

Temperaturoptionen bei Großwärmepumpen

Großwärmepumpen spielen eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Die breite Implementierung der Technologie erfordert gezielte Investitionen, Netzoptimierungen und Planungssicherheit. Doch wo sind die Grenzen betreffend möglicher Vorlauftemperaturen? Im Folgenden wird gezeigt, welchen Einfluss unterschiedliche Vorlauftemperaturen auf die Auswahl, die Baugröße, die Betriebs- und Investitionskosten von Wärmepumpen haben.

Großwärmepumpen werden zunehmend für die Wärmeversorgung in Fernwärme-, Nahwärmenetzen, Quartieren und Sonderbauten wie Krankenhäusern eingesetzt. Geforderte Vorlauftemperaturen variieren je nach Anwendung. Durch die heute verfügbare Technologie können aus rein technischer Sicht alle Wärmenetze mit Wärmepumpen bedient werden; dies ist jedoch aus kaufmännischer Sicht immer zu überprüfen.

Bei Wärmenetzen gibt es eine Unterscheidung in unterschiedliche Generationen. Bei Wärmenetzen der 3. Generation handelt es sich um Bestandsnetze; diese nutzen unter Druck stehendes Heißwasser von rd. 100 °C im Vorlauf. Aus den hohen Wassertemperaturen resultieren aber erhebliche Wärmeverluste. Besonders stark tritt dieser Effekt im Sommer auf, wo nur wenig Wärme abgenommen wird. Wärmenetze der 4. Generation haben geringere Vorlauftemperaturen von etwa 70 °C; entsprechend geringer sind die Wärmeverluste. Dies ermöglicht die Nutzung von Wärmeerzeugern wie Solarthermie, Geothermie oder Abwärme aus Industrieprozessen. Wärmenetze der 5. Generation, die auch als kalte Nahwärmenetze oder Anergienetze bekannt sind, eignen sich besonders in Kombination mit Wärmepumpen. Mit kalten Nahwärmenetzen ist es möglich, Wärme und Kälte mit einem einzigen Netz bereitzustellen und Abwärme aus

Gebäuden mit Kältebedarf zur Beheizung von Gebäuden mit Wärmebedarf zu nutzen und so Wärme- und Kältebedarfe im Quartier teilweise gegenseitig auszugleichen.

Als Nahwärmenetze werden kleinere, lokale Netze bezeichnet, die aus Heizzentralen vor Ort gespeist werden. Fernwärmenetze sind oftmals große Netze mit einer hohen Anzahl angeschlossener Abnehmer, die häufig durch Abwärme aus großen Kraftwerken oder/und mit Großwärmepumpen gespeist werden.

Betreiber bestehender Fernwärmenetze, die rd. 15 % des deutschen Wärmebedarfs und rd. 8 % des Energiebedarfs abdecken, stehen vor der Herausforderung, fossile Energieträger durch klimaschonende Energien zu ersetzen. Diese Möglichkeit bieten große Wärmepumpenanlagen im Leistungsbereich von 1 bis 100 MW, um vorrangig im städtischen Bereich regenerative Energie beispielsweise aus Wärmequellen wie Geothermie, Gewässern oder Abwärme zu erschließen.

In Deutschland gab es 2023 rd. 475 Fernwärme-/kältenetzbetreiber, 626 Fernwärmeerzeuger, 54 Wärmespeicherbetreiber und 590 Fernwärmelieferanten. Deutlich mehr Marktbeteiligung gab es bei Nahwärme- und Quartiersnetzbetreibern mit knapp 3800. Die großen Fernwärmenetze werden in der Regel mit hohen Temperaturniveaus

betrieben. Für 2024 sind lt. Agora Energiewende die Zahlen ziemlich gleich geblieben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Fernwärme: Klassische Netze benötigen oftmals bis zu 110 °C, moderne Konzepte arbeiten vielfach mit 65 bis 85 °C.
- Nahwärme/Quartiere: Hier sind 40 bis 70 °C marktüblich, hocheffiziente Systeme streben 40 bis 50 °C an, da dies eine positive Auswirkung auf die Effizienz der Wärmepumpe hat.
- Krankenhäuser/Altersheime: 70 bis 90 °C aufgrund zentraler Trinkwasserspeicher, Hygienevorgaben und medizinischer Technik.

Die Anforderung an das Temperaturniveau bestimmt maßgeblich die Auswahl der Wärmepumpentechnik und das verwendete Kältemittel.

