauchsprofil aus der Industrie ▪ Berechnung des Abwärmepotenzials aus dem Gasverbrauch	▪ Monatliches Abwärmepotenzial ▪ Durchschnittliche tägliche Verfügbarkeit ▪ Verfügbarkeit am Wochenende	▪ Erstellung eines stündlichen Abwärmeprofils auf Basis anderer Daten ▪ Elektrolyseprofil in Abhängigkeit vom Strompreisprofil
Reales Profil	Abgeleitetes Profil	Synthetisches Profil

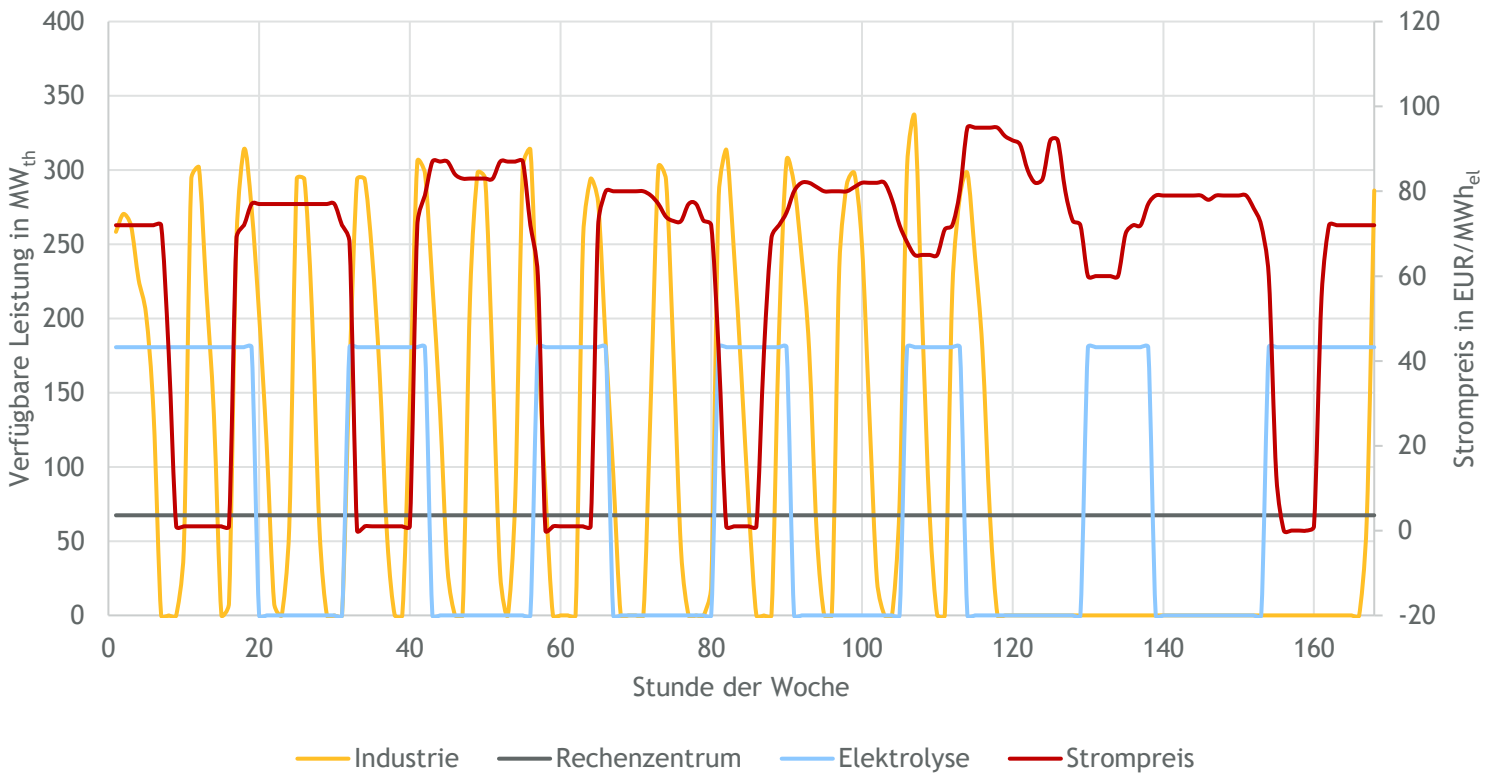
Kommentare

- Die modellierten Abwärmeprofile werden über drei verschiedene Ansätze erstellt.
- Zur Herleitung des Abwärmeprofils *Industrie* werden auf Basis realer Verbrauchsdaten eines Glasbiegeofens[1] stündliche Profile berechnet.
- Für das Abwärmeprofil *Rechenzentrum* werden aus Daten der PfA[2] stündliche Profile abgeleitet, die pro Monat konstant sind und nur in der saisonalen Verfügbarkeit leicht variieren.
- Beim Abwärmeprofil *Elektrolyse* wird ein synthetisches Profil erstellt, das eine Erzeugung bei niedrigen Strompreisen vorsieht.
- Die drei Profile *Industrie*, *Rechenzentrum* und *Elektrolyse* dienen als exemplarische Beispiele. Es kann weitere Abwärmeprofile geben, die hier nicht berücksichtigt sind.

1: Quelle: Industriekontakt über Kontaktdaten in PfA | 2: BFEE (2025b)

Die Verfügbarkeit von Abwärme variiert je nach Abwärmequelle und ist u.a. abhängig von Produktionszyklen oder dem Strompreis

Beispielhaftes Wochenprofil[1] der Abwärmequellen und des Strompreises



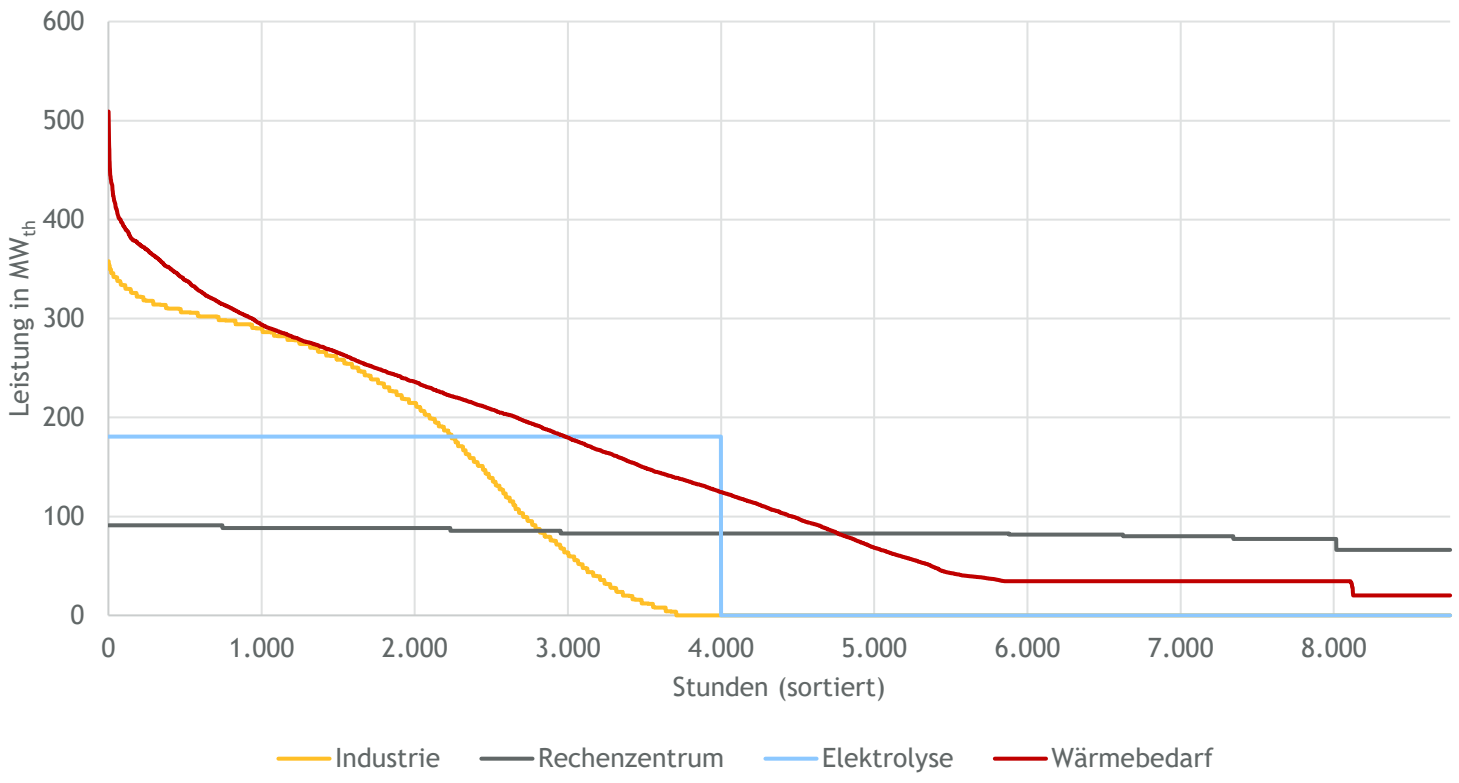
Kommentare

- Das *Industrie*-Abwärmeprofil basiert auf realen Daten eines Glasbiegeofens. Es zeigt an jedem Werktag drei Lastspitzen und liefert am Wochenende keine Abwärme. Es wird angenommen, dass die Wärme bei 100 °C zur Verfügung steht.
- Das Abwärmeprofil *Rechenzentrum* liefert in jedem Monat ein konstantes Abwärmeprofil bei einem Temperaturniveau von 60 °C.
- Es wird angenommen, dass der Elektrolyseur preisgetrieben betrieben wird und auf Volllast läuft, sobald der Strompreis unter 72 EUR/MWh fällt, andernfalls steht der Betrieb still. Das Abwärmeprofil *Elektrolyse* liefert damit Wärme bei 60 °C, wenn der Grenzstrompreis unterschritten wird.

1: Auszug aus April 2035 (Jahr ist relevant für Elektrolyseprofil aufgrund sich verändernder Strompreise) im Musterfall *Bestandsnetz* | *50 % Abwärme* (Erläuterung der Musterfälle auf S. 24)

Die untersuchten Abwärmeprofile weisen deutliche Unterschiede in der jährlichen Auslastung auf

Jahresdauerlinie der Abwärmeprofile und des Wärmebedarfs[1]



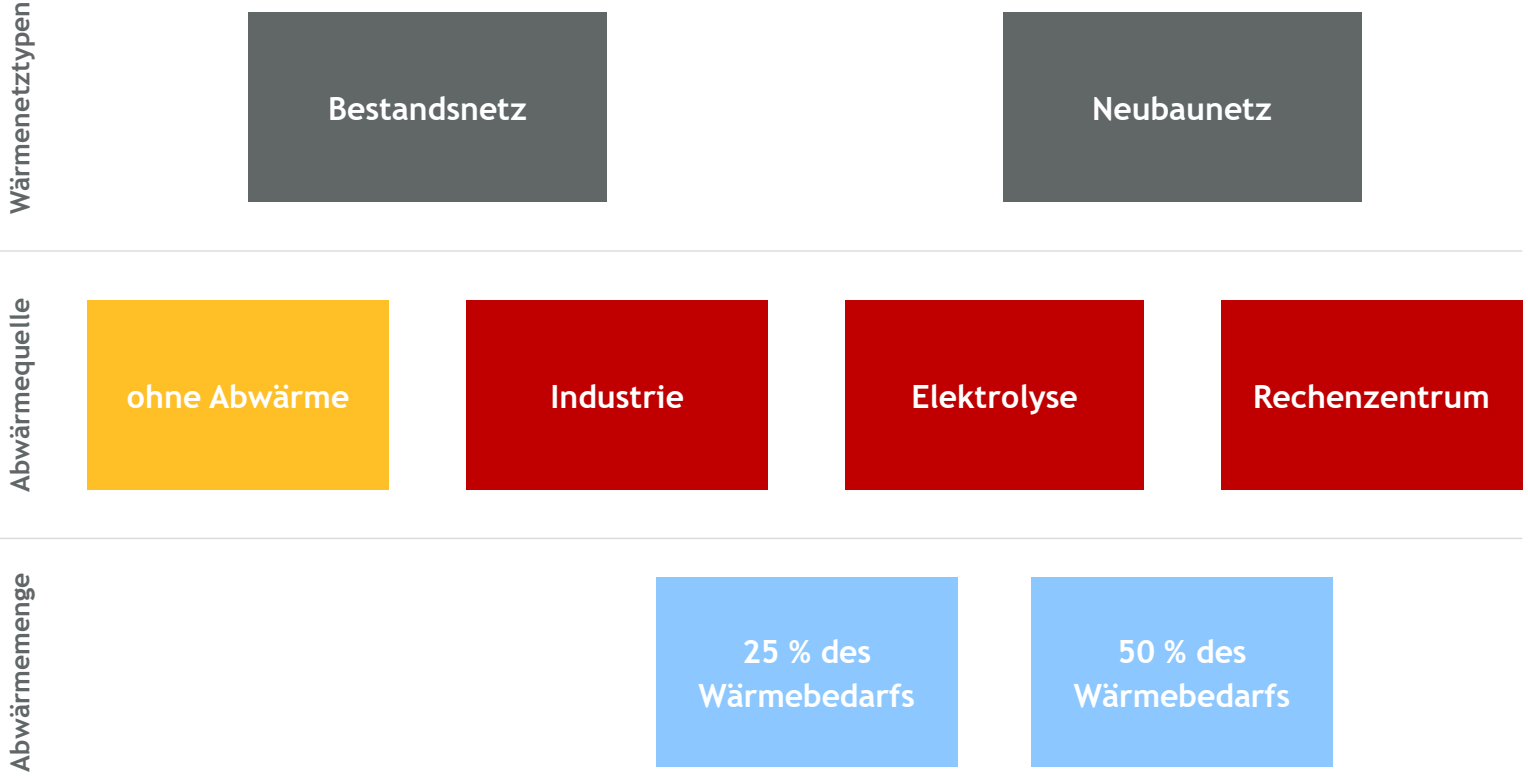
Kommentare

- Zur Vergleichbarkeit wird die jährliche Abwärmemenge konstant bei 25 % oder 50 % der gesamten Wärmenachfrage des jeweiligen Wärmenetztyps im Jahr 2045 gehalten, wodurch bei unterschiedlicher Auslastung unterschiedlich hohe Anschlussleistungen entstehen.
- Das Abwärmeprofil *Industrie* liefert in rund 43 % der Stunden Abwärme und erreicht nur 2000 Volllaststunden. Es hat die höchste Anschluss-leistung, die jedoch selten abgerufen wird.
- Das Abwärmeprofil *Rechenzentrum* ist monatlich geglättet und läuft im Dauerbetrieb. Es erzielt 7300 Volllaststunden pro Jahr.
- Das Abwärmeprofil *Elektrolyse* ist preisgetrieben. Der Schwellenstrompreis wird so festgelegt, dass der Elektrolyseur 4.000 Volllaststunden erreicht.

