Bedingungen für einen ökologischen Betrieb von sektorgekoppelten Wärmepumpen in der Fernwärmeversorgung

Aus der Dissertation mit dem Thema: „Technoökonomische Analyse und Optimierung von sektorgekoppelten Großwärmepumpen als Dekarbonisierungsoption der Fernwärme“

1 Einführung

Rund 50 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Bereitstellung von Wärme. Die Wärmewende ist daher von zentraler Bedeutung um die CO_2-Emission Deutschlands zu senken [1].

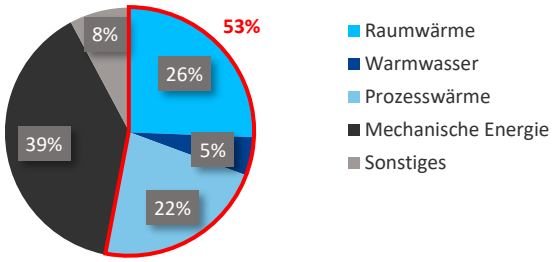


Bild 1.1: 53 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfielen 2018 auf die Bereitstellung von Wärme.

Die Wärmepumpe (WP) hat als Technologie zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung in den letzten Jahren deutlich an Interesse gewonnen. Schon jetzt kommt es zu Lieferengpässen sowohl im privaten Bereich als auch im Bereich größerer WP im industriellen Stil, wie sie in der Fernwärmeversorgung Einsatz finden. Der Fernwärmeversorgung obliegt ebenfalls eine zentrale Rolle um die Klimaschutzziele zu erreichen: Entfallen momentan in Deutschland lediglich 13,9 % (2019) der Wärmebereitstellung auf die Fernwärme, so zeigen wissenschaftliche Analysen, (genannt sei hier beispielsweise die vielbeachtete Studie "Heat Roadmap Europe"), dass die Deckung durch Fernwärme bis 2050 mindestens 50 % erreichen muss, um die Klimaziele zu erreichen [2], [3]. Zusätzlich wird ein Mindestanteil von 25-30 % durch elektrisch betriebene Großwärmepumpen zu decken sein. Hier muss Deutschland den aktuellen Anteil von weniger als 1 % WP somit deutlich steigern [4].

Damit stehen Deutschland sowie andere führenden Industrienationen vor einer Technologiewende. Lehren aus der Vergangenheit zeigen, dass nötige regulatorische Weichenstellungen mit fortlaufender Zeit mit deutlichem Mehraufwand und Investitionen gegenüber einer frühzeitigen Implementierung verbunden sind. Diese Chance gilt es jetzt zu nutzen. Als Teil meiner Dissertation untersuche ich die wahrscheinlichste Einbindung zukünftiger WP in bestehende und zukünftige Fernwärmenetze und leite entsprechende ökologische Auswirkungen ab. Diese sollen zur Entscheidungsfindung eines sinngerechten Umgangs mit WP in der Fernwärmeversorgung beitragen, um das Dekarbonisierungspotential der sektorgekoppelten WP zu maximieren.

2 Wärmepumpen in der Fernwärme

2.1 Standort zukünftiger Wärmepumpen

Die in Deutschland mit 83 % vorherrschende Wärmebereitstellung in Fernwärmenetzen bilden Kraftwerke, die in der sog. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) neben Wärme auch Strom generieren [5]. Für den Bau zukünftiger WP in bestehende FWN (Sektorkopplung) bietet sich für Energieversorger fast ausschließlich der Erzeugerpark als Standort an. Gründe dafür sind der i.d.R. vorhandene Bauplatz, der gerade im urbanen Umfeld von FWN rar und teuer ist. Weiterhin ist sämtliche Infrastruktur zur Einkupplung der Wärme in das FWN bereits örtlich vorhanden. Zusätzlich liegt eine Vielzahl von konventionellen Kraftwerken an größeren Gewässern. Diese bieten sich als natürliche Wärmequelle an, da sie gegenüber der Luft in der Heizperiode eine höhere Temperatur aufweisen. Es ist damit als gegeben anzunehmen, dass der Standort zukünftiger WP der Erzeugerpark des FWN-Betreibers ist.

2.2 Stromversorgung zukünftiger Wärmepumpen

Befindet sich eine WP im Erzeugerpark eines Bestandsnetzes, so bieten sich zwei Möglichkeiten der Stromversorgung: So kann die WP mit Eigenstrom aus der KWK ($P_{el,KWK}$) betrieben werden (Bild 2.1), ebenso ist ein Betrieb mit Fremdstrom aus dem Stromnetz ($P_{el,aux}$) möglich (Bild 2.2).

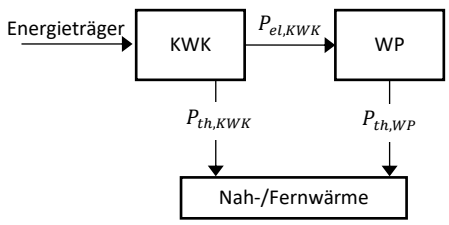


Bild 2.1: Eigenstrombezug der WP von Strom aus einer KWK.

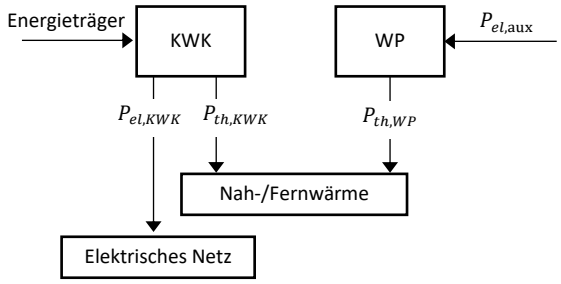


Bild 2.2: Fremdstrombezug der WP aus dem elektrischen Netz.