Kältemitteloptionen

Die Wahl des Kältemittels limitiert die technisch erreichbare Vorlauftemperatur (Bild 1). Aufgrund der Vorgaben der Verordnung (EU) 2024/573 werden immer öfter Kohlenwasserstoffe oder natürliche Kältemittel eingesetzt.

Ammoniak (R717)

Ammoniak weist sowohl ein Erdwärmungspotenzial (GWP) als auch ein Ozonabbaupotenzial (ODP) von null auf und ist somit zukunfts-

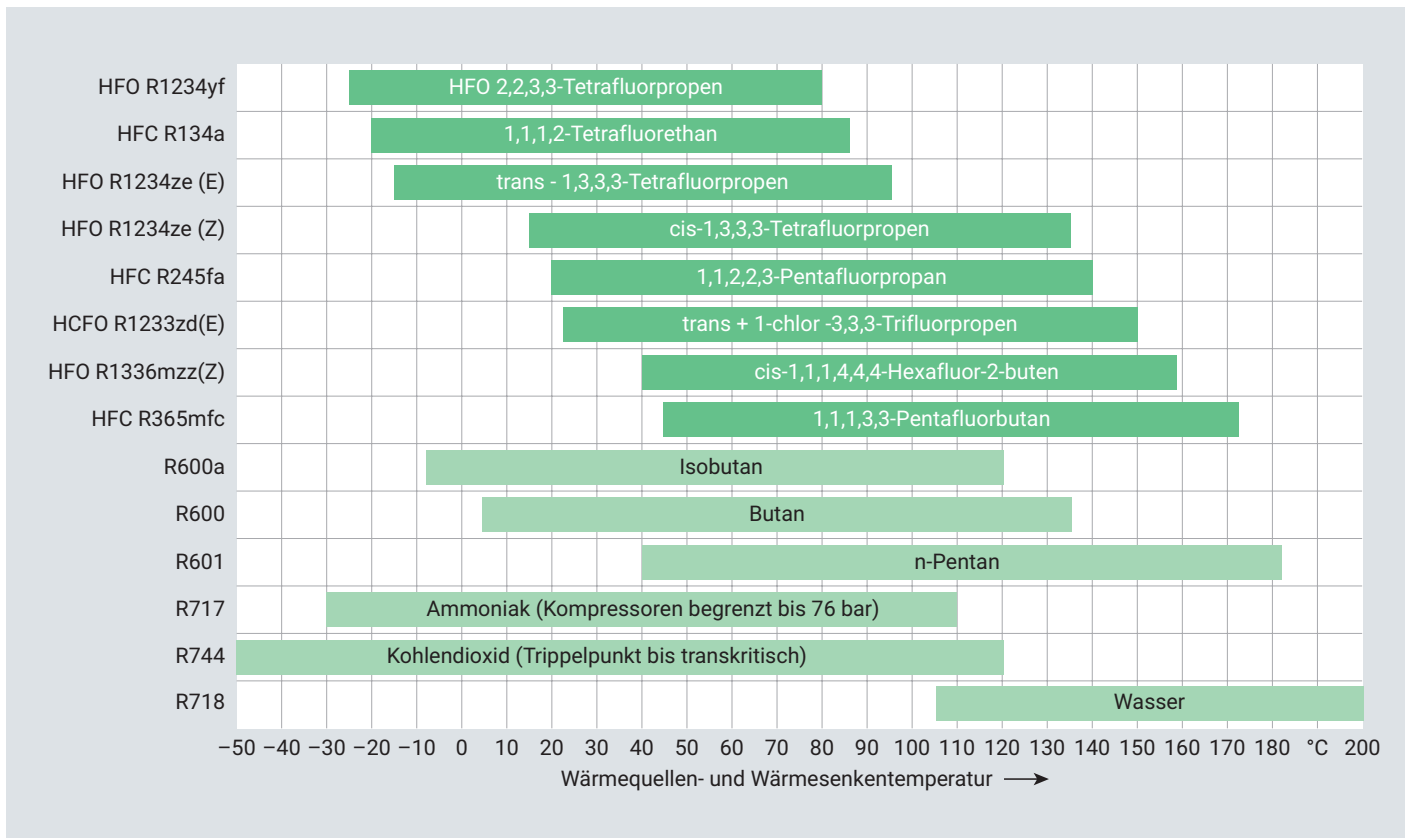


Bild 1. Typische Temperaturbereiche verschiedener Kältemittel Quelle: Arpagaus, C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen für industrielle Anwendungen, VEA-Veranstaltung: Wie die Dekarbonisierung gelingen kann: Einsatz alternativer Energien und Technologien im Unternehmen, 16. März 2023, Online-Seminar