1: Daten für 2035 im Musterfall *Bestandsnetz* | *50 % Abwärme* (Erläuterung der Musterfälle auf S. 23) | 2: BFEE (2025b)

Drei Ebenen spannen den Rahmen an Musterfällen auf - der Fall ohne Abwärme dient als Referenz

Übersicht der in dieser Analyse betrachteten Musterfälle



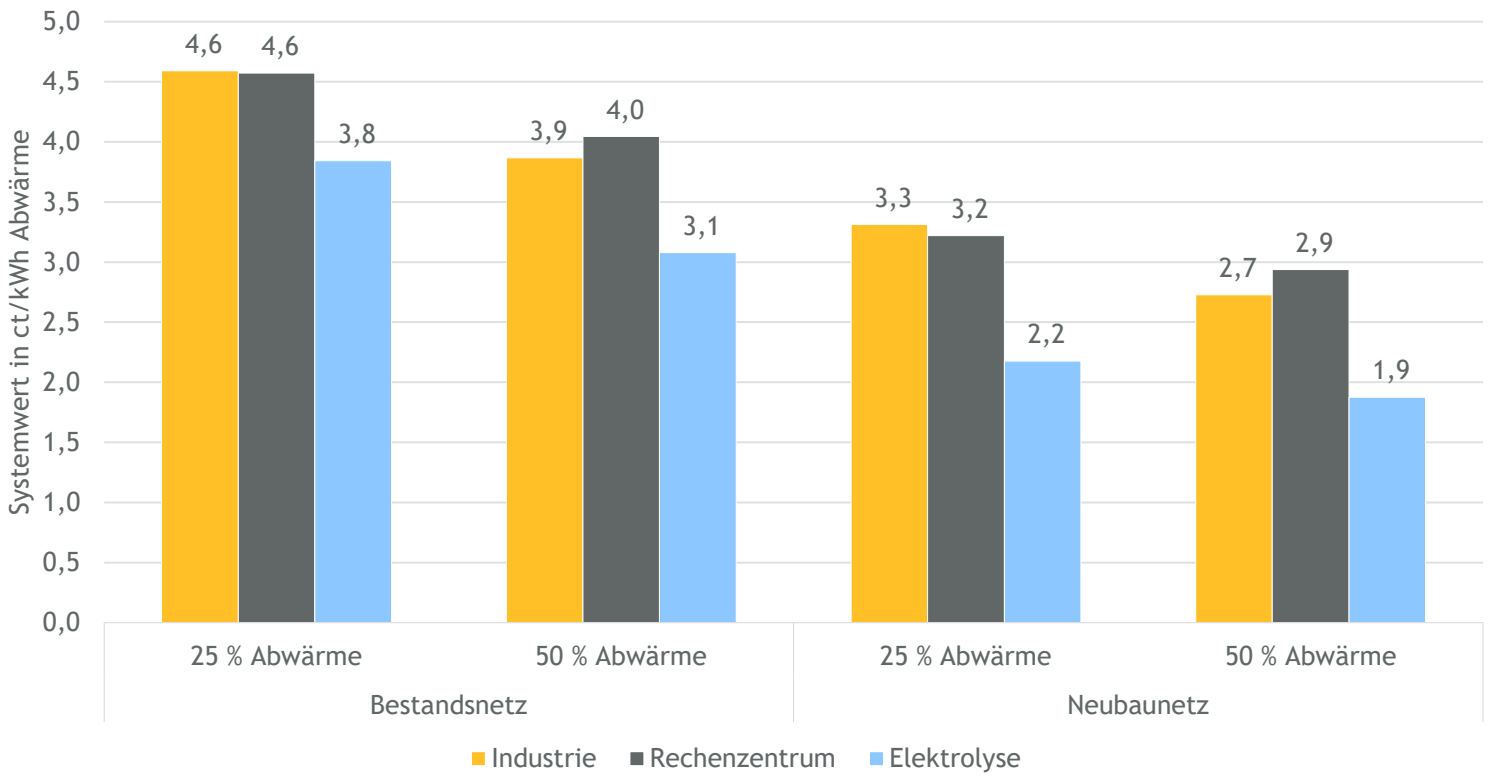
Kommentare

- Ein Musterfall entsteht aus der Kombination der drei Ebenen Wärmenetztyp, Abwärmequelle und Abwärmemenge.
- Die Ebene „Abwärmemenge“ legt den maximalen Deckungsanteil der Abwärme am Wärmebedarf des Netzes fest.
- Alle dargestellten Kombinationen sind grundsätzlich möglich; in den Ergebnissen werden allerdings nur ausgewählte Musterfälle dargestellt.
- Es werden nur Musterfälle betrachtet, bei denen dem System jeweils eine Abwärmequelle zur Verfügung steht. Die Kombination mehrerer Abwärmequellen würde den Systemwert einzelner Abwärmeoptionen reduzieren.
- Ein beispielhafter Musterfall ist: *Neubaunetz | Industrie | 50 %*

3 Ergebnisse

Kernergebnisse: Der Systemwert von Abwärme ist im Bestandsnetz höher als im Neubaunetz (1/2)

Durchschnittlicher Systemwert[1] der Abwärmenutzung im Zeitraum 2025 bis 2045 (1/2)



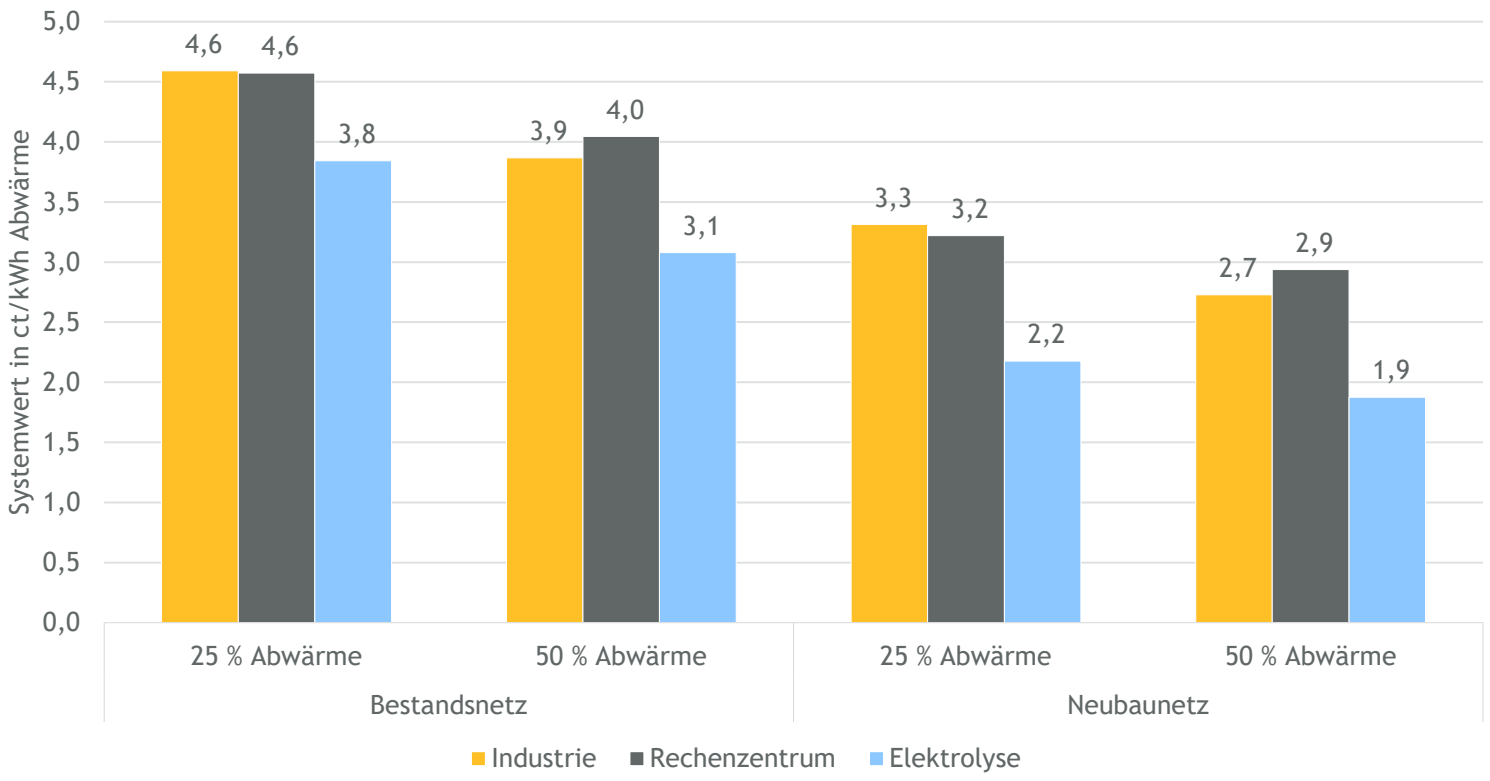
Kommentare

- Abwärme weist im Bestandsnetz einen höheren Systemwert auf als im Neubaunetz. Im Neubaunetz konkurriert die Abwärme besonders mit der Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen. Aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen ist die Erzeugung durch Wärmepumpen günstiger als im Bestandsnetz. Gleichzeitig sind im Bestandsnetz aufgrund der höheren Vorlauftemperaturen ggf. höhere Investitionen zur Nutzung der Abwärme nötig.
- Der Systemwert von Abwärme sinkt mit einem höheren Anteil der Abwärme, weil zunehmend günstigere Wärmeerzeugung verdrängt wird und Einsparungen in Hochpreisstunden seltener sind.

1: Spezifischer Systemwert (Differenz der Systemkosten) bezogen auf die Abwärmemenge

Kernergebnisse: Der Systemwert von *Elektrolyse* ist niedriger als der Systemwert von *Industrie* und *Rechenzentrum* (2/2)

Durchschnittlicher Systemwert[1] der Abwärmenutzung im Zeitraum 2025 bis 2045 (2/2)



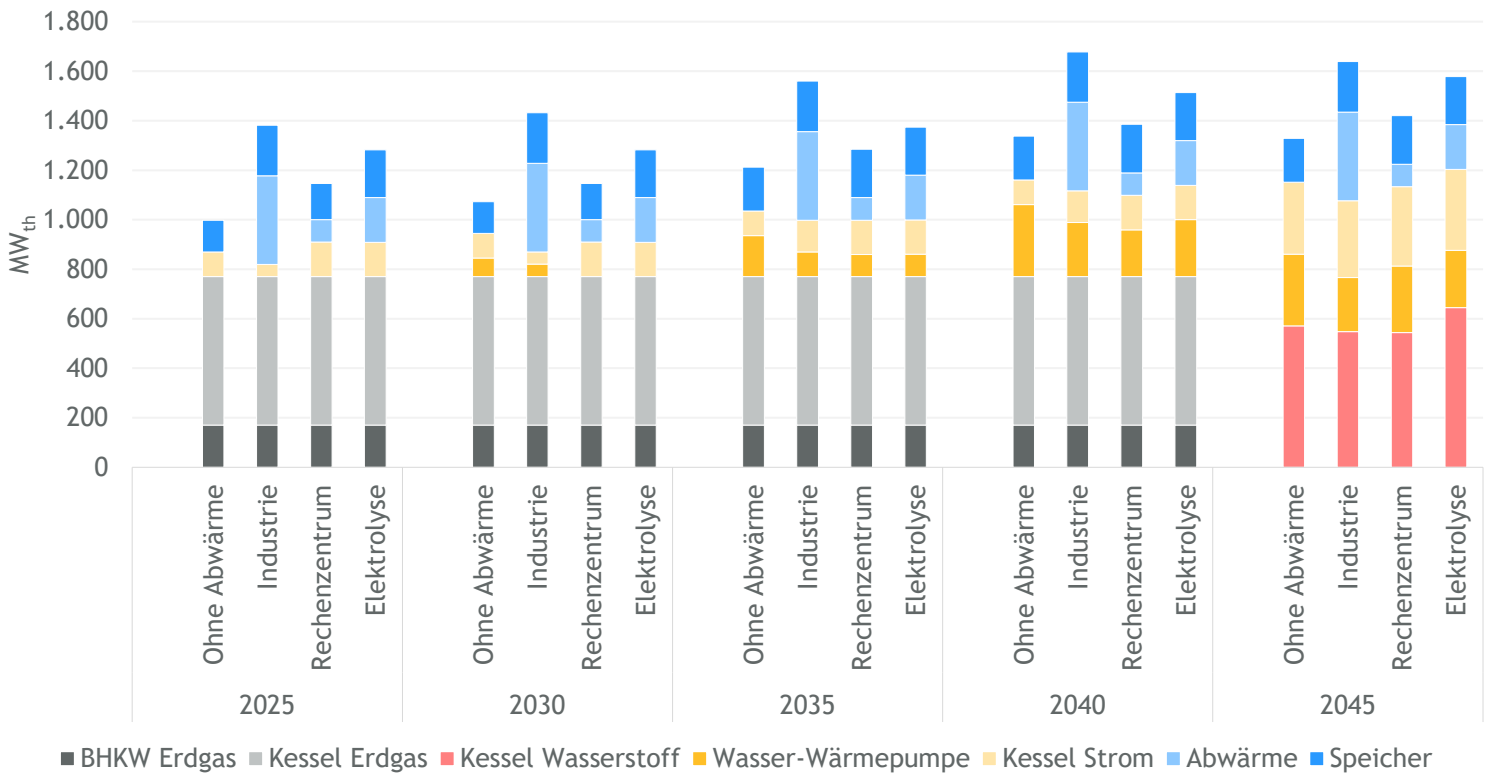
1: Spezifischer Systemwert (Differenz der Systemkosten) bezogen auf die Abwärmemenge

Kommentare

- Grundsätzlich weist das Abwärmprofil *Elektrolyse* einen niedrigeren Systemwert auf als die Abwärme aus *Industrie* und *Rechenzentrum*. Dies ist auf die ausschließliche Verfügbarkeit der Abwärme bei niedrigen Strompreisen zurückzuführen, wenn in den gleichen Stunden durch Wärmepumpen besonders günstig Wärme erzeugt werden kann.
- Die Abwärme aus *Rechenzentrum* weist einen hohen Systemwert auf, da sie fast konstant zur Verfügung steht.
- Der Systemwert von *Industrie* ist ähnlich hoch wie der von *Rechenzentrum*. Dieser Systemwert sinkt deutlicher mit einem höheren Anteil an der Gesamtmenge. Dies ist auf die höhere Leistung der Abwärme und stärkeren Spitzen des Profils zurückzuführen. Bei höheren Anteilen liegt die Leistung in einigen Stunden über dem Verbrauch.

Bestandsnetz: Die Nutzung von Abwärme führt zu mehr Speicher- und weniger Wärmepumpenkapazität

Installierte Wärmeerzeugungskapazität im Musterfall *Bestandsnetz* | *50 % Abwärme*[1]



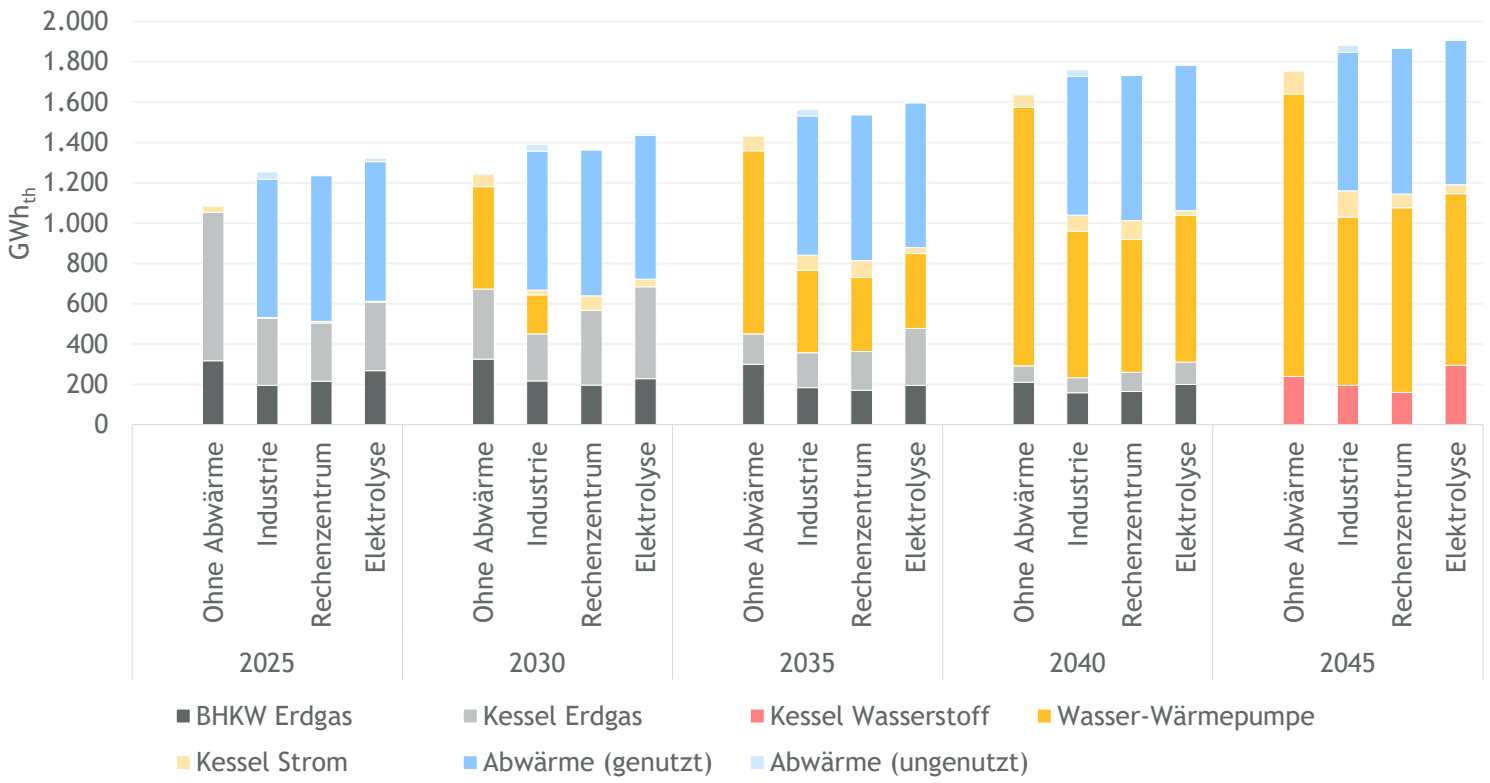
Kommentare

- Die Bestandsinfrastruktur, in diesem Fall Erdgas-BHKW und -Kessel, bleibt unabhängig vom Abwärmeprofil bis 2040 erhalten. Ab 2030 wird die Bestandsinfrastruktur durch Wasser-Wärmepumpen und ab 2035 durch größere Speicher ergänzt.
- Ab 2040 erfordert die Regulatorik einen deutlich höheren EE-Anteil, wodurch die Wärmepumpenkapazität steigt. Ab 2045 muss die fossile Kapazität abgeschaltet werden und wird durch weitere Wasserstoff- und Elektrokessel als Reservekapazität ersetzt.
- Durch die Abwärme wird im Jahr 2030 und 2045 in allen Abwärmefällen weniger Wärmepumpenkapazität als im Fall ohne Abwärme gebaut. Stattdessen wird mehr Speicherkapazität errichtet.