Gegenüber dem aus dem elektrischen Netz bezogenen Fremdstrom bietet sich für den Energieversorger die Nutzung von Eigenstrom an. Die bei Eigenstrombezug entfallenden Abgaben (Stromsteuer, Netznutzungsentgelte, etc.) sorgen für einen 23 % geringeren Strompreis des Eigenstroms gegenüber dem Netzstrom (Stand August 2022). Zusätzlich entfallen Initialkosten durch zusätzliche Messtechnik, die ein Fremdstrombezug mit sich bringt. Selbst nach Wegfall der EEG-Umlage, die in Kombination mit den genannten Umlagen vor dem 1.7.2022 für einen bis zu 70 % geringeren Eigenstrompreis gesorgt hat, ist aufgrund des nach wie vor deutlichen ökonomischen Vorteils des Eigenstrombezugs von einem WP Betrieb mit Eigenstrom auszugehen [6].

2.3 Ökologie der WP mit Eigenstrombezug

Bei Entscheidung zum Betrieb mit Eigenstrom hängt die spezifische Treibhausgas-Emission ($sp.E$ berechnet in CO_2-Äquivalenten) der ausgekoppelten Wärme der WP neben ihrer Effizienz (COP, Coefficient of Performance) direkt von der $sp.E$ des Stroms ab. Im anzunehmenden Fall der Eigenstromversorgung entstammt dieser Strom für die große Mehrheit (83 %) der bestehenden FWN aus einer KWK. Da bei einer KWK Strom und Wärme generiert werden, stellt sich die Frage nach der Aufteilung der bei der Verbrennung fossiler Energieträger freiwerdenden CO_2-Emissionen auf Strom und Wärme (Allokation).

Die Jahrelang verwendeten Allokationsmethoden basieren auf energetischen Bilanzierungen. Diese sind aus Sicht der Kraftwerksbetreiber vorteilhaft, da je nach Wahl der Allokationsmethodik die CO_2-Emissionen mit großem Spielraum zwischen Strom und Wärme aufteilbar sind. Diese sind jedoch wissenschaftlich umstritten, da die Qualität der Energie nicht berücksichtigt wird und somit der zweite Hauptsatz der Thermodynamik nicht erfüllt ist [7]. Eine exergetische Betrachtung erfüllt sowohl den ersten als auch den zweiten Hauptsatz und ist daher zur Ermittlung der spezifischen CO_2-Emission des KWK-Stroms vorzuziehen [8]. Für diese Arbeit wurde die verbreitete exergetische Carnot-Allokationsmethode gewählt. Die für andere Methoden nötigen Referenzwirkungsgrade, die durch ihre Definition Möglichkeit zur Einflussname bieten, entfallen hierbei ebenfalls.

3 Stand der Forschung

Da die spezifische CO_2-Emission der WP-Wärme ($sp.E_{th,WP}$) von COP und der spezifischen Emission des Eigenstroms abhängt ($sp.E_{el,KWK}$), ist es das Ziel meiner Arbeit, einen Zusammenhang zwischen COP der WP und der Ökologie abzuleiten. In anderen Worten soll die Frage beantwortet werden, welchen COP eine WP *mindestens* erreichen muss, damit ihr Betrieb im Erzeugerpark zu einer ökologischen Aufwertung der Verbundwärme beiträgt.

Ein Ökologischer Betrieb der Wärmepumpe im FWN ist dann gegeben, wenn die spezifische CO_2-Emission der WP-Wärme geringer als die der KWK-Wärme ist:

$$sp.E_{th,KWK} > sp.E_{th,WP} \tag{3.1}$$

Die ausgekoppelte Wärme der WP lässt sich für den Eigenstrombezug in der KWK-WP Kombination in Abhängigkeit der spezifischen Emission des Stroms ($sp.E_{el,KWK}$) und des COP definieren zu:

$$sp.E_{th,WP} = \frac{sp.E_{el,KWK}}{COP_{WP}} \tag{3.2}$$

Umgeformt nach dem COP ergibt sich Gleichung (3.2) zu:

$$COP_{WP} = \frac{sp.E_{el,KWK}}{sp.E_{th,WP}} \tag{3.3}$$

Mit den Gleichungen (3.1) und (3.3) lässt sich der gesuchte Zusammenhang zwischen COP und Ökologie herstellen: Der minimal benötigte COP zur Verbesserung der Verbundwärme (COP_{min}), ergibt sich somit in Abhängigkeit der spezifischen CO_2-Emissionen von Strom und Wärme der KWK zu:

$$COP_{min} \geq \frac{sp.E_{el,KWK}}{sp.E_{th,KWK}} \tag{3.4}$$

3.1 Vereinfachung der Gleichung

Um Gleichung (3.4) weiter zu analysieren, bedarf es einiger allgemeiner Formeln, die im Zuge dieser Zusammenfassung nur kurz vorgestellt werden:

Die maximal mögliche Wandlungseffizienz, die eine KWK unter idealen Bedingungen erreichen kann, ist als der Carnot Wirkungsgrad bekannt. Dieser hängt von der Temperaturdifferenz zwischen heißem (T_O) und kaltem Reservoir (T_U) ab, zwischen denen sie operiert.

$$\eta_C = 1 - \frac{T_U}{T_O} = \frac{T_O - T_U}{T_O} \tag{3.5}$$

Da die Wärmepumpe den Gegenpart zur reversibel arbeitenden Wärmekraftmaschine bildet, entspricht ihre maximale Effizienz dem Kehrwert und ergibt sich zu:

$$\eta_{WP} = \frac{1}{\eta_C} = \frac{1}{1 - \frac{T_U}{T_O}} = \frac{T_O}{T_O - T_U} \tag{3.6}$$

Im Falle der Betrachtung eines KWK-Heizkraftwerkes entspricht T_U der Umgebungstemperatur und T_O der Auskopplungstemperatur des Vorlaufes. Um die Fehlerquelle zeitlicher Schwankungen ($T_O \neq const.$) auszuschließen, wird T_O über das logarithmische Mittel bestimmt.