sicher im Hinblick auf gesetzliche Verbote. Im Vergleich zu synthetischen Alternativen ist es deutlich günstiger und erfordert je installierter Heizleistung deutlich geringere Kältemittelmengen. Typischerweise fallen bei 1 MW Heizleistung nur etwa 60 bis 70 kg Ammoniak an, während moderne HFO-Kältemittel bis zu 500 kg benötigen. Neben der Nachhaltigkeit ist Ammoniak seit mehr als 100 Jahren in der Industrie etabliert, gut verfügbar und durch seinen Geruch bei Leckagen einfach identifizierbar. Demgegenüber stehen die Herausforderungen im Umgang mit seiner Toxizität, weshalb umfassende Sicherheitsanforderungen nach DIN EN 378 und TRAS 110 strikt einzuhalten sind.

Propan (R290)

Für Monoblock-Wärmepumpen im Gebäudebereich etabliert, eignet

sich Propan bis etwa 70 bis 75 °C Vorlauftemperatur; es ist populär durch niedriges GWP und gute energetische Eigenschaften.

CO₂ (R744)

Standardmäßig sind heute maximale Vorlauftemperaturen bis 90 °C erreichbar. Um wirklich effizient zu arbeiten, ist bei CO₂ eine möglichst hohe Spreizung zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur – etwa 90 zu 40 °C – erforderlich. Die Effizienz ist bei kleiner Spreizung oftmals unterdurchschnittlich, weshalb es vor allem bei Warmwasser- oder Prozesswärmeanwendungen mit großem Temperaturhub geeignet ist.

HFO/HFKW

HFO/HFKW (z. B. R1234ze(E), R513A) kommen als Ersatz für traditionelle HFKW (wie das inzwischen abge-

löste R134a) zum Einsatz und ermöglichen Temperaturen bis etwa 80 bis 85 °C. Ihre Bedeutung nimmt angesichts der verschärften F-Gas-Verordnung allerdings ab.

Einfluss der Wärmequellen-temperatur

Die Wärmequellentemperatur definiert die Effizienz und die mögliche Vorlauftemperatur. Je höher die Quellentemperatur, desto leichter und effizienter gelingt das Anheben der Vorlauftemperatur. Bei größeren Temperaturhuben (> 50 K) wird in der Regel eine zweistufige Verdichtung eingesetzt. Eine Ausnahme bildet CO₂, das aufgrund des transkritischen Prozesses auch große Temperaturunterschiede bei akzeptablen Effizienzen ermöglicht, wenn die Spreizung hoch ist.