1: Unterschiede in den installierten Kapazitäten der Abwärmequellen ergeben sich aus unterschiedlichen Kapazitätsfaktoren bei gleicher Abwärmemenge (siehe Seite 22).

Bestandsnetz: Die eingebundene Abwärme senkt hauptsächlich den Bedarf an durch Wärmepumpen erzeugter Wärme

Wärmeerzeugung[1] im Musterfall *Bestandsnetz* | *50 % Abwärme*



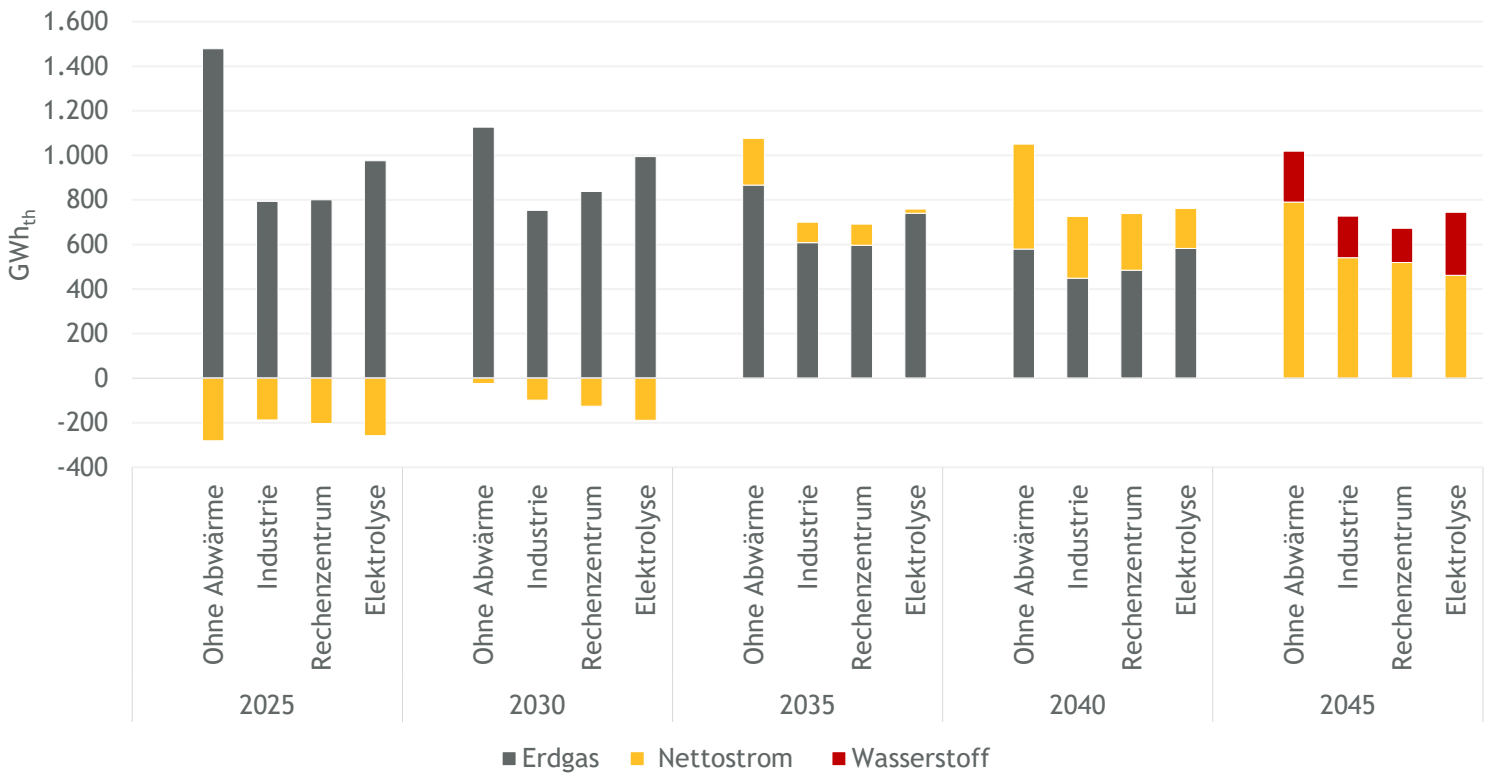
Kommentare

- Ab 2030 muss der EE-Anteil der Wärme bei mind. 30 % liegen. In den Jahren 2030 und 2035 wird allerdings mehr erneuerbare Wärme erzeugt, als durch die Regulatorik vorgegeben ist. Aufgrund steigender CO_2-Kosten und zeitweise niedrigen Strompreisen hat die erneuerbare Wärme in vielen Stunden niedrigere Grenzkosten als die fossile Wärme.
- Ab 2040 müssen 80 % der Wärme erneuerbar erzeugt werden. Der Großteil der Wärme wird dadurch in allen Fällen von der Wärmepumpe bereitgestellt. Erdgas-, Wasserstoff- und Stromkessel dienen nur zur Spitzenlastdeckung und als Reservekapazität.
- Alle eingebundenen Abwärmeprofile ermöglichen vor allem die Reduktion der Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen.

1: Unterschiede in den Gesamtsummen resultieren aus dem Speicherbetrieb, bei dem Verluste auftreten. Um grenzkostenfreie Abwärme maximal zu nutzen, wird der Speicher bei unregelmäßigeren Profilen mehr ausgelastet und die Speicherverluste steigen. Das Modell kann Abwärme auch ungenutzt lassen.

Bestandsnetz: Die Einbindung von Abwärme führt zur deutlichen Reduktion des Sekundärenergieverbrauchs

Einsatz von Energieträgern im Wärmenetz[1,2] im Fall *Bestandsnetz* | *50 % Abwärme*



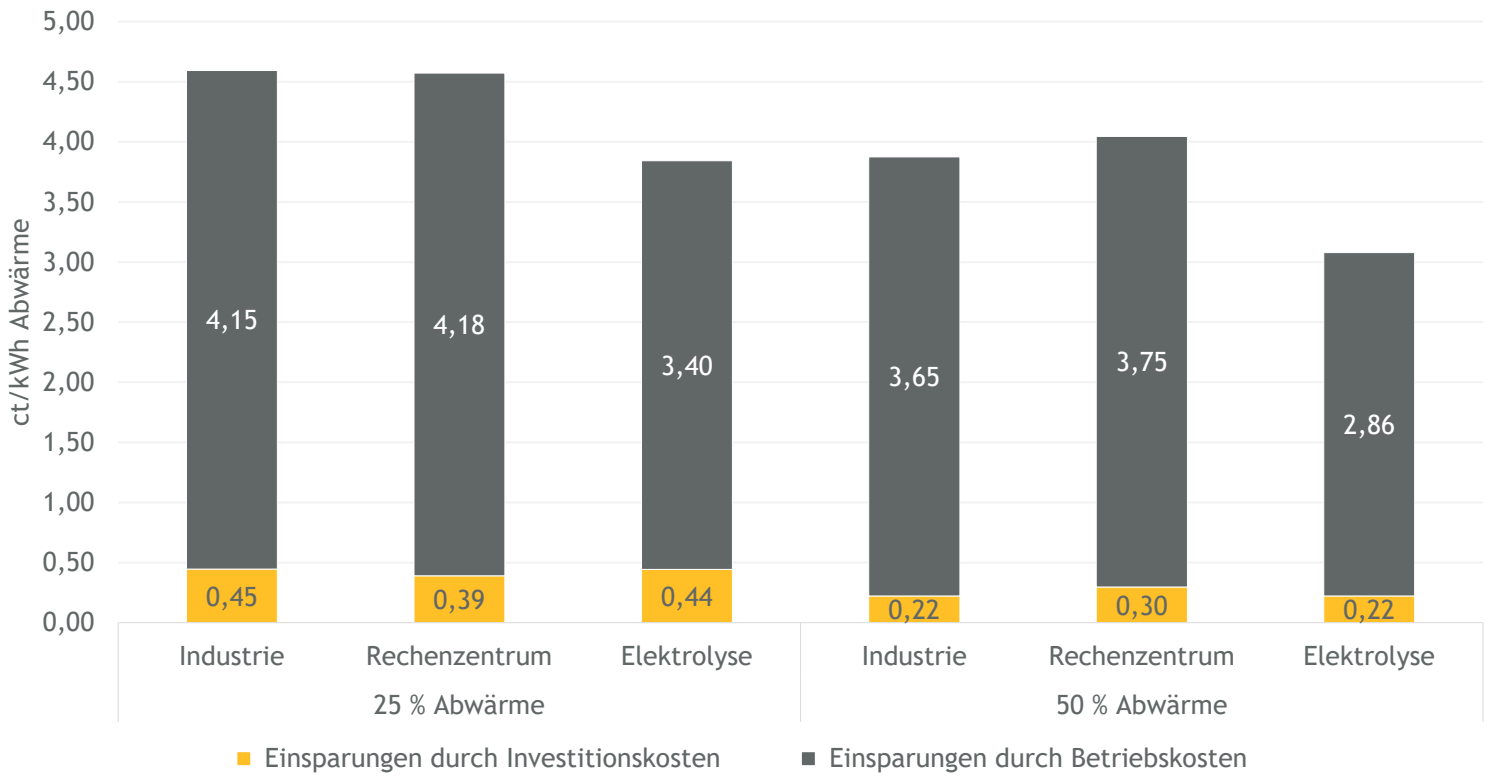
Kommentare

- Durch Abwärmenutzung kann der Verbrauch an Erdgas, Strom und Wasserstoff im Bestandsnetz im Jahr 2025 um 480 bis 600 GWh reduziert werden. Im Jahr 2045 sind es 250 bis 330 GWh, da die durch Abwärme ersetzten Technologien effizienter sind.
- Durch diesen Effizienzgewinn, insbesondere durch Wärmepumpen, sinkt auch der gesamte Verbrauch an Erdgas, Strom und Wasserstoff bis 2045, obwohl der Wärmebedarf durch den Ausbau und die Verdichtung des Netzes steigt.

1: Abwärme wird nicht als Energieträger bilanziert, da der Energiebedarf in der Industrie anfällt und die Wärme dem Wärmenetz als Abfallprodukt zur Verfügung steht.
2: Durch die Nutzung des BHKWs kann die Strom-Bilanz negativ werden, wenn mehr Strom ins Netz gespeist wird, als die strombetriebenen Anlagen erfordern.

Bestandsnetz: Der Systemwert der Abwärme entsteht vor allem durch eingesparte variable Kosten

Systemwert der Abwärmenutzung aufgeteilt nach Kostentyp im Bestandsnetz

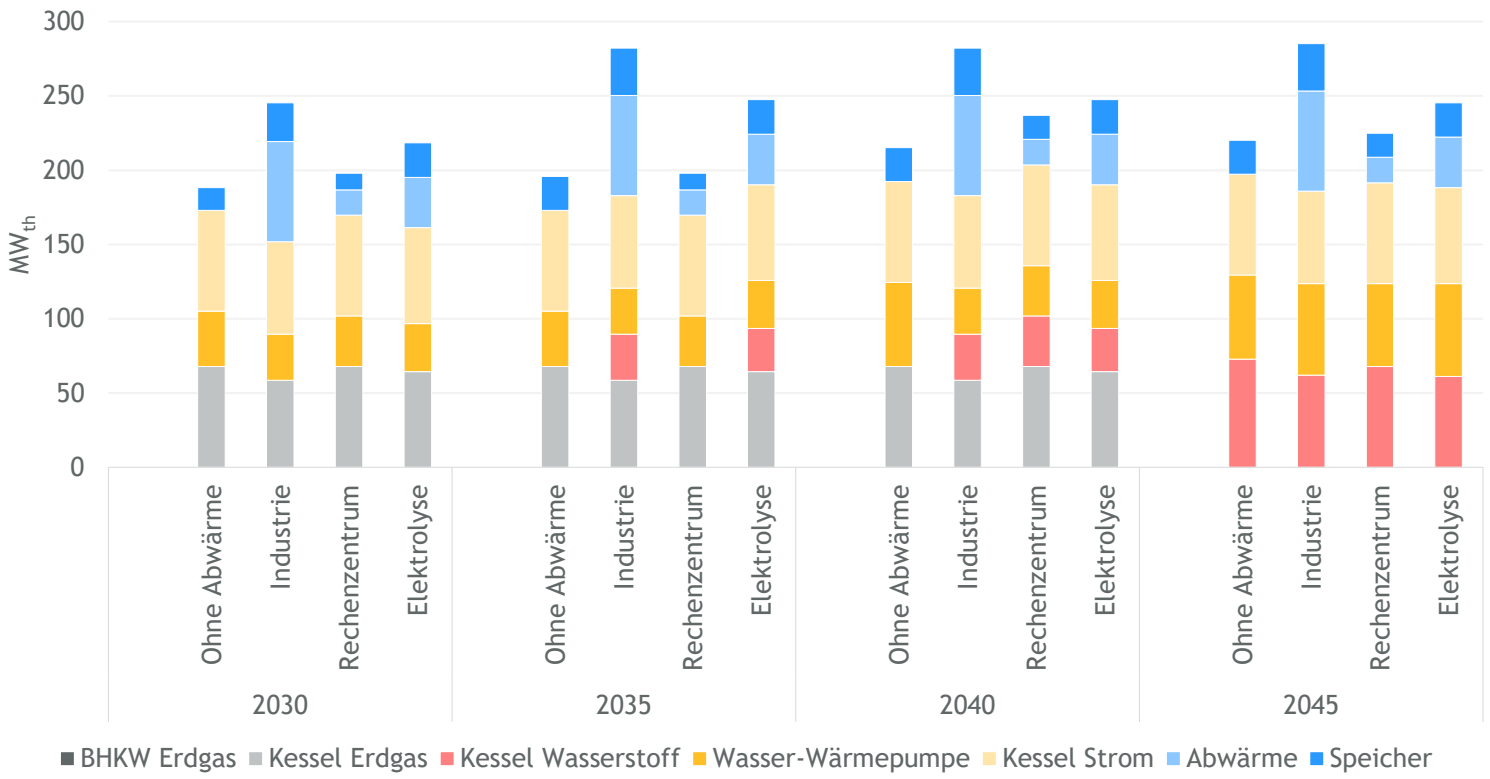


Kommentare

- Die Einbindung von Abwärme reduziert den Bedarf steuerbarer Kapazitäten nicht (N-2-Kriterium gilt unabhängig von Abwärme).
- Die steuerbare Kapazität kann allerdings durch Erzeuger mit geringeren Investitionskosten, bspw. Kessel statt Wärmepumpen oder BHKWs, zur Verfügung gestellt werden. Dadurch sinken die Investitions- und fixen Betriebskosten.
- Der Systemwert der Abwärme, also das Einsparpotenzial, wird dennoch überwiegend durch variable Betriebskosten bestimmt.
- Die Abwärme aus *Industrie* verdrängt vor allem teure Spitzenlast. Dies führt zu ähnlichen Einsparungen, wie das vergleichsweise konstante Abwärmeprofil *Rechenzentrum*. *Elektrolyse* ersetzt meist Wärmepumpenstrom in Niedrigpreisstunden und bringt daher den geringsten Systemwert.