3.2 Exergetische Allokation nach Carnot

Mithilfe des Carnot-Wirkungsgrades lassen sich die Allokationsfaktoren a_{th} und a_{el}, die der prozentualen Aufteilung des Brennstoffs auf die Produkte Strom und Wärme entsprechen, berechnen. Es gilt dabei $a_{th} + a_{el} = 1$. Die Allokationsfaktoren definieren somit ebenfalls die GHG-Emission beider Produkte. Sie ergeben sich in Abhängigkeit des elektrischen (η_{el}) und thermischen Wirkungsgrades (η_{th}) der KWK-Anlage, sowie des Carnot Wirkungsgrades zu:

$$a_{th} = \frac{\eta_C \cdot \eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}} \tag{3.7}$$

$$a_{el} = 1 - a_{th} \tag{3.8}$$

Über den Allokationsfaktor lassen sich final die spezifischen Emissionen für Strom $sp.E_{el}$ und Wärme $sp.E_{th}$ in Abhängigkeit der spezifischen Emission des eingesetzten Brennstoffs ($sp.E_{BrSt}$) berechnen zu:

$$sp.E_{th,KWK} = \frac{a_{th}}{\eta_{th}} \cdot sp.E_{BrSt} \tag{3.9}$$

$$sp.E_{el,KWK} = \frac{1 - a_{th}}{\eta_{el}} \cdot sp.E_{BrSt} \tag{3.10}$$

4 Herleitung Effizienzgrenzwert

Beginnend mit (3.4) ergibt sich durch Einsetzen der bekannten Zusammenhänge aus (3.9) und (3.10) folgende Gleichung:

$$COP_{min} = \frac{\frac{1 - a_{th}}{\eta_{el}} \cdot sp.E_{Fuel}}{\frac{a_{th}}{\eta_{th}} \cdot sp.E_{Fuel}}$$

Durch Einsetzen des thermischen Allokationsfaktors aus (3.7) ist der Effizienzgrenzwert nun in Abhängigkeit der thermischen, elektrischen und des Carnot Wirkungsgrades definiert. Dieser Term offenbart nach weiterer Vereinfachung einen interessanten Zusammenhang. Da dieser in der Literatur nicht zu finden ist, ist die Herleitung, basierend auf anerkannten Gleichungen, als Beleg angefügt:

$$\begin{aligned}
COP_{min} &= \left(\frac{1 - a_{th}}{\eta_{el}}\right) \cdot \left(\frac{\eta_{th}}{a_{th}}\right) \\
&= \frac{\eta_{th} - \eta_{th} \cdot a_{th}}{\eta_{el} \cdot a_{th}} \\
&= \frac{\eta_{th} - \eta_{th} \cdot \left(\frac{\eta_C \cdot \eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}}\right)}{\eta_{el} \cdot \left(\frac{\eta_C \cdot \eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}}\right)} \\
&= \frac{\eta_{th} - \left(\frac{\eta_{th}^2 \cdot \eta_C}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}}\right)}{\left(\frac{\eta_{el} \cdot \eta_C \cdot \eta_{th}}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}}\right)} \\
&= \frac{\left(\eta_{th} - \frac{\eta_{th}^2 \cdot \eta_C}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}}\right) \cdot (\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th})}{(\eta_{el} \cdot \eta_C \cdot \eta_{th})} \\
&= \frac{\left(\frac{\eta_{th} \cdot (\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}) - \eta_{th}^2 \cdot \eta_C}{\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}}\right)}{(\eta_{el} \cdot \eta_C \cdot \eta_{th}) \cdot (\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th})} \\
&= \frac{\eta_{th} \cdot (\eta_{el} + \eta_C \cdot \eta_{th}) - \eta_{th}^2 \cdot \eta_C}{(\eta_{el} \cdot \eta_C \cdot \eta_{th})} \\
&= \frac{\eta_{th} \cdot \eta_{el} + \eta_{th}^2 \cdot \eta_C - \eta_{th}^2 \cdot \eta_C}{(\eta_{el} \cdot \eta_C \cdot \eta_{th})} \\
&= \frac{\eta_{el} \cdot \eta_{th}}{\eta_{el} \cdot \eta_C \cdot \eta_{th}}
\end{aligned}$$

$$COP_{min} = \frac{1}{\eta_C} = \frac{T_O}{T_O - T_U} \tag{4.1}$$

Der Effizienzgrenzwert für eine WP, die mit Strom aus einer KWK betrieben wird vereinfacht sich somit zu obigem Term, der einzig in Abhängigkeit des Carnot-Wirkungsgrades bzw. den Temperaturniveaus T_O and T_U angegeben werden kann. Dieser Term entspricht weiterhin dem aus Gleichung (3.6) bekannten idealen Wirkungsgrad einer Wärmepumpe.

4.1 Erkenntnisse

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Umformung lassen sich in drei Punkten zusammenfassen:

1) Wenn eine Wärmepumpe mit Eigenstrom aus einer KWK betrieben wird, so entspricht der benötigte COP_{WP} für eine ökologische Verbesserung dem idealen Wirkungsgrad des reversiblen Wärmepumpen-Prozesses zwischen den Temperaturniveaus T_O und T_U.
2) Ein irreversibler Prozess ist in der Realität nicht möglich. Daraus folgt für die WP die mit KWK-Strom betrieben wird und Wärme mit derselben Temperatur wie der KWK-Prozess bereitstellt, dass unter Nutzung einer

ambienten Wärmequelle eine ökologische Verbesserung nicht erreichbar ist.

3) Da über die Umformung sowohl der thermische als auch der elektrische KWK-Wirkungsgrad aus der Gleichung entfallen wird klar, dass dieser Zusammenhang universal für jede KWK unabhängig des eingesetzten Brennstoffes und der Effizienz gültig ist. (Auch Strom aus einer KWK, betrieben mit 100 % biogenem Brennstoff, der in der Verbrennung als klimaneutral anzusehen ist, ermöglicht einer WP keine Aufwertung).

5 Randbedingungen für einen ökologischen Wärmepumpen-Betrieb mit Eigenstrom

Wie in Erkenntnis 2) bereits angeklungen, gibt es zwei Variablen die einen ökologischen Betrieb dennoch ermöglichen. Dazu muss die Wärmequelltemperatur der WP von $T_{U,KWK}$ abweichen, (z.B. durch Nutzung einer Abwärmequelle), oder die Auskopplungstemperatur gegenüber der KWK gesenkt werden: $T_{O,WP} \leq T_{O,KWK}$.