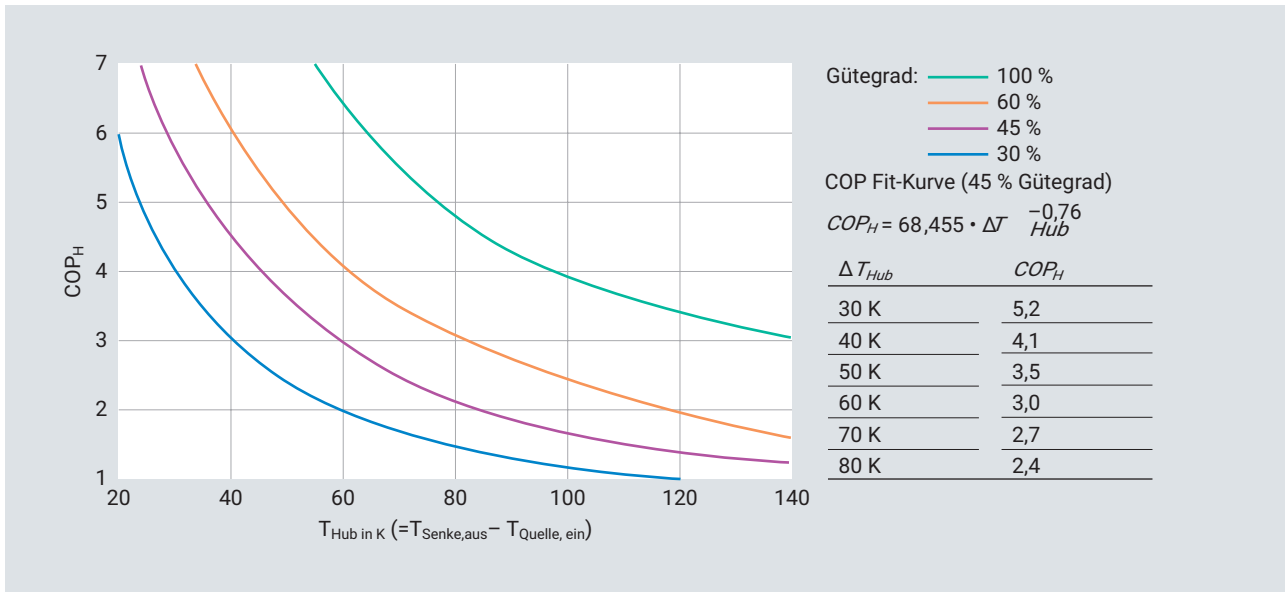


Bild 2. Abschätzung COP Heizung abhängig vom Gütegrad und Temperaturhub

Quelle: 2G Energy

COP-Abschätzung/Carnot-COP und Verdichterwahl

Der theoretisch erreichbare Carnot-COP berechnet sich wie folgt (Temperaturen in Kelvin):

$$COP_{Carnot} = T_{senke} / (T_{senke} - T_{quelle})$$

Dieser Carnot-COP ist mit dem Carnot-Wirkungsgrad, der in der Praxis zwischen 45 und 65 % liegt, multipliziert, um den wirklichen COP zu erhalten. Für die Abschätzung gibt es Diagramme, die den COP abhängig vom Temperaturhub und dem Gütegrad wiedergeben (Bild 2). Praktische COP liegen je nach Technik und Hub zwischen 2 und 4 bei Vorlauftemperaturen von 70 bis 85 °C und 6 bis 14 °C Quelltemperatur – bei Ammoniak regelmäßig am oberen Rand. Mit zunehmendem Temperaturhub nimmt der COP ab.

Auch der Entwurf der VDI 4646 „Anwendung von Großwärmepumpen“ ermöglicht mit unterschiedlichen Diagrammen eine Abschätzung des COP abhängig vom zu erbringenden Temperaturhub. Hier ist eine Kurve für synthetische Kältemittel (HFC, HFO) und für eine

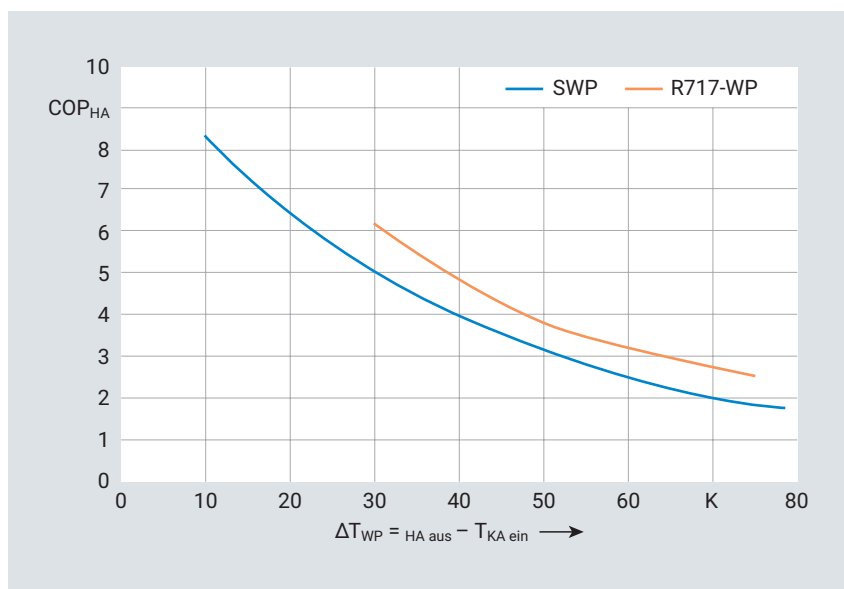


Bild 3. Regressionsfunktion zur Abschätzung der Leistungszahl abhängig vom von der Wärmepumpe zu erbringenden Temperaturhub für Standard- und Hochtemperaturwärmepumpen (SWP und HTWP) mit synthetischen Kältemitteln (HFC, HFO) und für R717-Wärmepumpen

Quelle: 2G Energy, aufgebaut auf Datenbasis Entwurf VDI 4646

R717-Ammoniak-Wärmepumpe hinterlegt (Bild 3).