Neubaunetz: Die Nutzung von Abwärme führt nur zu wenigen signifikanten Änderungen der installierten Kapazität

Installierte Wärmeerzeugungskapazität im Musterfall *Neubaunetz* | *50 % Abwärme*



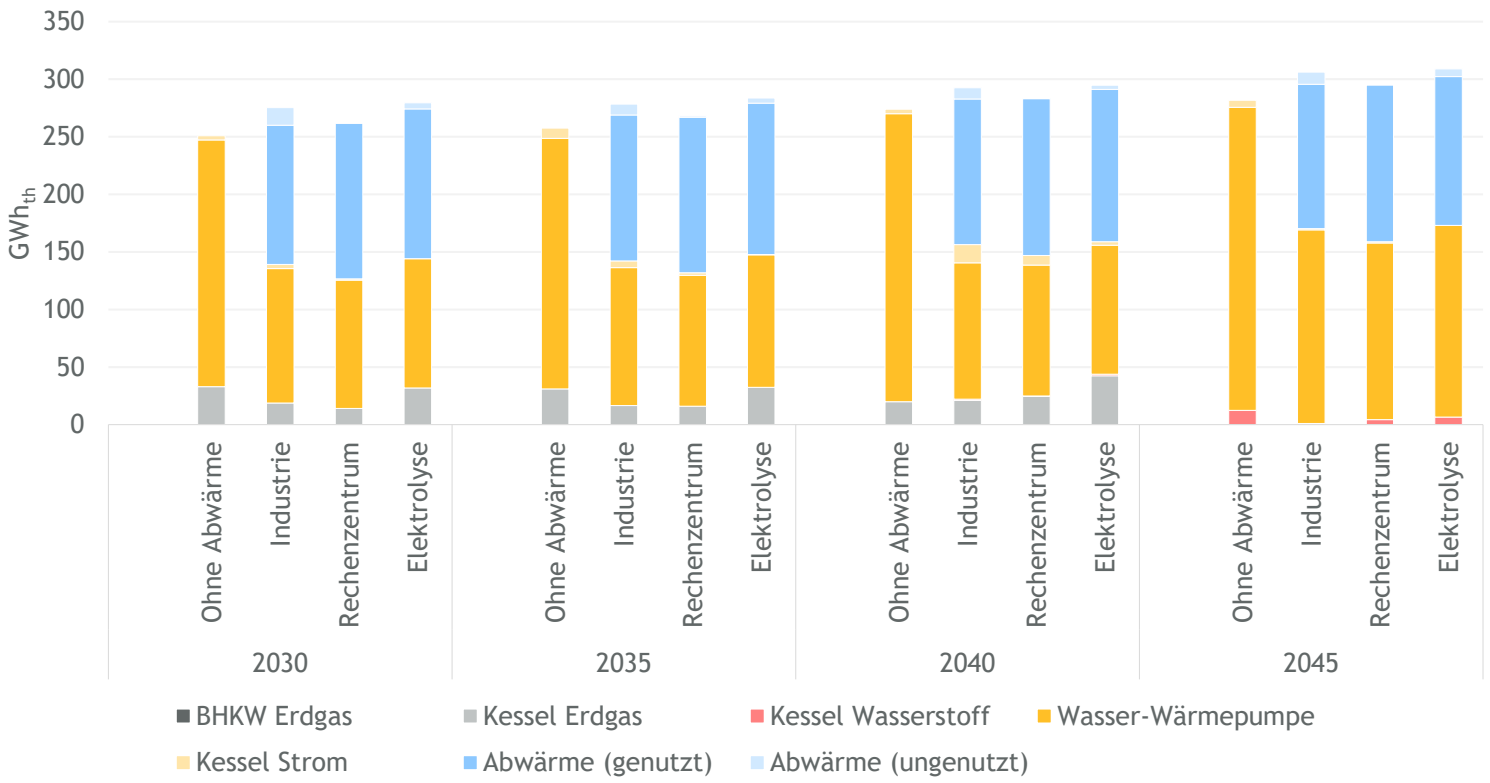
Kommentare

- Im Neubaunetz ähnelt sich die installierte Kapazität in allen Fällen. Es werden Wärmepumpen, Erdgas-, Wasserstoff- und Stromkessel sowie Speicher eingesetzt.
- Aufgrund der gleichbleibenden Regulatorik zwischen 2030 und 2040 zeigen sich keine starken Brüche in der Erzeugungsstruktur.
- Ab 2045 werden die Erdgaskessel wie im Bestandsnetz aufgrund der regulatorischen 100 % EE-Vorgabe durch Wasserstoffkessel ersetzt.
- Da Abwärme nicht als steuerbare Kapazität im N-2 Kriterium gilt, kann durch die Nutzung von Abwärme nur wenig Kapazität eingespart werden. Im Jahr 2040 zeigt sich eine signifikant geringere Wärmepumpenkapazität, die durch eine höhere Wasserstoffkapazität als Reserve ausgeglichen wird.

1: Unterschiede in den installierten Kapazitäten der Abwärmequellen ergeben sich aus unterschiedlichen Kapazitätsfaktoren bei gleicher Abwärmemenge (siehe Seite 22).

Neubaunetz: Durch Abwärme sinkt insbesondere der Anteil der Wärmepumpe - am stärksten beim Abwärmeprofil *Elektrolyse*

Wärmeerzeugung im Musterfall *Neubaunetz* | *50 % Abwärme*



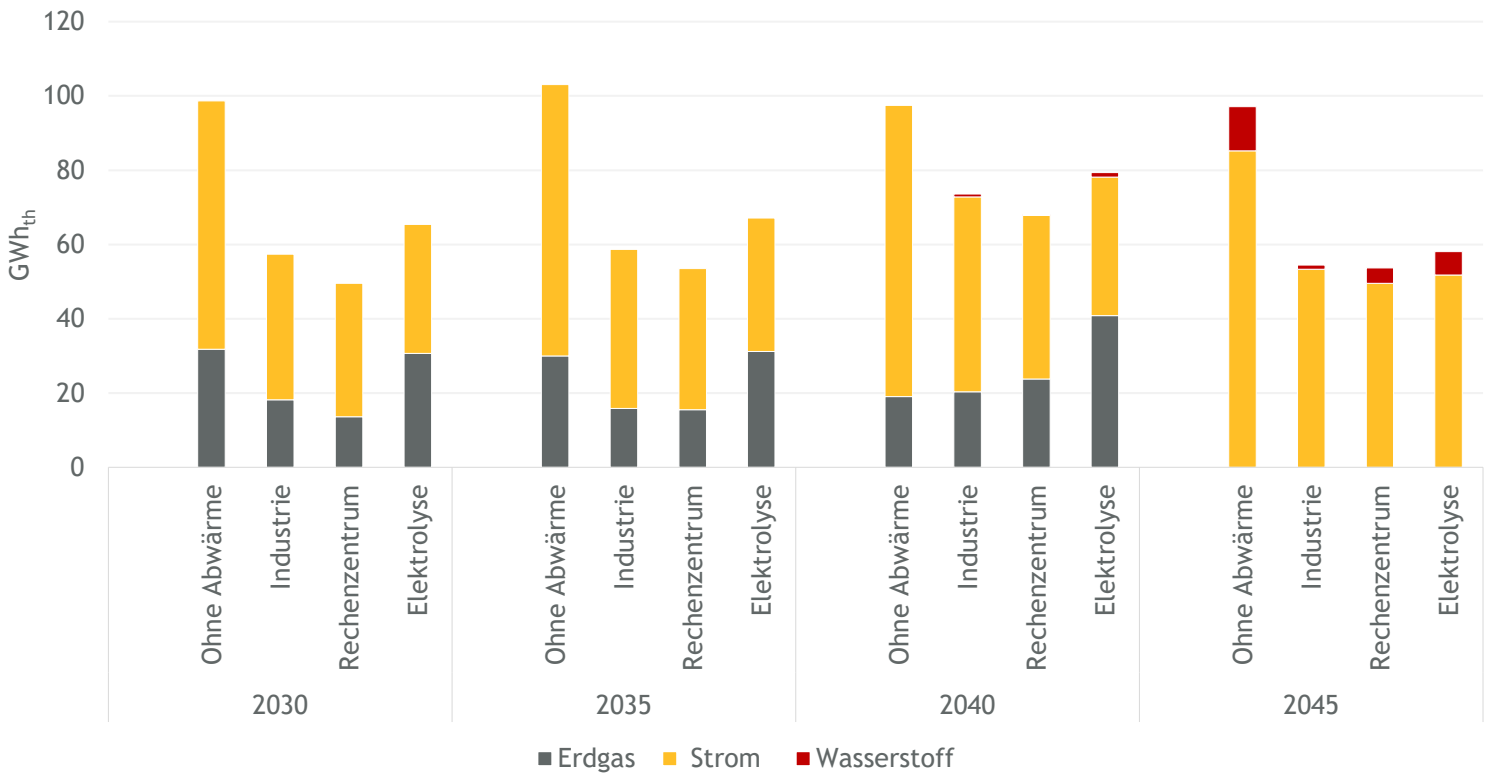
1: Unterschiede in den Gesamtsummen resultieren aus dem Speicherbetrieb, bei dem Verluste auftreten. Um grenzkostenfreie Abwärme maximal zu nutzen, wird der Speicher bei unregelmäßigeren Profilen mehr ausgelastet und die Speicherverluste steigen.

Kommentare

- Die verfügbare Abwärmemenge ist in allen Musterfällen identisch. Das Modell kann Abwärme auch ungenutzt lassen.
- In allen Jahren und allen Musterfällen wird im Neubaunetz mehr als 70 % der Wärme durch Wärmepumpen erzeugt. Erdgas- und Wasserstoffkessel erzeugen nur in Spitzenlastzeiten.
- Durch die Nutzung der Abwärme sinkt die Wärmeerzeugung aller anderen Technologien. Besonders deutlich ist das bei der Wärmepumpe, da sie im Neubaunetz mit und ohne Abwärme den überwiegenden Anteil der Wärme deckt.
- Im Jahr 2040 wird weiterhin Wärme mit dem Erdgaskessel erzeugt; 2045 darf dieser nicht mehr betrieben werden. Die erzeugte Wärmemenge wird nur teilweise durch Wasserstoffkessel ersetzt.

Neubaunetz: Auch im Neubaunetz führt Integration von Abwärme zu signifikanten Einsparungen beim Energieträgereinsatz

Einsatz von Energieträgern im Wärmenetz[1,2] im Musterfall *Neubaunetz* | *50 % Abwärme*



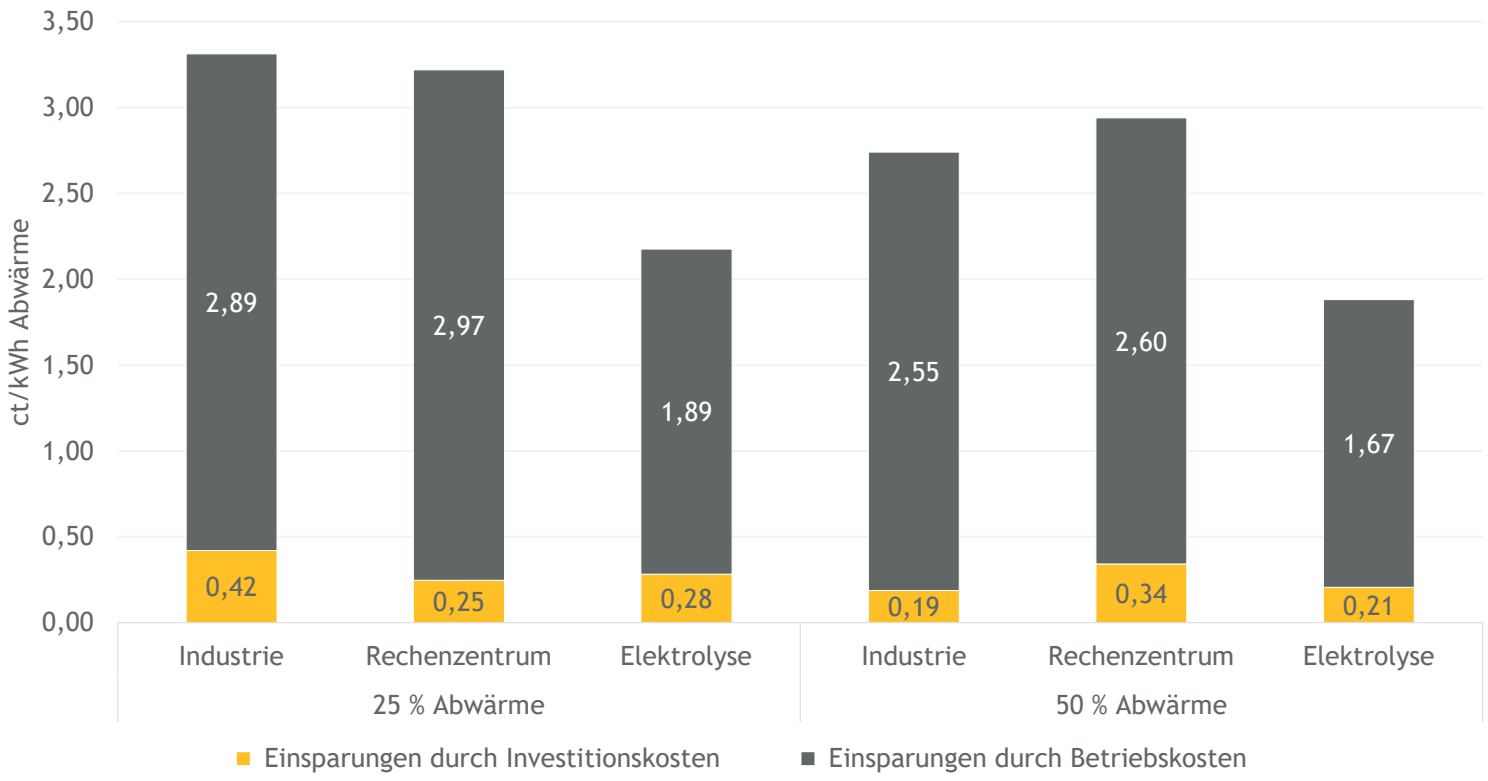
Kommentare

- Durch die Abwärme kann der Energieträgereinsatz in allen Jahren um 30 bis 60 GWh reduziert werden.
- Die Abwärmeprofile *Industrie* und *Rechenzentrum* reduzieren den Verbrauch stärker, da sie grundsätzlich auch in Stunden verfügbar sind, in denen die Erzeugung durch Wärmepumpen durch hohe Strompreise ungünstig ist.
- Ab 2040 sinkt der Energieträgereinsatz auch im Musterfall ohne Abwärme, da durch eine höhere Wärmepumpenkapazität mehr Wärme effizient erzeugt wird.

1: Abwärme wird nicht als Energieträger bilanziert, da der Energiebedarf in der Industrie anfällt und die Wärme dem Wärmenetz als Abfallprodukt zur Verfügung steht.

Neubaunetz: Der Systemwert der Abwärme ist niedriger, die Einsparungen bei Investitionen steigen im Vergleich zum Bestandsnetz

Systemwert der Abwärmenutzung aufgeteilt nach Kostentyp im Neubaunetz



Kommentare

- Das Neubaunetz wird noch stärker von Wärmepumpen geprägt, da keine Bestandskapazitäten vorhanden sind. Dadurch ist die Profilwirkung noch stärker und die Differenz zwischen *Industrie* und *Rechenzentrum* sowie *Elektrolyse* noch höher als im Bestandsnetz.
- Die variablen Betriebskosten sind wegen der niedrigen Vorlauftemperatur insgesamt geringer. Entsprechend fällt der Anteil der eingesparten Betriebskosten am Systemwert kleiner aus und der Investitionskostenanteil relativ höher.
- Die Investitionskosten sinken durch günstigere Erzeuger. Die gesamte steuerbare Erzeugungskapazität bleibt aber aufgrund der Besicherung der Wärmeerzeugung nach dem N-2 Kriterium ähnlich hoch.

Bei der Einordnung der berechneten Systemwerte müssen technische und ökonomische Annahmen berücksichtigt werden

Technische Einordnung

- Durch das vorgeschriebene N-2 Kriterium muss der Wärmenetzbetreiber den Wärmebedarf auch beim Ausfall der größten beiden Anlagen gewährleisten. Daher wird steuerbare Reservekapazität errichtet. Die Abwärme gilt nicht als steuerbar und trägt daher nicht zur Erfüllung des Kriteriums bei. Dieses Kriterium hat großen Einfluss auf die Höhe der Erzeugungskapazität in den Abwärmeszenarien. Ein risikoaffiner Wärmenetzbetreiber könnte einen Teil der Abwärme als gesichert annehmen, weniger Reservekapazität errichten und so den Systemwert der Abwärme erhöhen.
- Wärmeerzeuger, deren Verfügbarkeit stark von regionalen Faktoren abhängt (z. B. Geothermie, Biomasseheizwerke, Müllverbrennung), werden in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Technologien könnte den Systemwert von Abwärme verringern, da dem Wärmenetzbetreiber weitere, ggf. günstigere Optionen zur Verfügung stehen.
- Die temperaturabhängigen Verluste im Wärmenetz werden pauschal modelliert. In realen Netzen beeinflussen die Vor- und Rücklauftemperatur sowie die Bodentemperatur die Verluste und auch die Effizienzen der Wärmeerzeuger.

Ökonomische Einordnung

- In der Analyse wird angenommen, dass die regulatorischen Vorgaben des WPG[1] gelten. Die Vorgaben zur Erfüllung von erneuerbarer Wärme haben Einfluss auf den Systemwert der Abwärme. Der Systemwert der Abwärme in einem Wärmenetz ohne diese gesetzlichen Vorgaben wurde nicht untersucht.
- Je Musterfall wird nur eine Abwärmequelle betrachtet. Diese isolierte Betrachtung vernachlässigt Synergieeffekte, könnte aber zu höheren Systemwerten einzelner Abwärmequellen führen.
- Mit diesem Modellierungsansatz gilt Perfect Foresight. Der modellierte Wärmenetzbetreiber kennt also Strompreise und Abwärmeverfügbarkeiten im Voraus und kann sich optimal danach ausrichten. Da diese Annahmen in allen Szenarien gelten, sind die Effekte auf den Systemwert der Abwärme schwer abzuschätzen.
- Die Wärmenetzdaten und Abwärmeprofile sind exemplarisch gewählt und wurden basierend auf Annahmen berechnet. Eine Übertragbarkeit auf reale Wärmenetze und Abwärmeprojekte ist ggf. nicht gegeben.

1: § 29 & 30 WPG

Zwischenfazit

Aus der Analyse des Systemwerts von Abwärme können folgende Beobachtungen gezogen werden…

Im Bestandsnetz ist der Systemwert von Abwärme höher als im Neubaunetz, weil sie dort häufiger teurere Erzeugung verdrängt. Mit steigendem Abwärmeanteil (50 % statt 25 %) sinkt der Systemwert pro kWh Abwärme, da zunehmend günstigere Erzeugung ersetzt und mehr Speicherbedarf ausgelöst wird.

