



Technologie-Fakten Klimaschutz in der Industrie

Hochtemperatur-Wärmepumpen Einsatz und CO₂-Einsparpotenziale

Wärmepumpen sind vor allem aus dem Gebäudebereich bekannt. Bei Neubauten machen sie inzwischen mehr als die Hälfte der Heizungsinstallationen aus. Dort erzeugen sie Wärme in einem Temperaturbereich bis zu 60 °C. Sie können aber auch **im Industriebereich zum Einsatz kommen, um Raum- und Prozesswärme zur Verfügung zu stellen**. In den letzten Jahren sind zunehmend Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) für den **Temperaturbereich bis 150 °C auf den Markt gekommen, die bei vielen industriellen Prozessen fossile Brennstoffe ersetzen können**. Da mit einer Energieeinheit elektrischen Stroms mehrere Einheiten Prozesswärme erzeugt werden können, ergibt sich eine **deutliche Reduktion des Primärenergiebedarfs und des CO₂-Ausstoßes**.

Funktionsprinzip und Wirkungsgrad

Funktionsprinzip

Die mit Abstand am meisten verbreiteten Wärmepumpen sind **Kompressionswärmepumpen**.¹ Sie funktionieren wie eine „umgekehrte Klimaanlage“: Die Wärmequelle erwärmt ein flüssiges Kühlmittel in der Wärmepumpe, das dabei verdampft und sich durch Verdichtung in einem Kompressor weiter erwärmt.

In einem Wärmetauscher wird die Wärme auf das Anwendungssystem übertragen (z. B. Heißwasser). Das Kühlmittel verflüssigt sich dabei wieder und wird über ein Expansionsventil entspannt, wobei es sich weiter abkühlt. Danach kann es erneut Wärme aufnehmen.

¹Arpagaus (2019).

Im Ergebnis wird dadurch einer Wärmequelle, wie z. B. einem Abwärmestrom oder der Außenluft, Wärme entzogen, die an ein zu erwärmendes Medium (Wärmesenke) mit der benötigten Vorlauftemperatur abgegeben werden kann.

Die maximal erreichbare Temperatur wird in erster Linie durch die Wahl des Kältemittels bestimmt. Nachdem ozonschädigende FCKW-Kältemittel schon seit längerer Zeit verboten sind, werden aufgrund strengerer Regulierung und technischen Fortschritts mittlerweile auch fluorierte Kältemittel mit hohem Erwärmungspotenzial (Global Warming Potential) zunehmend durch fluorierte Olefine oder „natürliche“ Kältemittel wie Wasser, Ammoniak, CO₂ oder Alkane ersetzt. **Das Kältemittel muss für die jeweiligen Anwendungstemperaturen geeignet sein.** Weitere Faktoren für die Wahl des Kältemittels sind thermische Eignung, Umweltverträglichkeit, Sicherheit, Preis und Effizienz.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad (Coefficient of Performance, COP, auch Leistungszahl) ist definiert als der Quotient aus erzeugter Nutzwärme und eingesetzter elektrischer Energie:

$$\text{COP} = \text{Gütegrad} \times \frac{T_{\text{Senke}}}{T_{\text{Senke}} - T_{\text{Quelle}}}$$

Der Gütegrad gibt an, wie sehr sich der tatsächliche Wirkungsgrad vom idealen Wirkungsgrad (Carnot) unterscheidet. In der Praxis beträgt er typischerweise zwischen 40 und 60 Prozent.

Der wichtigste Faktor für den Wirkungsgrad ist der Temperaturhub, also die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke. Je geringer die erforderliche Temperaturdifferenz ist, desto effizienter ist der Einsatz einer Wärmepumpe. Zudem ist der ideale Wirkungsgrad bei gleichem Temperaturhub proportional zur absoluten Temperatur der Temperatursenke. Folglich ist er bei 150 °C (423 K) um etwa 15 Prozent besser als bei 100 °C (373 K).

Ein Temperaturhub von 60 °C entspricht in etwa einem realen COP von drei. Für übliche Anwendungen kann dieser Wert die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit darstellen.

Die CO₂-Emissionen je erzeugter kWh ergeben sich aus dem CO₂-Faktor des verwendeten Stroms, geteilt durch den COP. Ab einem COP von etwa zwei sind die Emissionen beim deutschen Strommix (aktuell ca. 400 g/kWh) niedriger als bei einem Erdgasbrenner (ca. 230 g/kWh). Mit dem steigenden Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix wird sich das Verhältnis noch während der Lebensdauer heutiger Anlagen weiter verbessern.

Voraussetzung für die Anwendung einer Wärmepumpe ist immer eine **Wärmequelle**. Diese kann bei niedrigen Anwendungstemperaturen (z. B. Raumheizung) auch Umgebungs- oder Erdwärme sein. Für die meisten industriellen Prozesse ist aufgrund des benötigten Temperaturniveaus allerdings Abwärme – etwa aus Produktionsprozessen – besser geeignet, da sie meist auf höherem Temperaturniveau zur Verfügung steht. Solarthermie kann in manchen Fällen unterstützend eingesetzt werden.

Je nach örtlichen Gegebenheiten kann auch im Überschuss zur Verfügung stehende Fernwärme als Wärmequelle für eine Wärmepumpe verwendet oder sogar mittels einer Wärmepumpe „aufgewertete“ industrielle Abwärme in Fernwärmenetze eingespeist werden.