Verdichterwahl abhängig vom Temperaturhub

Je größer der geforderte Temperaturhub, desto selektiver muss der Verdichtertyp gewählt werden.

Beim Vergleich der Verdichtertechnologien wird klar, dass Hubkolbenverdichter und Schraubenverdichter unterschiedliche Stärken haben. Hubkolbenverdichter zeichnen sich allgemein durch eine hohe Effizienz vor allem bei Teillast aus und eignen sich für kleinere Leistungen im Bereich bis 5 MW. Sie können sehr

flexibel betrieben werden und sind daher optimal, wenn im Betrieb häufig schwankende Lasten auftreten. Allerdings sind sie wartungsintensiver, weisen mehr bewegliche Teile auf und verursachen tendenziell höhere Schallemissionen. Schraubenverdichter hingegen sind weniger wartungsanfällig, laufen schwingungs- und geräuscharm und können durch den Einsatz von Öleinspritzung während der Verdichtung Temperaturhübe bis 95 °C ermöglichen. Damit sind sie vor allem für große Leistungen oberhalb von 5 MW die richtige Wahl. Die notwendige Aufstellfläche verringert sich im Vergleich zum Einsatz von Hubkolbenverdichtern.

Auswirkungen Vorlauf-temperatur

Die Vorlauftemperatur wirkt sich auf Investition und Leistung aus. Die Investitionskosten steigen mit zunehmender geforderter Vorlauftemperatur, da leistungsfähigere

Verdichter, größere Wärmeübertrager sowie gegebenenfalls hochdruckfeste Komponenten nötig sind. Die Heizleistung sinkt bei gleichbleibender Quelltemperatur mit steigendem Temperaturhub (siehe COP); gleichzeitig wird mehr elektrische Leistung benötigt, um gleiche Wärmeleistung bereitzustellen.

Die Auswahl „optimierter“ Vorlauftemperaturen (z. B. 65 bis 75 °C) statt besonders hoher Temperaturniveaus kann einen signifikanten Unterschied bei der Jahresarbeitszahl, Amortisationszeit und Systemflexibilität erzielen. Besonders Ammoniakwärmepumpen bieten bei 70 bis 90 °C ein Optimum aus Investition, Betriebssicherheit und Effizienz.

Auslegung Wärmepumpe mit verschiedenen Vorlauftemperaturen

Am Beispiel einer Isobutan-R600a-Wasser-/Wasser-Wärmepumpe

(Bild 4) wird der Einfluss verschiedener Quellen- und Senkentemperaturen auf die Effizienz (COP) und die mögliche Heizleistung verdeutlicht. In Bild 5 ist eine konstante Wärmequelleneintrittstemperatur von 20 °C, in Bild 6 eine konstante Wärmequelleneintrittstemperatur von 45 °C die Basis. Beide Wärmepumpen arbeiten mit einer Spreizung von 5 K.

Bei der niedrigen Quelltemperatur von 20 °C ist die Heizleistung auch bei den Vorlauftemperaturen von 60 bis 100 °C ziemlich konstant, eine starke Auswirkung ist jedoch beim COP zu beobachten. Beträgt dieser bei 60 °C/35 °C ansehnliche 4,6, reduziert sich dieser bei 100 °C/75 °C um 55 % auf 2,2.

Kann eine höhere Wärmequelltemperatur von 45 °C zur Verfügung gestellt werden, hat eine unterschiedliche Senkentemperatur eine deutlich größere Auswirkung auf die mögliche Heizleistung. Bei 60 °C/35 °C beträgt diese 1140 kW, bei 100 °C/75 °C noch 1050 kW. Bei diesen Bedingungen kann ein COP von 7,5 bzw. 3,9 erreicht werden.

Die Angaben in Bild 5 und Bild 6 sind unter Volllastbedingungen. Im Teillastbereich, also bei reduzierter Heizleistung und Drehzahl, kann bei dieser Verdichterkonfiguration mit Drehzahlregelung über Frequenzumrichter die Wärmepumpe eine noch höhere Effizienz erreichen. Dies zählt in etwa für den Bereich von 50 bis 80 %. Da Wärmepumpen und Kältemaschinen sehr oft im Teillastbereich arbeiten, wird der Einsatz von Frequenzumrichtern unbedingt empfohlen. Dies gilt besonders, wenn Luft als Wärmequelle genutzt wird, die über den Jahresverlauf zu sehr unterschiedlichen Temperaturen zur Verfügung steht.