Der Systemwert der Abwärme entsteht überwiegend durch eingesparte variable Betriebskosten. Die Abwärmeprofile *Industrie* und *Rechenzentrum* erzielen einen Systemwert zwischen 4,2 ct/kWh Abwärme (*Bestandsnetz | 25 % Abwärme*) und 2,6 ct/kWh (*Neubaunetz | 50 % Abwärme*). Das Abwärmeprofil *Elektrolyse* ersetzt meist Wärmepumpen in Niedrigpreisstunden und weist daher einen geringeren Systemwert zwischen 3,4 ct/kWh (*Bestandsnetz | 25 % Abwärme*) und 1,7 ct/kWh (*Neubaunetz | 50 % Abwärme*) auf.

Mit der Nutzung von Abwärme wird die benötigte Wärmepumpenkapazität reduziert bei gleichzeitiger Erfüllung der vorgegebenen EE-Anteile. Dafür erfordert die Abwärme mehr Speicherausbau, um die Abwärme zu einem möglichst hohen Anteil zu nutzen. Abwärme ersetzt sowohl im Bestands- als auch im Neubaunetz vor allem Wärmepumpenstrom; das Abwärmeprofil *Industrie* kann bei gleicher jährlich zur Verfügung stehender Abwärmemenge auch die Nutzung von Spitzenlasterzeugern reduzieren.

Durch Abwärmenutzung sinkt der Energiebedarf aus Strom, Gas und Wasserstoff im Bestandsnetz im Zeitraum 2025 bis 2045 um 33-38 % und im Neubaunetz um 32-43 % (bei 50 % Abwärme). Das Abwärmeprofil *Elektrolyse* weist die größte Reduktion des Strombedarfs auf, erhöht aber gleichzeitig den Gas- bzw. Wasserstoffbedarf, da diese Energieträger zur Deckung der Spitzenlast in Hochpreisstunden eingesetzt werden müssen.

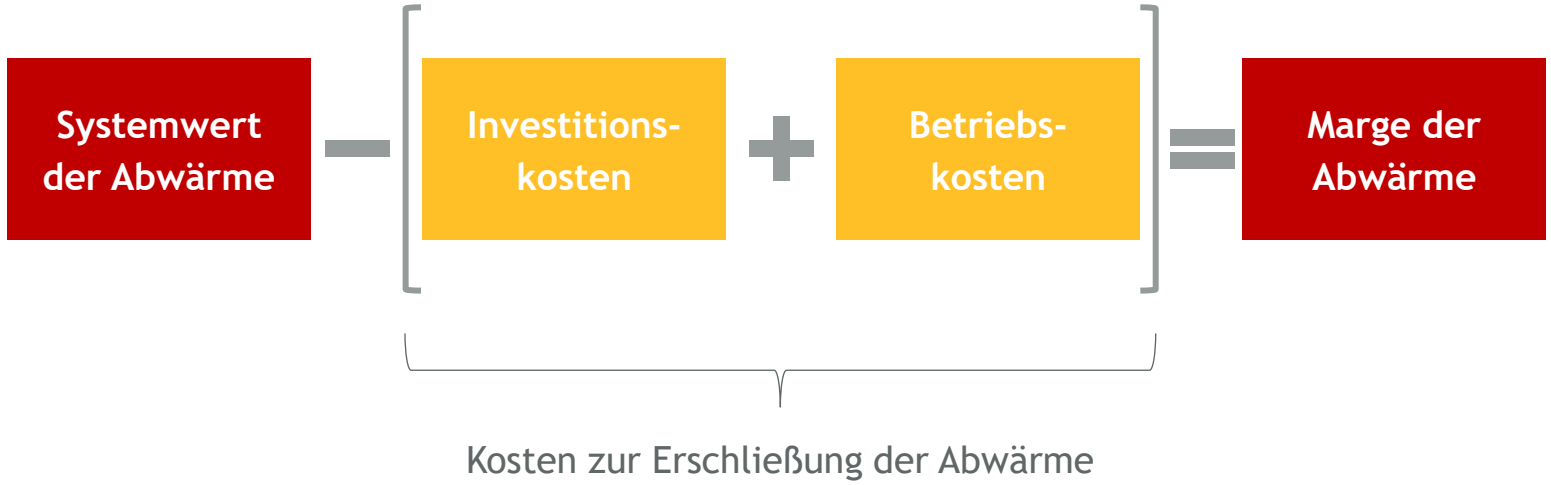
4

Gegenüberstellung zu Kosten der Abwärmenutzung

© EWI 2025

Dem berechneten Systemwert der Abwärme werden beispielhafte Kosten der Abwärmenutzung gegenübergestellt

Wirtschaftlichkeit von Abwärmeprojekten



Kommentare

- Um die Wirtschaftlichkeit möglicher Abwärmeprojekte zu quantifizieren, werden vom Systemwert der Abwärme die Kosten der Abwärmenutzung abgezogen und so eine theoretische Marge berechnet.
- Die Kosten der Abwärmenutzung beruhen zum Großteil auf den Investitionskosten für die technischen Komponenten zur Erschließung der Abwärme. Dabei spielen die entfernungs-abhängigen Leitungskosten eine wichtige Rolle.
- In der Realität wird ein Preis pro bezogener Abwärmeeinheit, der an den Abwärmeerzeuger gezahlt wird, zwischen dem Abwärmeerzeuger und dem Wärmenetzbetreiber ausgehandelt. Dieser Abwärmepreis wird in den nachfolgenden Analysen vernachlässigt, da dieser lediglich die entstehende Marge zwischen Abwärmeerzeuger und Wärmenetzbetreiber aufteilt.

Die Kosten der Abwärmenutzung bestehen zum Großteil aus den Investitionskosten der technischen Komponenten

Investitionskostendaten[1,2] zur Berechnung der Kosten der Abwärmenutzung

Investitionskosten	Einheit	Niedrig	Hoch
Wärmetauscher	EUR/MW	77.089	168.194
Pumpenstation	EUR/MW	70.110	152.968
Wärmepumpe	EUR/MW	510.000	1.010.000
Wärmeleitung 0-50 MW	EUR/MW/km	50.750	75.000
Wärmeleitung 50-100 MW	EUR/MW/km	25.410	37.410
Wärmeleitung 100-250 MW	EUR/MW/km	15.870	23.410
Wärmeleitung 250-500 MW	EUR/MW/km	9.550	14.080

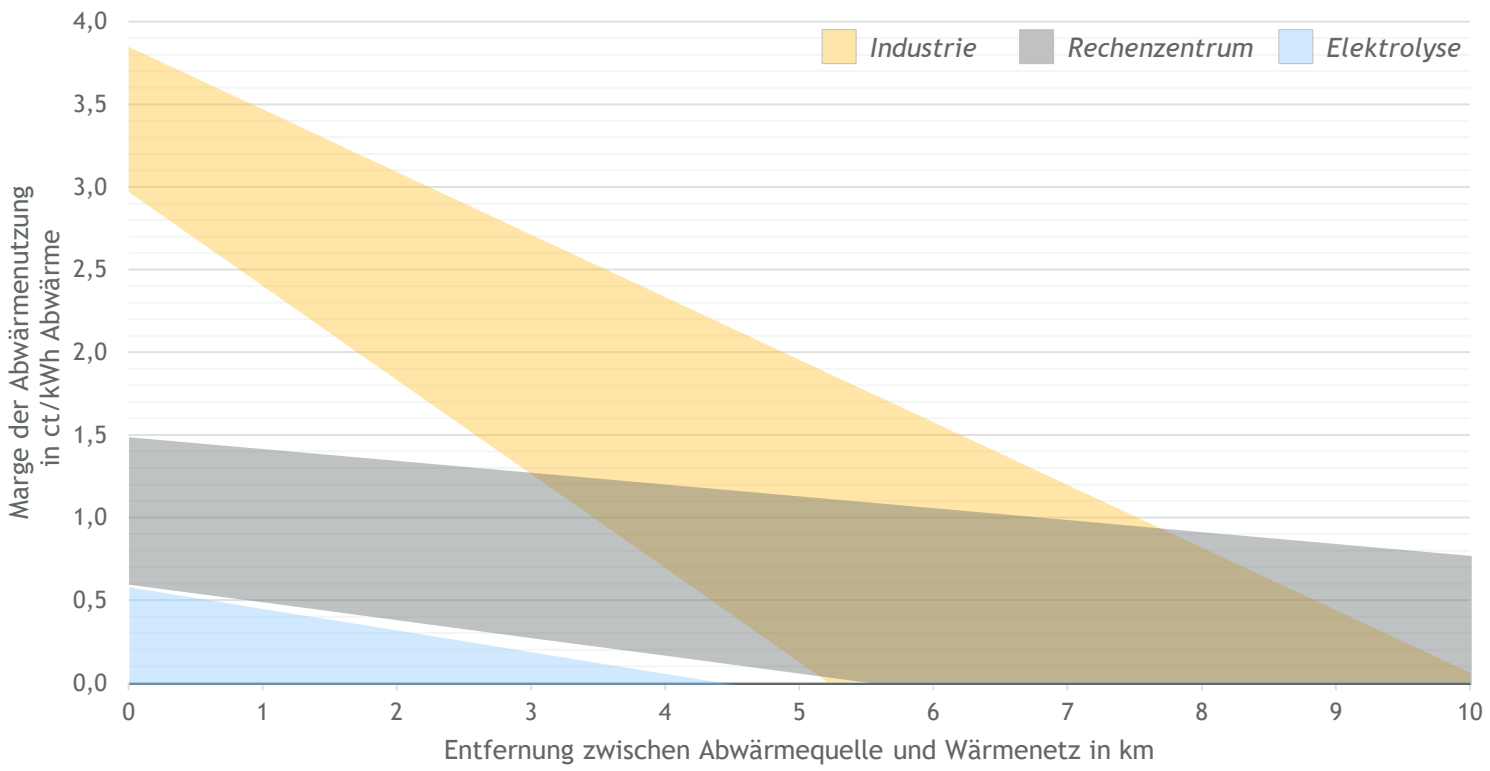
1: DEA (2025a) | 2: DEA (2025b)

Kommentare

- Zur Auskopplung der Abwärme ist ein Wärmetauscher an der Abwärmequelle nötig. Zusätzlich muss zur Übertragung eine Pumpenstation installiert werden.
- Die Übertragungsleitung für Abwärme ist ein maßgeblicher Teil der Kosten. Die Kosten für die Übertragungsleitung steigt mit der Entfernung zwischen Abwärmequelle und Wärmenetz.
- Falls das Temperaturniveau der Abwärme niedriger als die Vorlauftemperatur des Wärmenetzes ist, wird eine Wärmepumpe zur Temperaturerhöhung benötigt.
- Die Kostenstruktur ist sehr kapitalintensiv. Die hier dargestellten Investitionskosten werden in der Kostenberechnung durch fixe Betriebskosten sowie variable Betriebskosten der Wärmepumpe ergänzt.

Bestandsnetz: Die Abwärmeprofile *Rechenzentrum* und *Industrie* zeigen eine positive Marge, *Elektrolyse* nur in Ausnahmefällen

Marge[1] der Abwärmenutzung im Musterfall *Bestandsnetz | 25 % Abwärme*



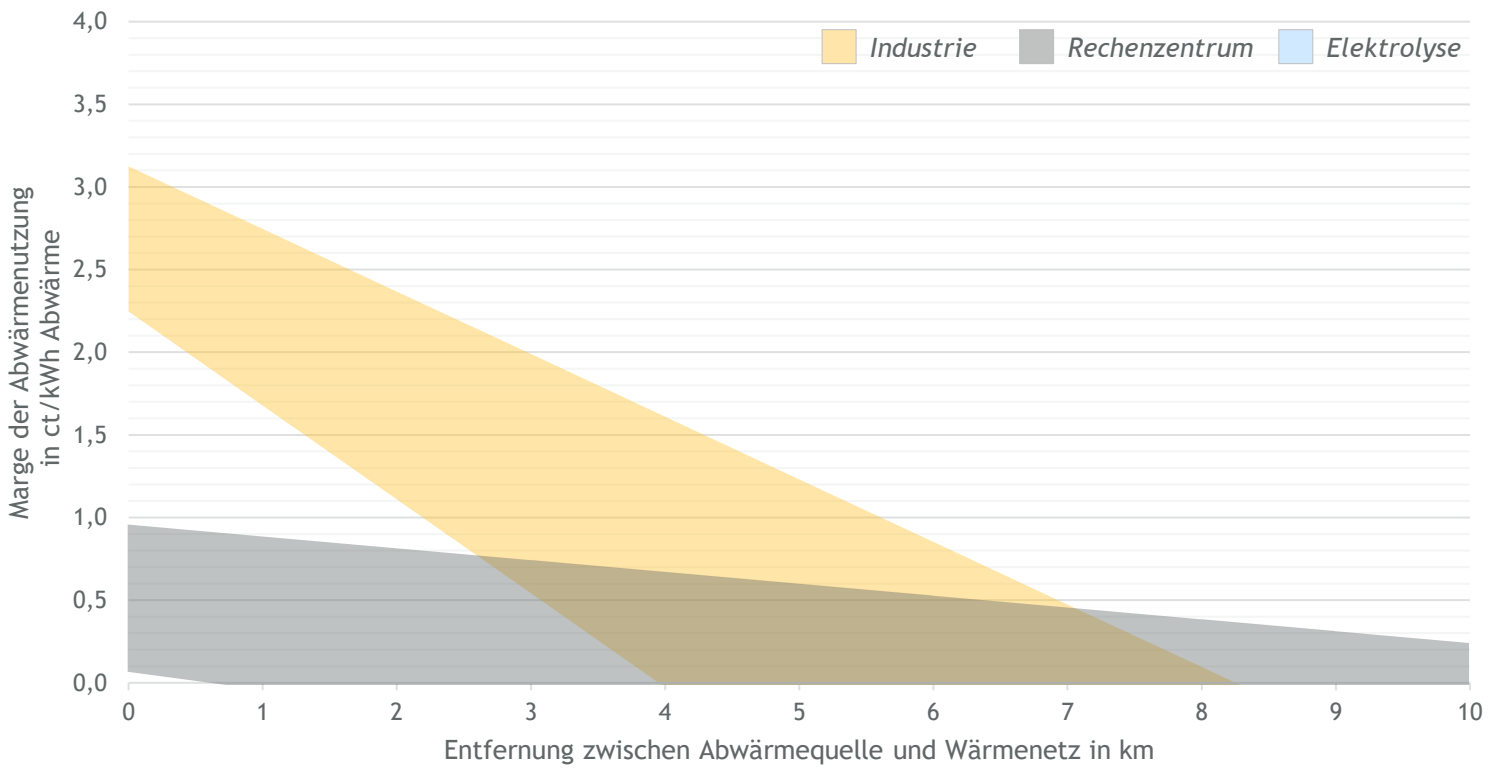
Kommentare

- Im Musterfall *Bestandsnetz | 25 % Abwärme* muss zur Nutzung der Abwärme aus *Rechenzentrum* und *Elektrolyse* aufgrund der höheren Vorlauftemperatur eine Wärmepumpe installiert werden.
- Beim *Elektrolyse*-Profil gibt es einen kleinen Bereich bei Distanzen bis zu 4 km, der eine positive Marge aufweist. Dies setzt allerdings voraus, dass die Erschließungskosten am unteren Ende des Unsicherheitsbereichs liegen.
- Das *Industrie*-Profil hat mit bis zu 3,8 ct/kWh eine hohe Marge. Aufgrund hoher Kosten für die Leitung sinkt die Marge deutlich und wird – je nach Kostenniveau – bei 5-10 km negativ.
- Für das *Rechenzentrum*-Profil kann die positive Marge von bis zu 1,5 ct/kWh über Entfernungen bis zu 10 km gehalten werden.

1: Die Marge der Abwärmenutzung ist definiert als die Differenz des Systemwerts und den Investitions- und Betriebskosten der Abwärmenutzung. Der durch den Erzeuger verlangte Abwärmepreis wird vernachlässigt.