Die Grenzen hierfür lassen sich aufgrund des durch die Umformung vereinfachten Zusammenhangs leicht darstellen. Hierfür reicht es einen Verlauf des COP_{WP} mit dem Verlauf des hergeleiteten Effizienzgrenzwertes COP_{min} zu betrachten. Dies soll anhand eines Beispiels an einem durchschnittlichen Tag in der Heizperiode in Deutschland verdeutlicht werden. Für diesen Tag beträgt die Umgebungstemperatur T_A = 10 °C und die das FWN versorgende KWK koppelt Warmwasser auf einer durchschnittlichen Temperatur von $T_{O,KWK}$ = 100 °C aus. Für den Betreiber der eine WP plant stehen zwei potentielle Wärmequellen zur Verfügung: ein oberflächennahes Gewässer mit einer Wärmequelltemperatur von T_S = 10 °C und eine Abwärmequelle mit T_S = 60 °C aus einer nahegelegenen industriellen Fertigung. In Bild 5.1 sind die Verläufe der COP_{WP} (schwarz) und der Verlauf des nötigen COP_{min} für einen ökologischen Betrieb (rot) dargestellt.

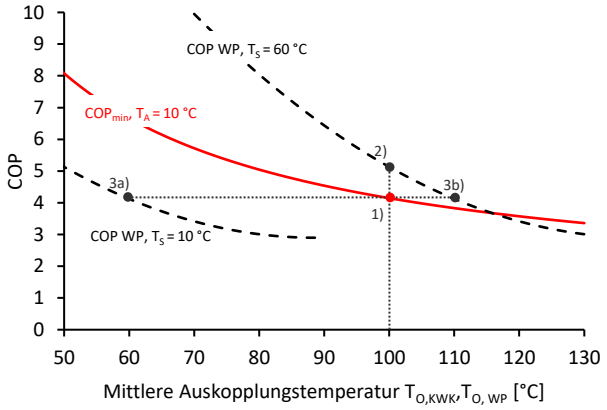


Bild 5.1: Rückschlüsse über die Randbedingungen eines ökol. Betriebs anhand der COP-Verläufe (schwarz) sowie dem Effizienzgrenzwert (rot).

Aus dieser vergleichenden Darstellung lassen sich drei hauptsächliche Schlussfolgerungen ziehen:

1) Der Effizienzgrenzwert kann für jede mögliche Auskopplungstemperatur bestimmt werden. (In obigem Beispiel für $T_{O,KWK}$ = 100 °C: COP_{min} = 4.1).
2) Vertikale Schnittlinie: Der COP_{WP}, der von der WP bei gleicher mittlerer Auskopplungstemperatur ($T_{O,WP} = T_{O,KWK}$) erreicht werden kann, übersteigt bei Nutzung der Abwärmequelle den Effizienzgrenzwert. Ein Ökologischer Betrieb ist hier möglich, nicht jedoch für die Gleiche WP die auf das Oberflächengewässer als Wärmequelle zurückgreift. Zusätzlich lässt sich durch das Verhältnis der Punkte entlang der Vertikalen eine Abschätzung über die x-fach geringere/höhere Emission durch den WP Betrieb über die KWK treffen (WP mit Abwärmequelle: 5.1 / 4.1 = 1.24-fach geringere CO_2-Emission der WP-Wärme gegenüber der KWK-Wärme).
3) Horizontale Schnittlinie: Die Betrachtung dieser Schnittlinie ermöglicht eine Aussage über die maximal mögliche Auskopplungstemperatur der WP, bis zu der ein ökologischer Betrieb möglich ist. Für eine Wärmequelltemperatur von:
   a) T_S = 10 °C, ist eine maximal mögliche Auskopplungstemperatur von $T_{O,WP}$ = 60 °C erreichbar, bevor eine ökologische Verschlechterung durch den WP-Betrieb eintritt.
   b) T_S = 60 °C, ist eine maximale Auskopplungstemperatur von bis zu $T_{O,WP}$ = 110 °C möglich, bis eine ökologische Verschlechterung eintritt.

5.1 Mehrwert für die Planungsphase zukünftiger Wärmepumpen Projekte

Die vorgestellte grafische Darstellung lässt sich für eine Bewertung der Ökologie geplanter WP nutzen. Dazu sind in Anlehnung an Bild 5.1 verschiedene Verläufe des hergeleiteten COP_{min} und COP_{WP} angegeben. Diese sind der Übersichtlichkeit halber in Diagramme mit Abwärmequellen und ambiente Wärmequellen aufgeteilt. In Bild 6.1 ist der relevantere Fall der Abwärmequellen dargestellt. Die COP-Verläufe der WP basieren auf einer Gleichung, die aus den Herstellerangaben 38 realisierter Wärmepumpen im industriellen Stil (P_{th} ≤ 1 MW_{th}) hervorgeht (R^2 = 0,814). Dies soll bereits in der Planungsphase (vor Kenntnis einer genauen COP-Kurve) eine fundierte Analyse ermöglichen.

6 Ökologie im Kontext

Um einen Eindruck über die maximal mögliche Emissionsminderung einer WP unter Eigenstrombezug zu erhalten ist es hilfreich, den ökologisch bestmöglichen Fall aus Bild 6.1 heranzuziehen und in den Kontext heutiger Energieerzeugung zu setzen. So könnte unter idealen Bedingungen mit