Fazit

Großwärmepumpen erschließen für die Transformation der Wärme-

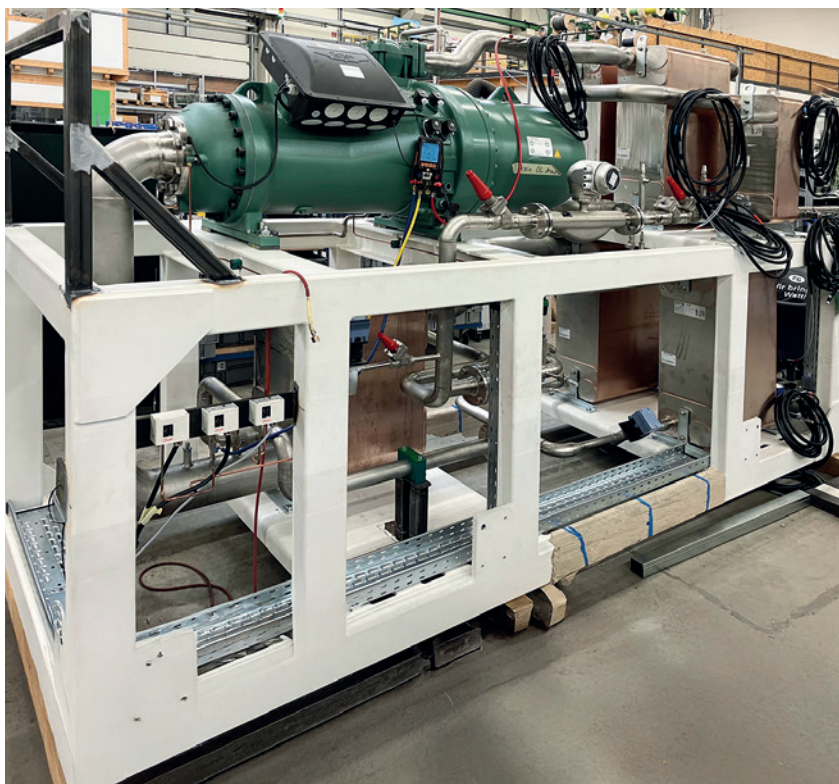


Bild 4. Isobutan-R600a-Wasser-/Wasser-Wärmepumpe

Quelle: 2G Energy

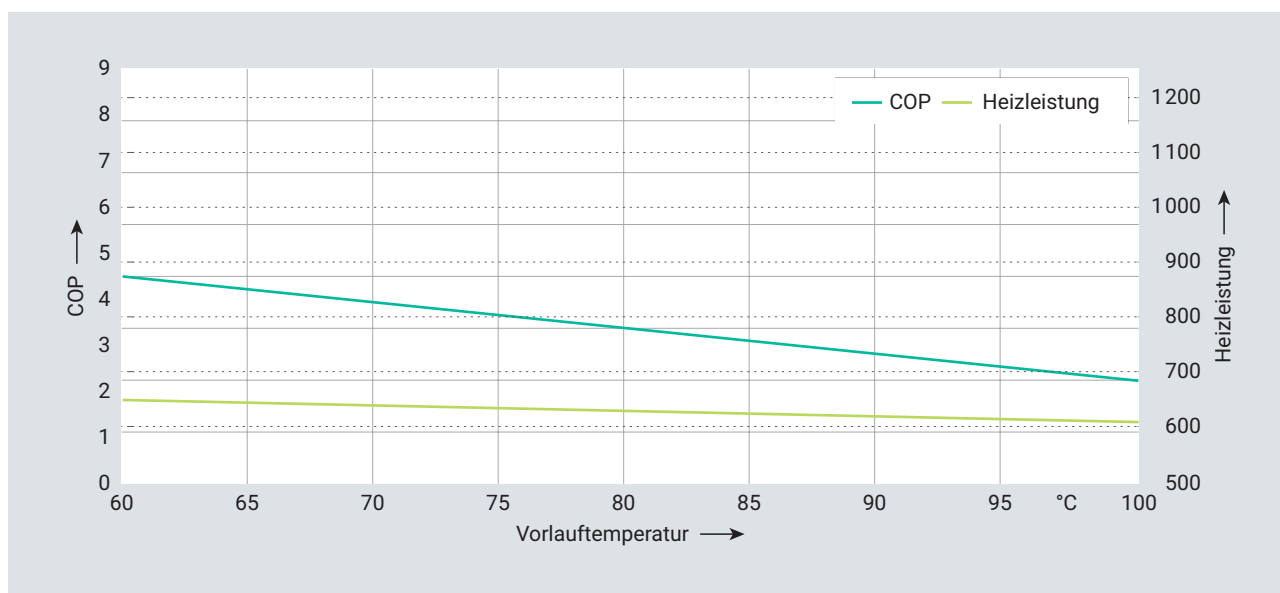


Bild 6. Volllastdiagramm einer Wasser-Wasser-R600 a-Wärmepumpe bei konstanter Wärmequellentemperatur 20 °C/15 °C

Quelle: 2G Energy

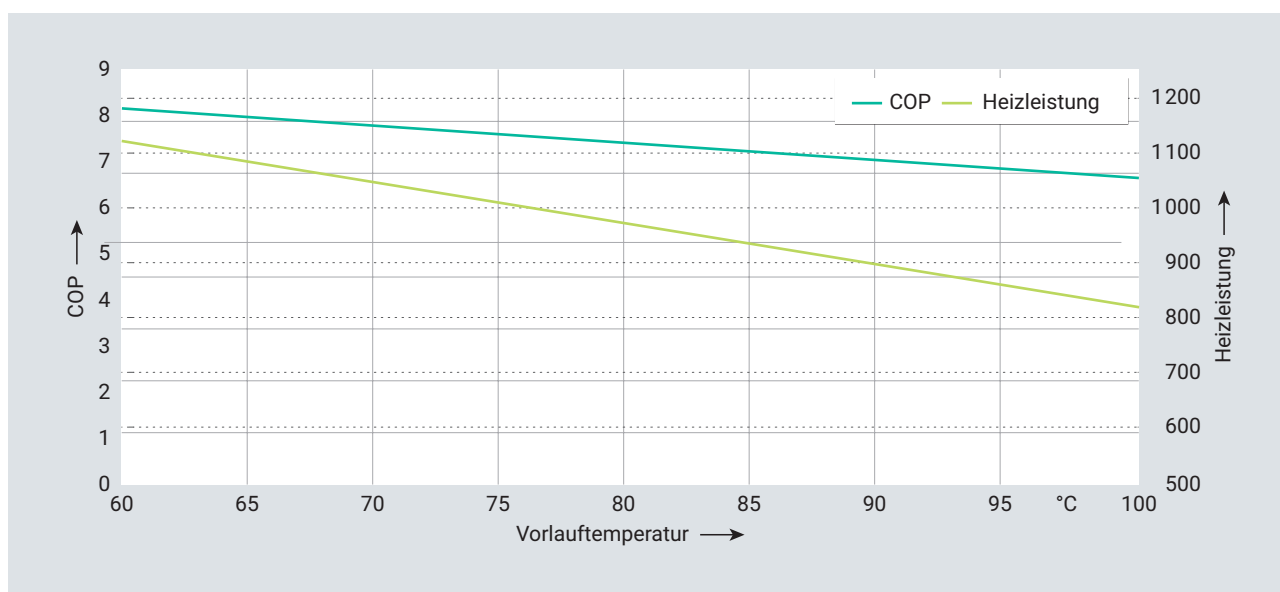


Bild 6. Volllastdiagramm einer Wasser-Wasser-R600a-Wärmepumpe bei konstanter Wärmequellentemperatur 40 °C/35 °C

Quelle: 2G Energy

netze mit maßgeschneiderten Temperaturoptionen enormes Dekarbonisierungspotenzial. Ammoniaksysteme stellen dabei den energetischen und technischen Benchmark im Segment ab 500 kW dar, während Propan, Butan, Isobutan und CO₂ auch schon im unteren Leistungsbereich Einsatz finden. Kohlenwasserstoffe eignen sich besonders auch für Temperaturen

> 90 °C. Eine hocheffiziente, zukunfts-feste Netzintegration gelingt nur bei sorgfältig abgestimmter Quell- und Netztemperatur, optimalem Kältemittelsystem und adäquater Verdichtertechnik.

Lars Keller
freier Autor TGA, Poing
info@hitz-koepfe.de
www.hitz-koepfe.de
www.2-g.com