Bestandsnetz: Auch bei hohen Abwärme-Anteilen ergibt sich für *Industrie* und *Rechenzentren* eine positive Marge

Marge[1] der Abwärmenutzung im Musterfall *Bestandsnetz | 50 % Abwärme*



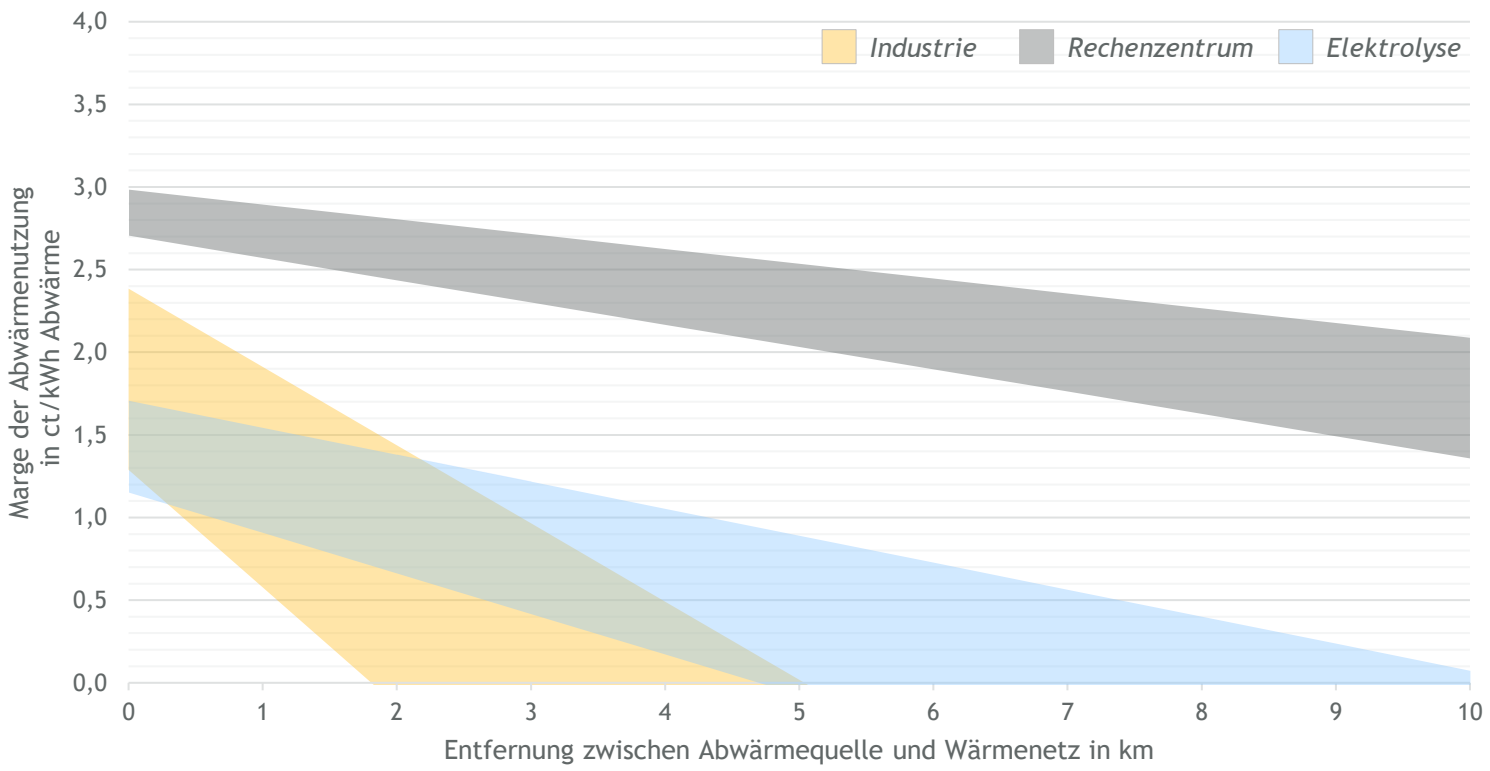
Kommentare

- Der Musterfall *Bestandsnetz | 50 % Abwärme* ähnelt den Ergebnissen des Musterfalls *Bestandsnetz | 25 % Abwärme*. Durch geringere Systemwerte verschiebt sich die Marge entsprechend nach unten.
- Das *Elektrolyse*-Profil weist durch den geringeren Systemwert bei höherem Abwärmeanteil keine positive Marge auf.
- Für *Rechenzentrum* und *Industrie* zeigt sich weiterhin eine positive Marge der Abwärmenutzung. Das *Rechenzentrum*-Profil weist dabei eine Marge von max. 1 ct/kWh auf und kann bei hohen Erschließungskosten bereits bei sehr geringen Distanzen unwirtschaftlich werden. Liegen die Erschließungskosten am unteren Ende, kann die Marge bis über 10 km positiv bleiben.

1: Die Marge der Abwärmenutzung ist definiert als die Differenz des Systemwerts und den Investitions- und Betriebskosten der Abwärmenutzung. Der durch den Erzeuger verlangte Abwärmepreis wird vernachlässigt.

Neubaunetz: Das Profil *Rechenzentrum* zeigt sich über weite Entfernungen profitabel - *Elektrolyse* hat eine positive Marge

Marge[1] der Abwärmenutzung im Musterfall *Neubaunetz | 25 % Abwärme*



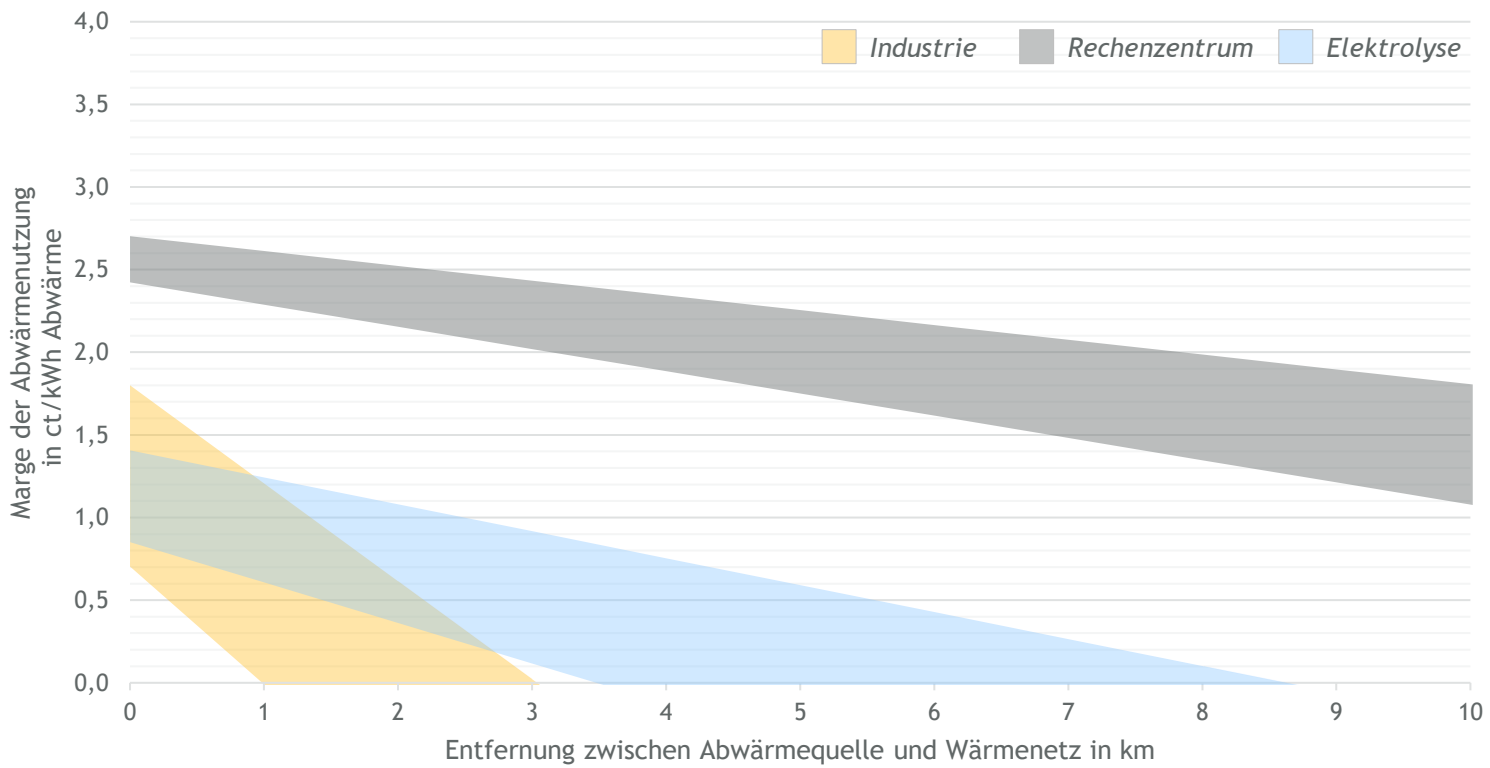
Kommentare

- Im Musterfall *Neubaunetz | 25 % Abwärme* zeigt sich ein anderer Verlauf der Marge im Vergleich zum Bestandsnetz.
- Zur Einbindung der Abwärme von *Elektrolyse* und *Rechenzentrum* ist aufgrund der niedrigeren Vorlauftemperatur keine zusätzliche Wärmepumpe nötig.
- Das *Rechenzentrum*-Profil weist eine hohe und recht robuste Marge auf, die auch bei steigenden Entfernungen bei >1,5 ct/kWh liegt.
- Abwärme aus *Elektrolyse* ist durch die niedrigere Vorlauftemperatur im Wärmenetz attraktiver als im Bestandsnetz und kann bis zu einer Distanz von 10 km eine positive Marge aufweisen.
- Durch die geringere Auslastung wird die Marge des *Industrie*-Profils bereits bei 2-5 km negativ.

1: Die Marge der Abwärmenutzung ist definiert als die Differenz des Systemwerts und den Investitions- und Betriebskosten der Abwärmenutzung. Der durch den Erzeuger verlangte Abwärmepreis wird vernachlässigt.

Neubaunetz: Bei Erhöhung der Abwärmemenge weist das Abwärmeprofil *Rechenzentrum* weiterhin eine hohe Marge auf

Marge[1] der Abwärmenutzung im Musterfall *Neubaunetz | 50 % Abwärme*



Kommentare

- Im Musterfall *Neubaunetz | 50 % Abwärme* zeigt sich ein ähnlicher Verlauf aller Abwärmeprofile mit leicht geringeren Margen im Vergleich zu geringeren Abwärme-Anteilen.
- Auch hier zeigt das *Rechenzentrum*-Profil über hohe Entfernungen eine positive, robuste Marge.
- Auch das *Elektrolyse*-Profil zeigt bis hin zu mittleren Entfernungen von 4–8 km eine signifikant positive Marge.
- Das *Industrie*-Profil zeigt aufgrund der hohen Volatilität nur bei sehr kurzen Entfernungen eine positive Marge.

1: Die Marge der Abwärmenutzung ist definiert als die Differenz des Systemwerts und den Investitions- und Betriebskosten der Abwärmenutzung. Der durch den Erzeuger verlangte Abwärmepreis wird vernachlässigt.

Die Ergebnisse stellen exemplarische Fälle dar – In realen Projekten können weitere Faktoren die Realisierung erschweren

Einordnung der Kosten der Abwärmenutzung

- Die Kostendaten basieren auf allgemeine Schätzungen. Für die Wärmetauscher, Pumpen und Wärmepumpen sind diese Kosten mit typischer Unsicherheit verbunden. Insbesondere die Leitungskosten hängen zu 60 % von Installationskosten ab und sind daher im Wesentlichen von potenziellen Trassen in den individuellen Projekten abhängig. Die tatsächlichen Kosten der Abwärmenutzung können sich daher stark zwischen Projekten unterscheiden.
- Die Investitionskosten sind über 20 Jahre annualisiert. Tatsächliche Projekte bzw. Verträge zur Abwärmenutzung haben ggf. eine kürzere Laufzeit und bringen daher höhere annualisierte Investitionskosten mit sich.
- Die Kosten der Abwärmenutzung sind auf die maximale Nutzung der Abwärme ausgelegt. In der Realität könnten die Komponenten geringer dimensioniert sein, um mit niedrigeren Kosten immer noch große Teile der Abwärme einbinden zu können. Dies würde die Kosten verringern, insbesondere für volatile Profile wie dem untersuchten *Industrie*-Profil. Zusätzlich könnte über eine Strukturierung der Abwärme durch einen Speicher bei der Abwärmequelle die Auslastung erhöht werden.

Einordnung von Abwärmeprojekten[1]

- In der hier vorliegenden Analyse wird ein besonderer Fokus auf die ökonomischen quantifizierbaren Größen, konkret den Systemwert und die Kosten der Abwärmenutzung, gelegt. In der Realität spielen weitere Faktoren eine Rolle, die den Erfolg von Abwärmeprojekten maßgeblich beeinflussen. Beispiele für diese Faktoren werden im Folgenden aus Sicht der Abwärmeerzeuger und Wärmenetzbetreiber beschrieben.
- Für den Abwärmeerzeuger können bei Abwärmeprojekten neben einer möglichen Vergütung auch potenzielle Produktionsunterbrechungen, eine erhöhte Prozesskomplexität, zu gewährende Zugangsrechte, komplexe regulatorische Vorgaben sowie verfügbares und geeignetes Personal eine wichtige Rolle spielen.
- Für Wärmenetzbetreiber ist insbesondere das sogenannte Adressrisiko zu nennen. Dieses Risiko beschreibt den Fall, dass die Abwärmemenge aufgrund von Änderungen in der Produktion verringert wird oder komplett wegfällt, bevor sich die Investition amortisiert hat. Die unterschiedlichen Planungszyklen von Abwärmeerzeugern und Wärmenetzbetreibern können den Erfolg eines Projekts daher erschweren. Weiterhin können lange und umfangreiche Vertragsverhandlungen die Realisierung verzögern.

1: EWI (2024)

In allen Musterfällen gibt es Abwärmeprofile, die eine positive Marge und damit wirtschaftliche Einbindung ermöglichen könnten

Die Marge der Abwärmenutzung hängt von mehreren Charakteristika ab. So hängt der Systemwert der Abwärme von der Korrelation mit Wärmebedarf und Strompreisen zusammen. Die Kosten sind maßgeblich von der Auslastung der Infrastruktur sowie von der Temperatur der Abwärme abhängig. Ist die Auslastung niedrig, sind die spezifischen Kosten der Infrastruktur pro Kilowattstunde Abwärme hoch. Liegt die Temperatur der Abwärme unter der Vorlauftemperatur des Wärmenetzes werden die Kosten durch benötigte Wärmepumpen deutlich erhöht.

Kontinuierliche Abwärmeprofile mit hoher Auslastung, wie das untersuchte Abwärmeprofil *Rechenzentrum*, weisen einen hohen Systemwert und vergleichsweise niedrige Kosten der Abwärmenutzung auf. Die Einbindung weist daher auch bei weiteren Entfernungen eine positive Marge auf. Aufgrund der benötigten Temperaturerhöhung mit einer zusätzlichen Wärmepumpe kann die Marge im Bestandsnetz deutlich sinken.

Volatile, mit niedrigen Strompreisen korrelierende Abwärmeprofile (wie das untersuchte Abwärmeprofil *Elektrolyse)* weisen, verglichen mit den anderen Profilen, einen geringeren Systemwert auf. Im Bestandsnetz ist die Marge daher meist nur über kurze Distanzen positiv und bei höherem Abwärmeanteil oft nicht mehr gegeben. In Neubaunetzen ohne erforderliche Temperaturerhöhung kann die Nutzung dagegen über mittlere bis weite Entfernungen wirtschaftlich sein.

Vom Strompreis und Wärmebedarf unabhängige volatile Abwärmeprofile, wie das untersuchte Abwärmeprofil *Industrie*, können einen hohen Systemwert aufweisen. Durch geringe Auslastung können hohe Kosten zur Nutzung der Abwärme entstehen. Durch höhere Temperaturniveaus können hingegen Kosten für die Temperaturerhöhung in Wärmenetzen mit höheren Vorlauftemperaturen vermieden werden. Die Höhe der Marge hängt damit sehr stark von der Distanz der Wärmeleitung ab und kann bei kurzen Distanzen deutlich positiv ausfallen.

Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH (EWI)

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

+49 (0)221 650 853-60

https://www.ewi.uni-koeln.de

@ewi_koeln

EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln

Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI) ist eine gemeinnützige GmbH, die sich der anwendungsnahen Forschung in der Energieökonomik und Energie-Wirtschaftsinformatik widmet und Beratungsprojekte für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft durchführt. Annette Becker und Prof. Dr. Marc Oliver Bettzüge bilden die Institutsleitung und führen ein Team von etwa 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Das EWI ist eine Forschungseinrichtung der Kölner Universitätsstiftung. Neben den Einnahmen aus Forschungsprojekten, Analysen und Gutachten für öffentliche und private Auftraggeber wird der wissenschaftliche Betrieb finanziert durch eine institutionelle Förderung des Ministeriums für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIKE).