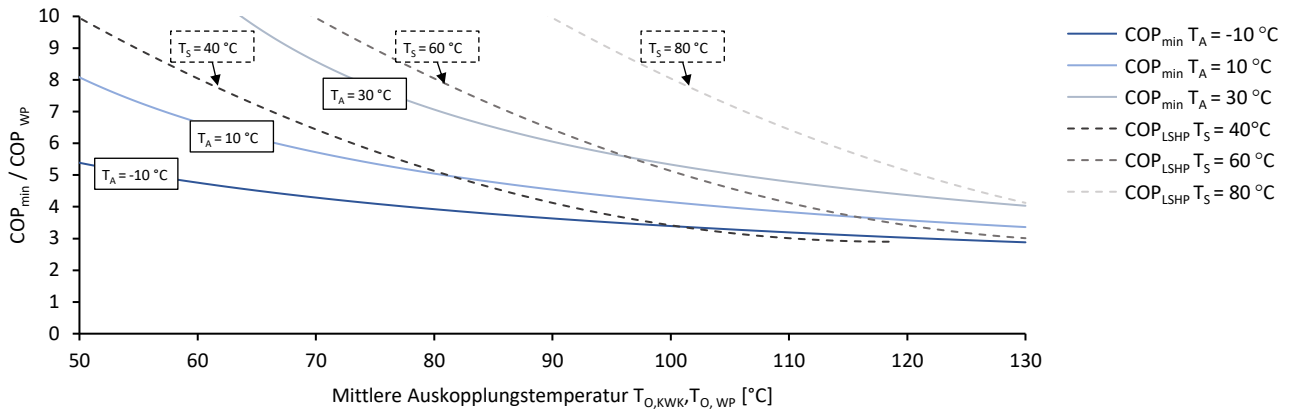


Bild 6.1: COP-Kurven für WP mit Nutzung einer Abwärmequelle im Temperaturbereich 40 °C ≤T_S ≤ 80 °C (gestrichelt), sowie der erforderliche Effizienzgrenzwert (durchgezogene Linie) in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur im Bereich -10 °C ≤T_A ≤ 30 °C zur Bestimmung der Randbedingungen eines ökologischen WP-Betriebs.

einer Umgebungstemperatur von T_U = -10 °C, sowie einem unrealistisch geringen Temperaturhub der WP von T_{Hub} = 10 °C eine maximal 2.7-fach geringere sp.CO_2-Emission gegenüber der KWK-Wärme erreicht werden.

In Bild 6.2 sind die durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen der Wärme aus KWK, WP mit KWK-Eigenstrom sowie WP mit Fremdstrom betrieben, dargestellt. Diese basieren auf einer dynamischen Simulation der drei gängigsten KWK in Deutschland (befeuert mit Kohle, Siedlungsmüll und Gas). Die Wärmepumpe greift dabei auf den Fluss Neckar als Wärmequelle zurück. Sämtliche Messwerte und Zeitreihen liegen in stündlicher Auflösung über den Zeitraum eines Jahres vor.

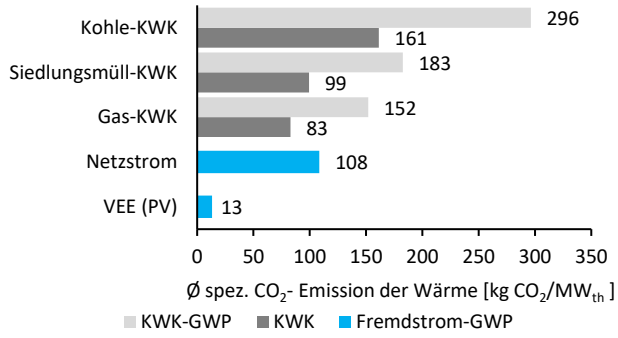


Bild 6.2: Jahresdurchschnitt der spezifischen CO_2-Emission der Wärme aus KWK (dunkelgrau), WP mit Eigenstrom betrieben (hellgrau), sowie der WP betrieben mit Fremdstrom (türkis).

Die Betrachtung bestätigt die Erkenntnisse aus der Herleitung des Effizienzgrenzwertes indem deutlich wird, dass ein Betrieb der WP mit KWK-Eigenstrom stets ökologisch nachteilig ausfällt. Wird die gleiche WP jedoch mit Netzstrom oder mit Strom aus Photovoltaik betrieben, so ist eine 7- bis 12-fach geringere CO_2-Emission der WP-Wärme gegenüber den gängigen KWK möglich.