5

Anhang

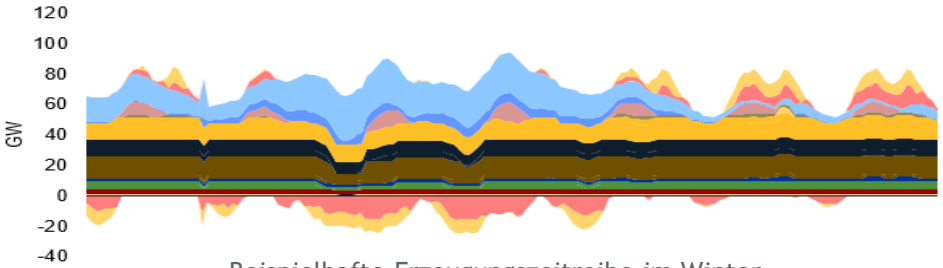
Mit dem EWI-Strommarktmodell werden Strompreise und Emissionsfaktoren ermittelt

Schematische Darstellung der Nutzung des Strommarktmodells DIMENSION

DIMENSION Dispatch

- Aktuelles EWI-Trendszenario
- Stündliche Stromnachfragen für EU27+GB+CH+NO
- Flexibilitäten: Speicher, DSM, Elektrolyse, Handel
- Wetterjahr 2015

Ergebnisse



Beispielhafte Erzeugungszeitreihe im Winter

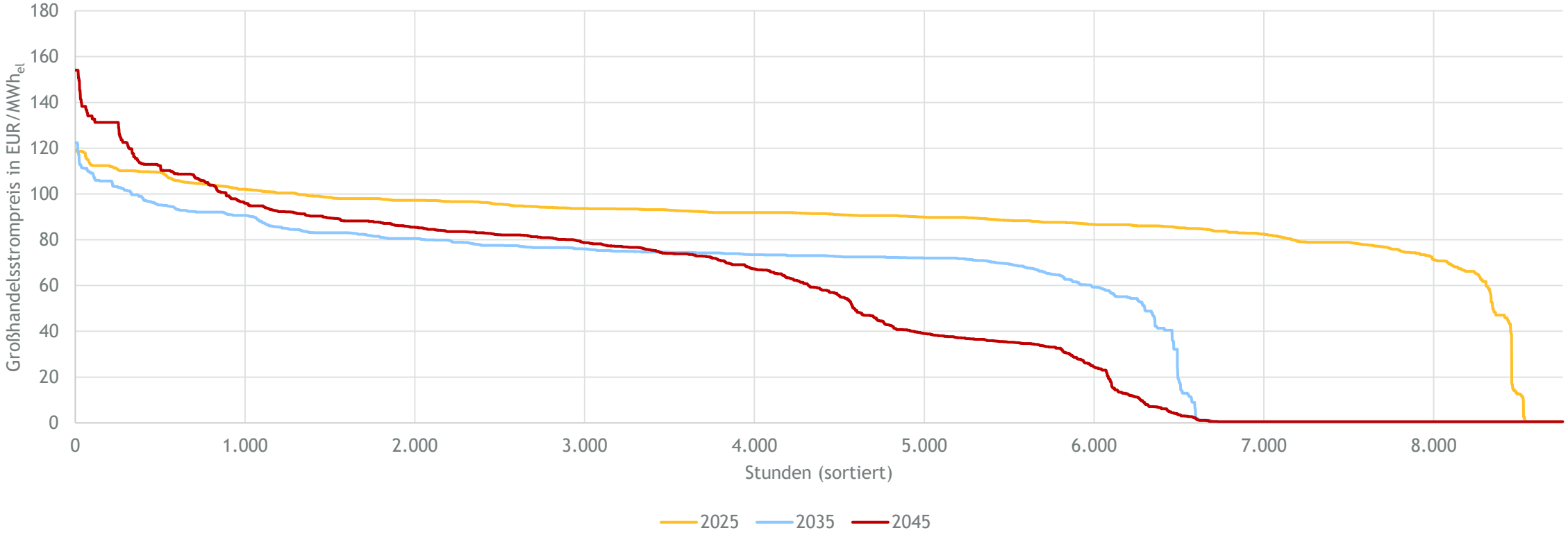
- Stündlich aufgelöste Strompreise
- Emissionsfaktoren der Stromerzeugung

Eigenschaften des Szenarios

- Mithilfe des EWI-Strommarktmodells DIMENSION werden Stromerzeugung und Handel für die Jahre 2025, 2030, 2035, 2040 und 2045 simuliert.
- Das EWI-Trendszenario entspricht einem bereits exogenen Strommarktszenario mit
  - Kohleausstieg bis 2038
  - EE-Zubau nach EEG
  - Klimaneutralität bis 2045
- Mit der Marktmodellierung werden stündliche Strompreise und Emissionsfaktoren der Stromerzeugung bestimmt.
- Die Simulation wird für das Wetterjahr 2015 durchgeführt, welches eine große Bandbreite unterschiedlicher Wettersituationen enthält.

Mit dem EWI-Strommarktmodell werden Strompreise und Emissionsfaktoren ermittelt

Jahresdauerlinie des modellbasierten Strompreises



In der Software INSEL werden stündliche Wärmebedarfszeitreihen erstellt

Schematische Darstellung der Gebäudesimulation in INSEL

Gebäudeeigenschaften

- Geometrische Eigenschaften:
  - Flächen der Bauteile
  - Volumen
  - Nutzfläche
- Energetische Eigenschaften:
  - U-Werte der Bauteile
  - Temperatur-Korrekturfaktoren

Wetter- und Nutzungsdaten

- Stündliche Außentemperatur
- Stündliche Globalstrahlung
- Nutzungsverhalten:
  - Soll-Innentemperatur
  - Heizgrenztemperatur
  - Luftwechsel
  - Warmwasser- und Strombedarfs-zeitreihen

Gebäudesimulation in INSEL

- Stündliche Bilanzierung des Wärmebedarfs:
  - Transmissionswärmeverluste (Verluste über die Gebäudehülle)
  - Lüftungswärmeverluste
  - Solare Gewinne
  - Interne Gewinne (Wärmeabgabe von Personen, Geräten und Beleuchtung)
- Generieren von PV-Erzeugungszeitreihen anhand der stündlichen Globalstrahlung

Ergebnisse

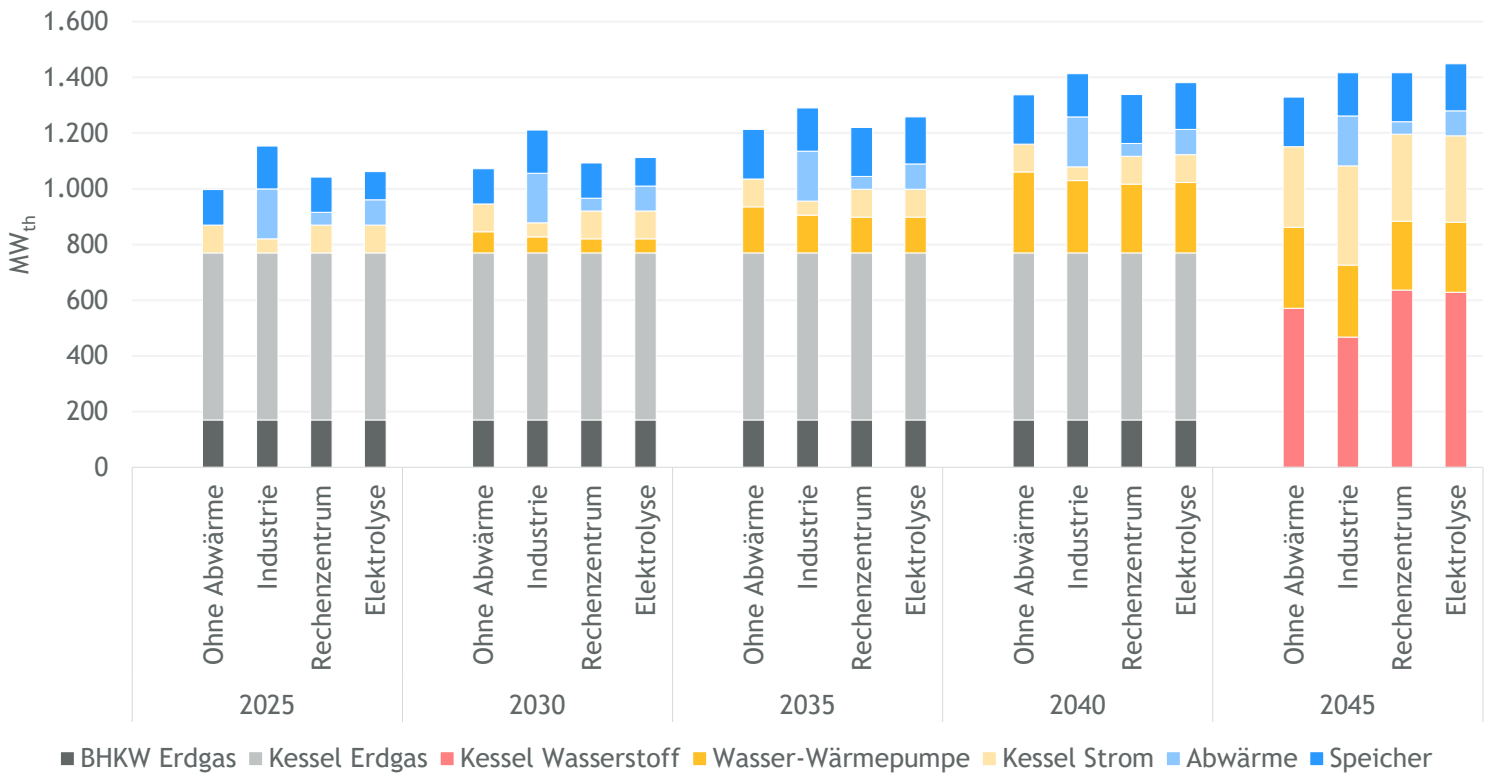
- Stündliche Bedarfszeitreihen für den Heizwärme-, Warmwasser- und Strombedarf
- Stündliche PV-Erzeugungszeitreihen der Typgebäude

Erläuterung der Simulation in INSEL

- Der stündliche Wärmebedarf wird in der Software INSEL auf Basis von Gebäudeeigenschaften, Nutzungsverhalten und Wetterdaten berechnet.
- Er gibt an, wie viel Heizwärme zugeführt werden muss, um die definierte Soll-Innentemperatur zu halten.
- Wärmeverluste entstehen durch Transmission über die Gebäudehülle sowie durch Lüften; Wärmegewinne resultieren aus solarer Einstrahlung und interner Wärmequellen.
- Basierend auf Strahlungszeitreihen und den Eigenschaften der PV-Anlage werden stündliche PV-Erzeugungszeitreihen generiert.
- Wie in DIMENSION wird als Wetterjahr das Jahr 2015 verwendet.

Bestandsnetz: Mit 25 % Abwärme werden Wärmepumpenkapazitäten früher aufgebaut

Installierte Wärmeerzeugungskapazität im Musterfall *Bestandsnetz* | *25 % Abwärme*[1]



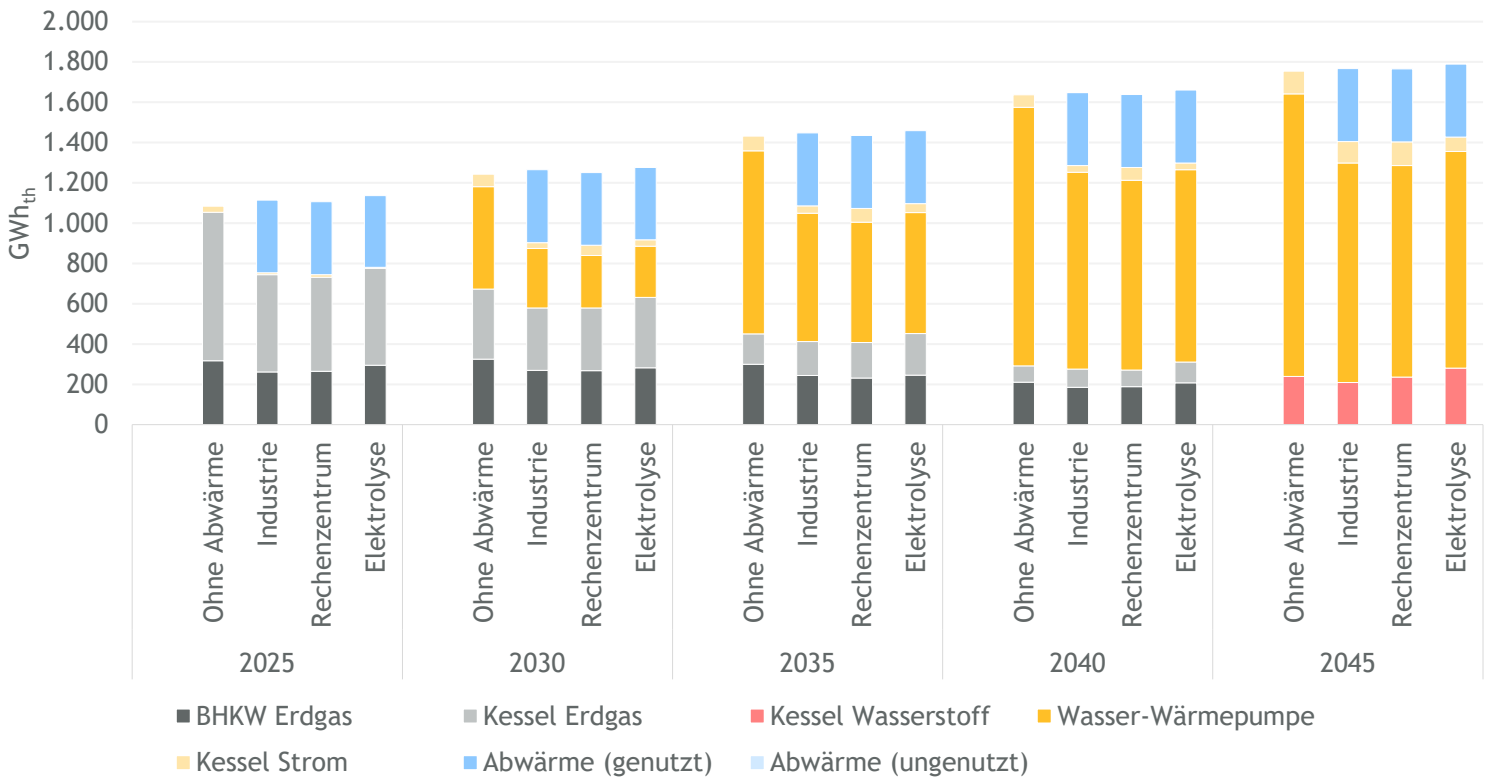
Kommentare

- Gegenüber 50 % Abwärme erfolgt der Ausbau der Wasser-Wärmepumpen früher. Zudem fallen die Unterschiede in der installierten Wärmepumpenkapazität zwischen den Musterfällen mit Abwärme geringer aus.
- Das *Industrie*-Profil eignet sich besser zur Spitzenlastdeckung; entsprechend werden bis 2040 weniger Stromkessel und 2045 weniger Wasserstoffkessel benötigt als in den anderen Fällen.
- Der Speicherausbau bleibt im Gegensatz zu den 50 % Abwärme Musterfällen überwiegend gering, da Stunden mit Abwärmeüberschuss seltener sind. Lediglich in 2025 und 2030 zeigt sich vereinzelt ein zusätzlicher Speicherbedarf verglichen mit dem Fall ohne Abwärme.

1: Unterschiede in den installierten Kapazitäten der Abwärmequellen ergeben sich aus unterschiedlichen Kapazitätsfaktoren bei gleicher Abwärmemenge (siehe Seite 22).

Bestandsnetz: Im Musterfall mit 25 % Abwärme kann die Abwärme vollständig genutzt werden

Wärmeerzeugung im Musterfall *Bestandsnetz* | *25 % Abwärme*

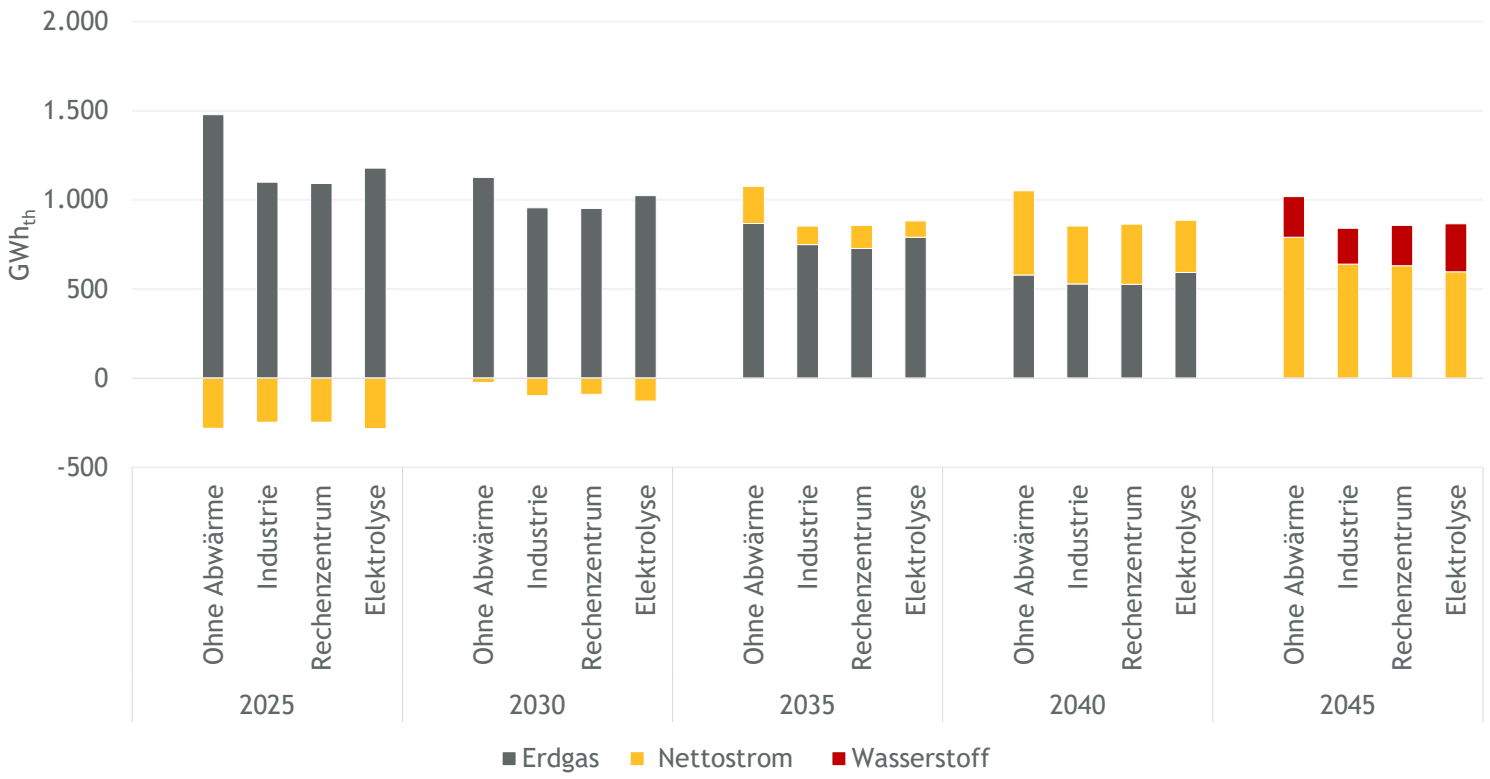


Kommentare

- Die geringere Abwärmeverfügbarkeit gegenüber 50 % wird weitgehend durch Wasser-Wärmepumpen ersetzt; fossile Anlagen bleiben regulatorisch limitiert.
- Die Abwärme kann in allen Jahren vollständig genutzt werden, da es kaum noch Stunden mit Abwärmeüberschuss gibt.
- Die geringen Überschüsse reduzieren auch den Speicherbedarf und damit die Speicherverluste, sodass es in der absoluten erzeugten Wärmemenge kaum Unterschiede zwischen den Musterfällen gibt.

Bestandsnetz: Auch ein geringerer Anteil Abwärme reduziert den Strom- und Gasbedarf

Einsatz von Energieträgern im Wärmenetz[1,2] im Fall *Bestandsnetz | 25 % Abwärme*



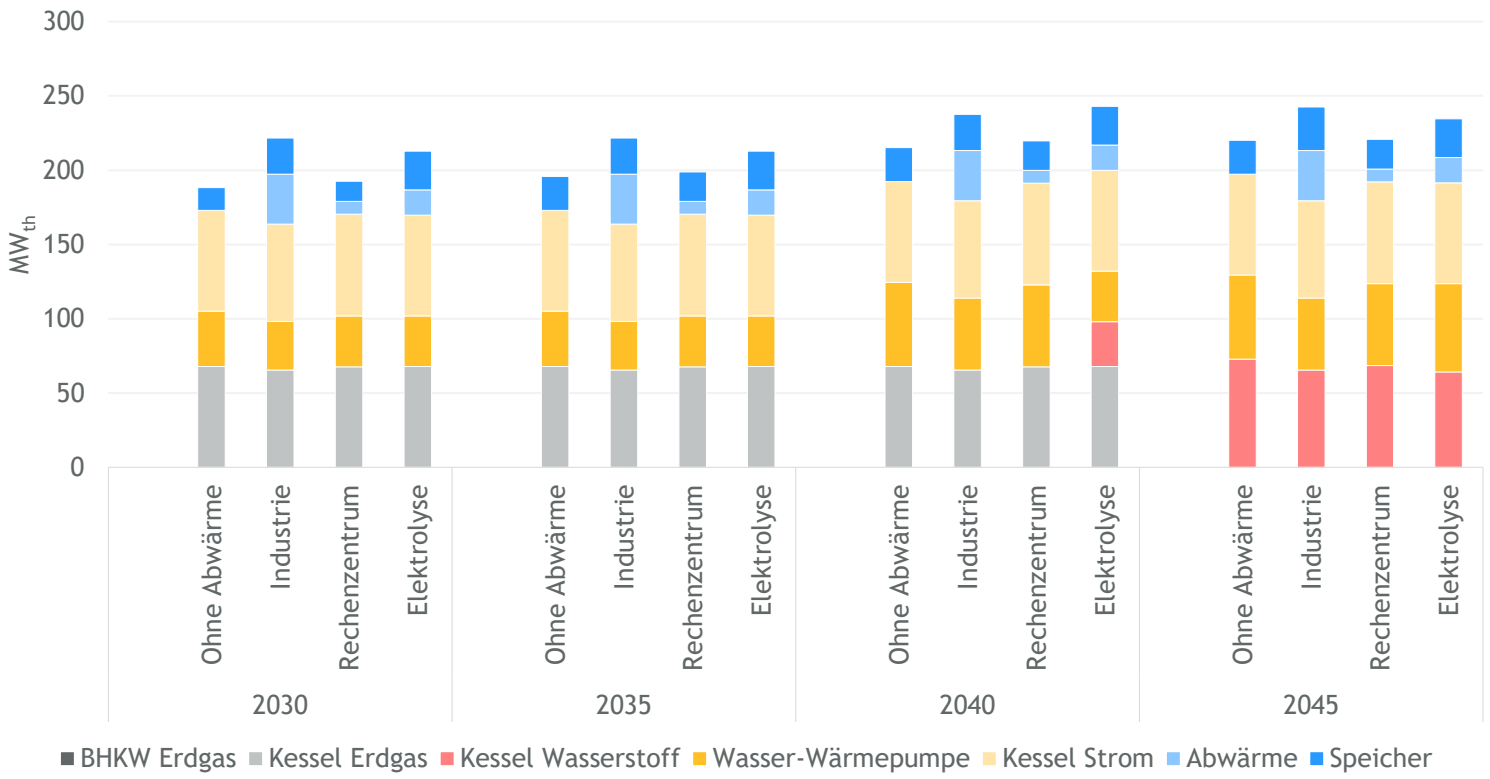
Kommentare

- Im Energieträgereinsatz gibt es in den Musterfällen *Bestandsnetz | 25 % Abwärme* nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Abwärmequellen.
- Beim *Elektrolyse*-Profil ist der Strombezug tendenziell niedriger, weil der Betrieb in Niedrigpreisstunden erfolgt und in diesen Stunden ein großer Teil des Wärmebedarfs bereits durch Abwärme gedeckt ist. In Stunden ohne Abwärme sind die Strompreise häufig hoch; entsprechend übernehmen Erdgas- bzw. Wasserstoffkessel mehr Last, wodurch der Gas- bzw. Wasserstoffbedarf leicht steigt.

1: Abwärme wird nicht als Energieträger bilanziert, da der Energiebedarf in der Industrie anfällt und die Wärme dem Wärmenetz als Abfallprodukt zur Verfügung steht.

Neubaunetz: Eine geringere Abwärmeverfügbarkeit sorgt im Neubaunetz für eine leicht höhere Wärmepumpenkapazität

Installierte Wärmeerzeugungskapazität im Musterfall *Neubaunetz* | *25 % Abwärme*[1]



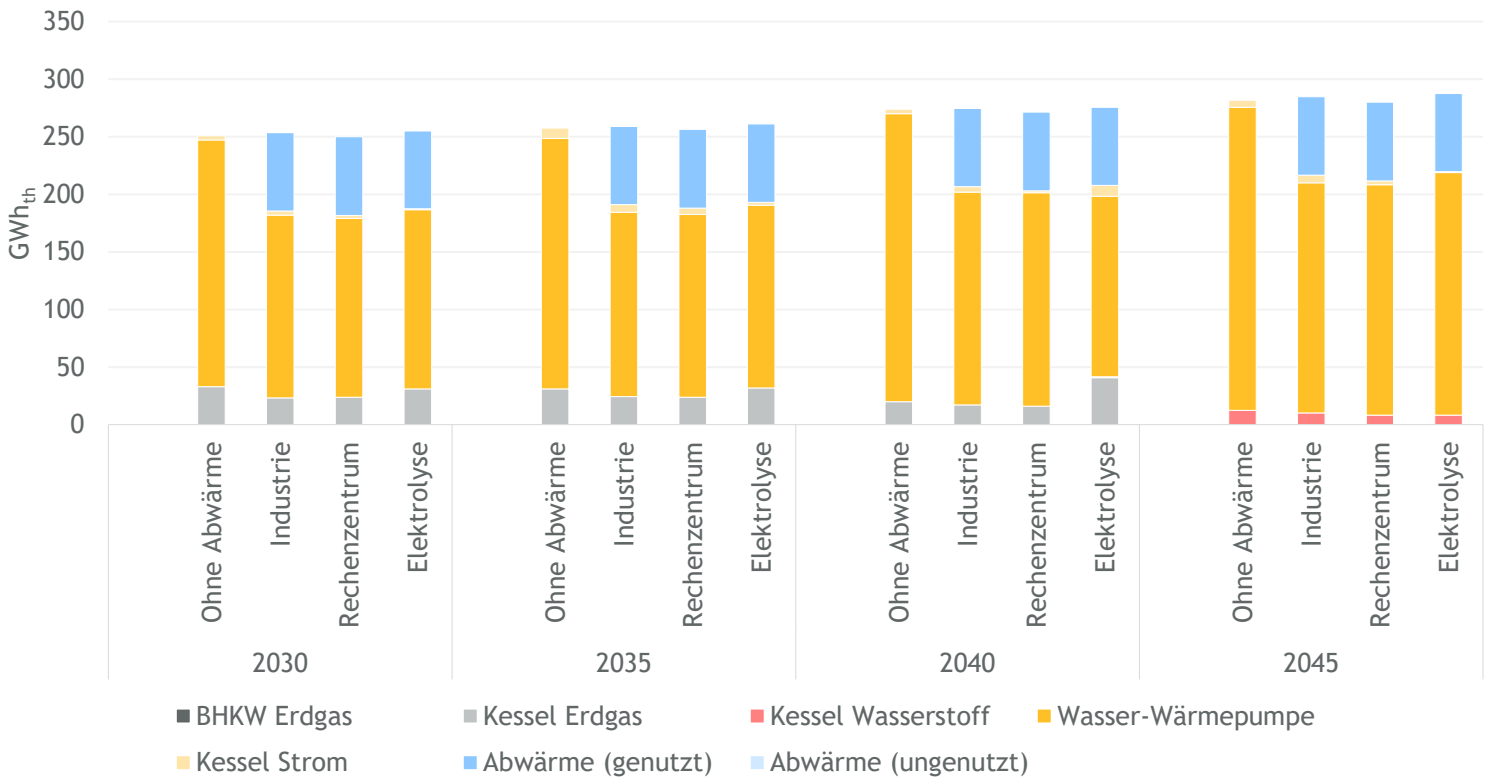
Kommentare

- Im Neubaunetz mit 25 % Abwärme zeigt sich in allen Jahren eine leicht höhere Wärmepumpenkapazität als im Fall mit 50 % Abwärme. Wasserstoffkessel werden dagegen erst später eingesetzt und stattdessen Stromkessel für die Spitzenlast ausgebaut.
- Gegenüber dem Bestandsnetz mit 25 % Abwärme ist die Erdgas-Kesselleistung deutlich geringer; BHKWs werden gar nicht eingesetzt.
- Lediglich das Abwärmeprofil *Industrie* kann die installierte Wärmeerzeugungskapazität signifikant reduzieren; dafür erhöht sich der Speicherbedarf, um die Abwärme zeitlich auszugleichen.

1: Unterschiede in den installierten Kapazitäten der Abwärmequellen ergeben sich aus unterschiedlichen Kapazitätsfaktoren bei gleicher Abwärmemenge (siehe Seite 22).

Neubaunetz: 25 % Abwärme führen zu einer strombasierteren Wärmeerzeugung als im Fall mit mehr Abwärme

Wärmeerzeugung im Musterfall *Neubaunetz* | *25 % Abwärme*

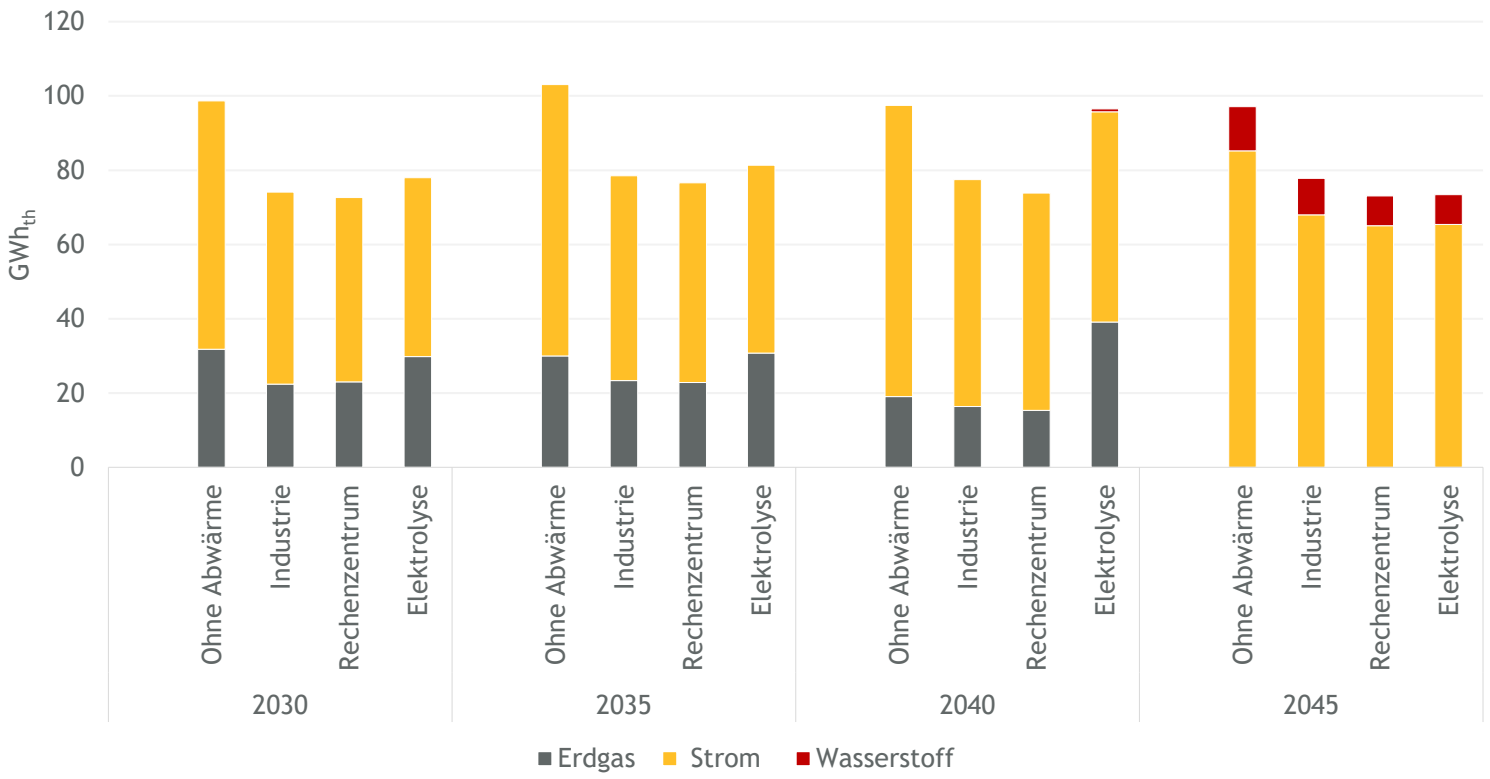


Kommentare

- Wie im Bestandsnetz gilt: Bei 25 % Abwärme kann auch im Neubaunetz durch den geringeren Anteil die gesamte Abwärme genutzt werden.
- Trotz höherer Stromkessel-Kapazität gegenüber Wärmepumpen leisten Stromkessel kaum einen Beitrag zur Wärmeerzeugung. In Spitzenlaststunden ist tendenziell mit geringer PV-Einspeisung und damit einem vergleichsweise hohen Strompreis zu rechnen, sodass die Nutzung der gasbetriebenen Technologien oftmals günstiger ist.
- Die Wärme wird insgesamt überwiegend durch Wärmepumpen bereitgestellt; die Unterschiede zwischen den verschiedenen Abwärmequellen sind gering.

Neubaunetz: 25 % Abwärme sorgen für moderate Einsparungen im Einsatz von Energieträgern

Einsatz von Energieträgern im Wärmenetz[1,2] im Musterfall *Neubaunetz* | *25 % Abwärme*



Kommentare

- Die Einsparungen im Einsatz von Energieträgern fallen in den Musterfällen mit 25 % spürbar geringer aus als mit 50 % Abwärme.
- Beim *Elektrolyse*-Profil sinkt zwar der Stromverbrauch, in Stunden ohne Abwärme steigt dafür der Gasverbrauch, da kesselbasierte Erzeugung durch die hohen Strompreise dann günstiger ist als Wärmepumpen oder Stromkessel.
- Insgesamt stammt der Rückgang vor allem aus dem geringeren Strombezug.

1: Abwärme wird nicht als Energieträger bilanziert, da der Energiebedarf in der Industrie anfällt und die Wärme dem Wärmenetz als Abfallprodukt zur Verfügung steht.