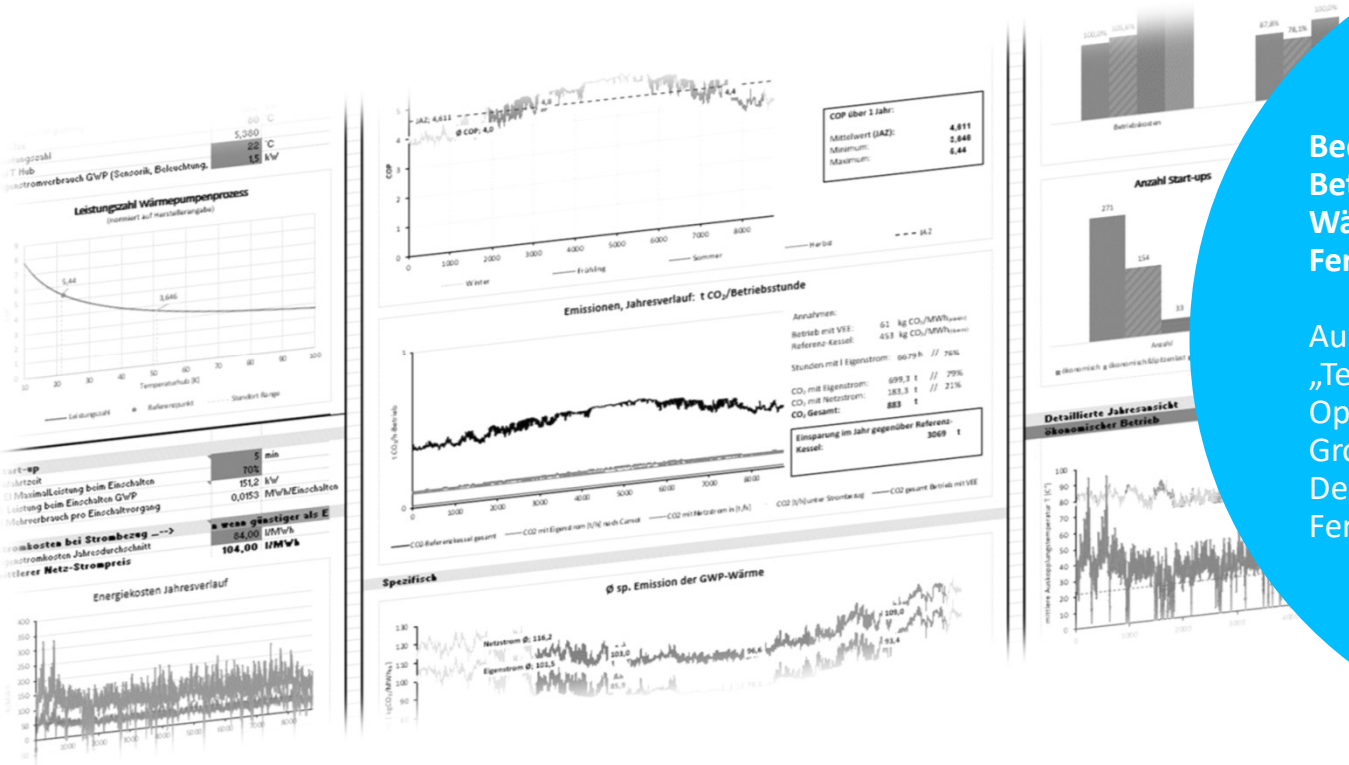
7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Arbeit zeigt auf, dass unter aktuellen Reglementierungen eine Stromversorgung von Großwärmepumpen in der Fernwärme mit Eigenstrom zu erwarten ist. Die Herleitung des Effizienzgrenzwertes beweist, dass ein Betrieb mit Eigenstrom unabhängig der KWK-Anlage und Effizienz, sowie unabhängig des Brennstoffs immer zu einer ökologischen Verschlechterung führen wird. Das auch in der Projektplanung anzutreffende, landläufige Bild, dass WP stets klimafreundliche Wärme auskoppeln wird widerlegt. Erst ab Nutzung einer höher temperierten Abwärmequelle ist eine ökologische Verbesserung der Verbundwärme in geringem Maße überhaupt möglich. Die grafische Darstellung soll anhand des COP-Kurvenverlaufs einer empirisch bestimmten durchschnittlichen WP bereits in der Planungsphase Aufschluss über die benötigten Randbedingungen für einen ökologischen Betrieb ermöglichen.

Die Auswertung über den Zeitraum eines Jahres der drei gängigsten KWK-Anlagen zeigt darüber hinaus, dass das Dekarbonisierungspotential von WP in der Fernwärme mit der Stromversorgung steht und fällt. So kann eine durchschnittliche WP unter Nutzung ambienter Wärmequellen eine bis zu 12-fache geringere spezifische CO_2-Emission ermöglichen, wenn der Strom aus erneuerbaren Energien stammt.

Die Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Faktoren zeigt die Dringlichkeit auf Reglementierungen für zukünftige WP in der Fernwärme anzupassen. Bleibt ein Eigenstrombezug ökonomisch vorteilhaft, so besteht die Gefahr eines vermeidbaren, ökologischen Eigentors mit deutlicher Auswirkung: Wären die Ausbauziele der „Heat Roadmap Europe“ bereits heute erreicht (50 % Fernwärme, davon 30 % elektrische WP) kommt ein Wechsel aller WP von Eigen- zu Fremdstrombezug einer CO_2-Einsparung von 1,1 bis 2,7 % der jährlichen CO_2-Emission Deutschlands gleich.

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung



Bedingungen für einen ökologischen Betrieb von sektorgekoppelten Wärmepumpen in der Fernwärmeversorgung

Aus der Dissertation mit dem Thema: „Technoökonomische Analyse und Optimierung von sektorgekoppelten Großwärmepumpen als Dekarbonisierungsoption der Fernwärme“

Georg Hurst

stuttgarter maschinenbau
interdisziplinär und vielfältig

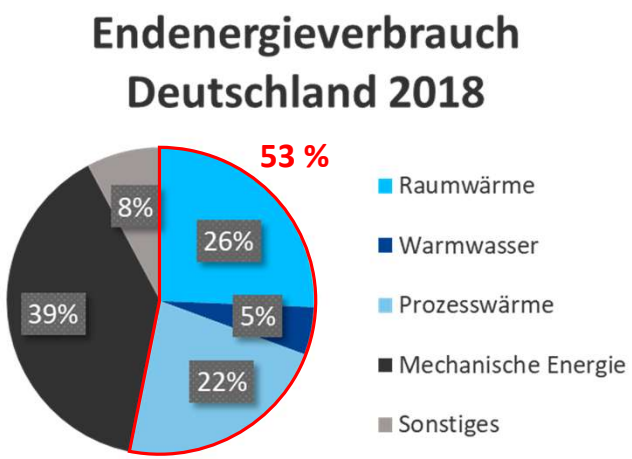
Motivation

Endenergieverbrauch

- 53 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die **Wärmebereitstellung,** dies entspricht **18 % der CO_2-Emissionen** [1] [2]

Fernwärme

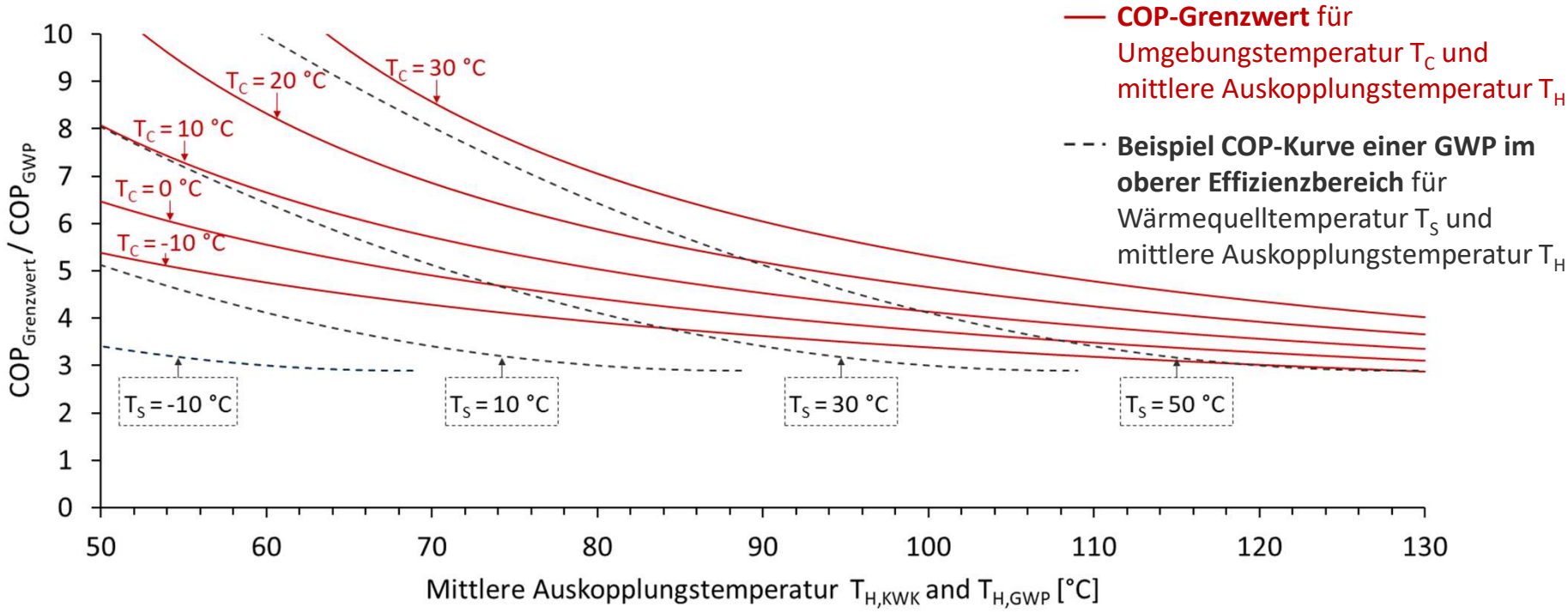
- 14-18 % der Wärmebereitstellung entfällt auf die Fernwärme [3]
- 83 % der Fernwärme werden durch Verbrennung fossiler Energieträger bereitgestellt [4]
- 2050: Heat Roadmap Europe: Ausbau der Fernwärme auf 50 % der gesamten Wärmebereitstellung nötig, davon 25-30% durch el. Großwärmepumpen (GWP) [5]



[1] Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik * vorläufige Angaben Deutschland, Stand 09/2021
[2] https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zahl-der-woche-fast-ein-fuenftel-aller-co2-emissionen-in-deutschland/, Stand 10/2022
[3] A. Pfnür, I. B. Winiewska, D.-I. B. Mailach, und I. B. Oschatz, „Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt“, Vgl. Stud. Aus Energ. Ökon. Sicht IWO, 2016
[4] Destatis und BDEW, Hrsg., „Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern in Deutschland“. 2020..
[5] D. Connolly u. a., „Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27“, Department of Development and Planning, Aalborg University, Report 978-87-91404-48–1, Mai 2013.

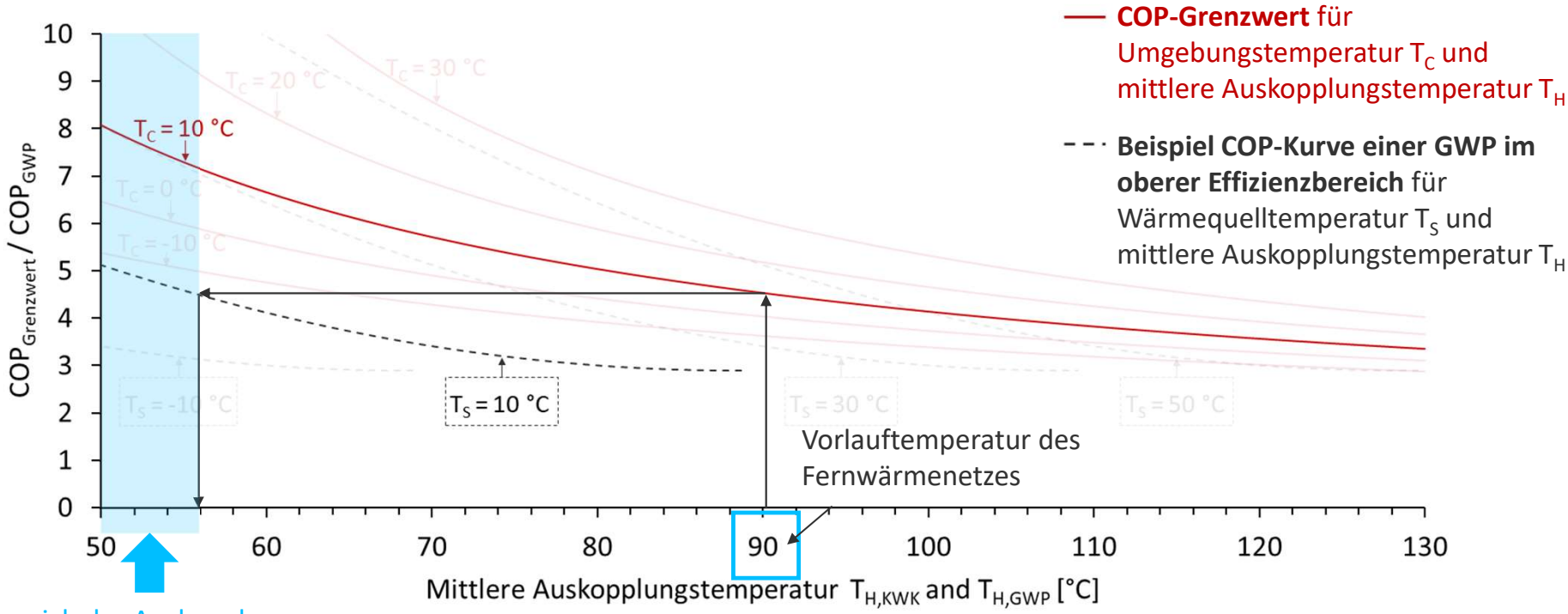
Teilergebnisse der Dissertation:

- Untersuchung der Standorte zukünftiger Großwärmepumpen in der Fernwärme:
  - Ergebnis: GWPs werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit im Kraftwerkspark bestehender Fernwärmenetze errichtet.
- Welcher Strombezug ist wahrscheinlich:
  - Ergebnis: Aufgrund geringerer Stromkosten werden GWP‘s mit Strom aus dem Erzeugerpark (83 % KWK) versorgt.
- Welchen COP (Effizienz) müssen diese GWP‘s erreichen, um die spezifische CO_2-Emission der Fernwärme zu verbessern:
  - Ergebnis: Herleitung eines neuen Effizienzgrenzwertes (minimal zu erreichender COP) auf Basis des 2ten Hauptsatz der Thermodynamik und der exergetischen Allokation nach Carnot.



- **Temperaturbereich in dem die (G)WP betrieben werden kann, sodass eine ökologische Verbesserung eintritt.**
- **Ermöglicht Berechnung der x-fach höher/geringeren sp. CO_2 Emission der GWP-Wärme.**

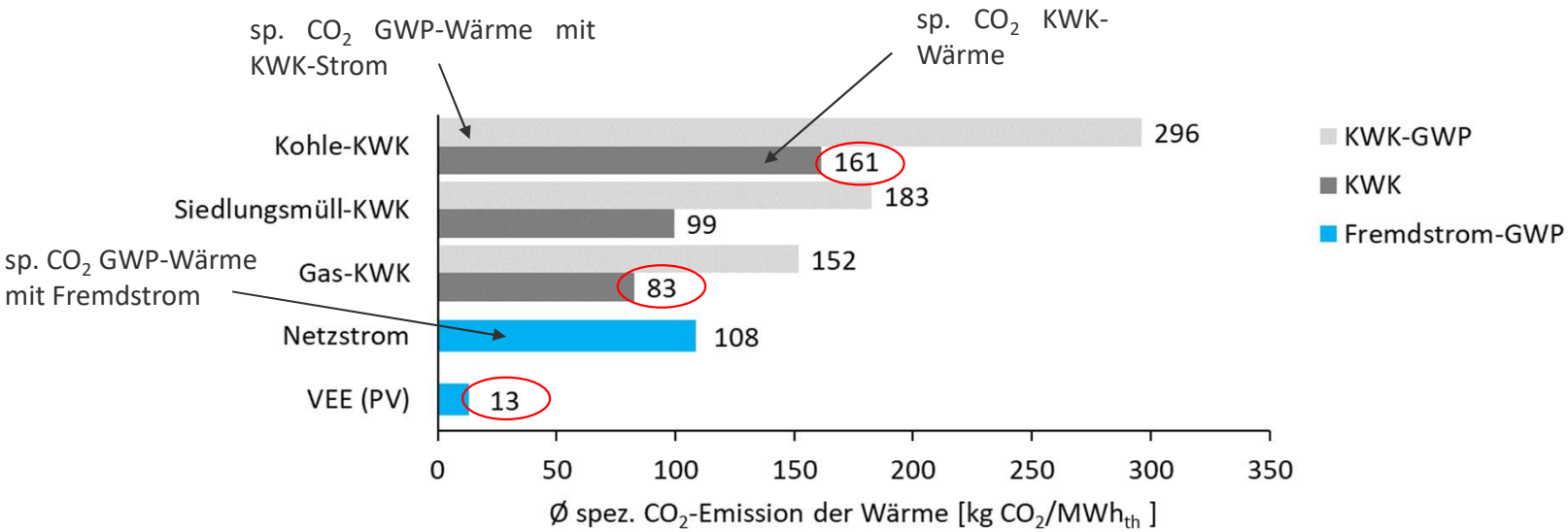
[1] Hurst, Jentsch, Blesl: General numeric determination of ecological operation of heat pumps using power from cogeneration. 2022 https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2055682/v1



Bereich der Auskopplungs-temperatur der (G)WP in dem eine ökologische Verbesserung eintritt.

Ökologie von GWPs im Kontext:

Unterschied Eigen- versus Fremdstrombezug



Ökologisches Potential von GWPs steht und fällt mit der Stromversorgung:

Bei Strombezug aus erneuerbarer Energie VEE (Photovoltaik: Ø sp. CO_2 = 48 kg CO_2/MWh_{el} [2]) **verbessert die Wärmepumpe die Verbundwärme um das 6- (Gas-KWK) bis 12-fache (Kohle-KWK).**

[1] Hurst, Jentsch, Blesl: Dependency on external power supply to operate large-scale heat pumps to decarbonize Cogeneration-based District Heating Networks, 2022 https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2055807/v1

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. doi: 10.1017/CBO9781107415416.

Hauptergebnisse

- Ausarbeitung zeigt die **Problematik des wahrscheinlichsten Ausbauszenarios von GWPs unter aktuellen Reglementierung.**
- **Herleitung des COP-Grenzwertes liefert Beweis für die Ökologiegrenze** und wiederlegt gefährliche Meinung: *„Wärme aus einer GWP ist ökologisch immer vorteilhaft“*
- **Schaubild mit COP-Grenzwert** bietet eine einfache, schnelle Möglichkeit um **Klarheit über die Ökologie bestehender und zukünftiger GWPs in der Fernwärme** zu ermöglichen.

Ausmaß: Wären die Ausbauziele zur Erreichung der Klimaneutralität 2050 bereits heute erreicht (50 % Fernwärme, davon 30 % el. GWP[1]), dann entspricht die eingesparte CO_2-Emission durch Wechsel zu Fremdstromversorgung **1,0 – 2,5 % der jährlichen CO_2-Emission Deutschlands im Jahr 2022**.

[1] D. Connolly u. a., „Heat Roadmap Europe 2: Second Pre-Study for the EU27“, Department of Development and Planning, Aalborg University, Report 978-87-91404-48–1, Mai 2013