Durch Wärmepumpen kann die bei vielen Prozessen anfallende, jedoch nicht mehr weiter nutzbare und daher günstig verfügbare Niedrigtemperaturabwärme (< 100 °C) nutzbar gemacht werden. Dabei sollte auch unternehmensübergreifend gedacht werden, falls die Abwärme beispielsweise in einem nahe gelegenen Betrieb anfällt.

Einsatzmöglichkeiten und Potenzial zur Einsparung von Brennstoffen

Der Einsatz von HTWP kommt grundsätzlich überall dort infrage, wo **Prozesswärme von weniger als 150 °C** benötigt wird, die durch fossile Quellen oder Widerstandsheizungen gedeckt wird. Der Bedarf an Prozesswärme in Deutschland bis 150 °C beträgt über 100 TWh (Fraunhofer ISE 2020). Besonders betroffen sind die **Lebensmittel-, die Papier- und die Chemieindustrie**. Hier wird in vielen Prozessen Niedrigtemperaturdampf verwendet, etwa für die Trocknung von Papierprodukten, für die Sterilisierung und Pasteurisierung von Lebensmitteln oder für Destillationsprozesse. Ein zusätzlicher Einsatzbereich ist Raumwärme.

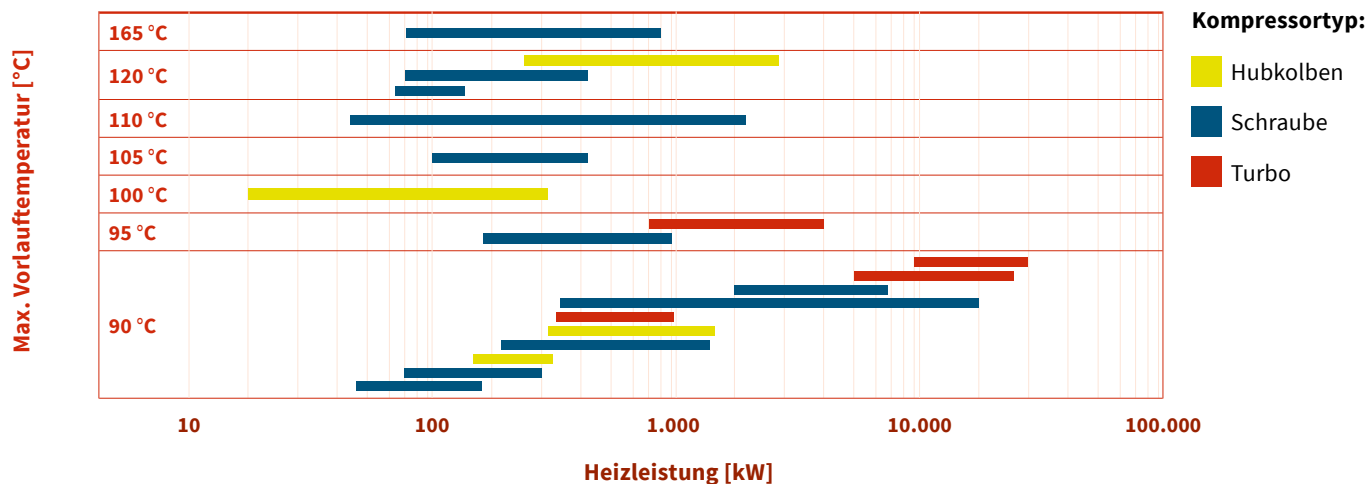


Abbildung 1: Auswahl auf dem Markt verfügbarer Wärmepumpen, Quelle: Cordin Arpagaus (2019), grafische Darstellung: Deutsche Energie-Agentur (dena)

Wärmepumpen können neben **kurzfristigen Emissionseinsparungen** auch einen Beitrag **zur Substitution fossiler Brennstoffe und damit zur langfristigen Erreichung der Klimaneutralität** leisten. Durch thermische Zwischenspeicher können sie zudem flexibel und somit netzdienlich eingesetzt werden.

Es gibt Fälle, in denen das Temperaturniveau eines Prozesses aufgrund der lokalen Situation (z. B. bei nicht ausreichender Abwärme) nicht vollständig über die Wärmepumpe erzeugt werden kann. Aber auch hier ist es möglich, dass sie einen Beitrag zur Verringerung des Brennstoffbedarfs erbringt, z. B. durch Vorwärmung des Wärmemediums. Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wärmepumpenanlagen in Unternehmen ist das Vorhandensein einer **geeigneten Wärmequelle eine wesentliche Voraussetzung für die wirtschaftliche Umsetzbarkeit**. Zudem müssen die Wirtschaftlichkeit und eine genügend schnelle Amortisation gegeben sein. Die Hauptthemnisse für den Einsatz von HTWP sind mittlerweile nicht mehr in der Technik begründet, sondern eher im geringen Bekanntheitsgrad der Technologie, in mangelndem fachlichem Know-how und in – im Vergleich zum Strompreis – relativ günstigen Brennstoffpreisen.

Heute vorhandene Wärmepumpen decken **alle Temperaturbereiche von 50 bis 160 °C und Leistungen von 20 kW bis teilweise über 20 MW** ab. Somit sind nahezu alle Anwendungen im entsprechenden Temperaturbereich möglich (vgl. Abbildung 1). Bei steigender Anlagenleistung verläuft die Kostenkurve degressiv.

Falls **gleichzeitig nicht nur ein Wärme-, sondern auch ein Kühlbedarf anfällt**, kann dies die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe deutlich erhöhen, da der Wirkungsgrad steigt. Zugleich sinkt der Investitionsbedarf, da keine gesonderten Kühlaggregate mehr nötig sind. Typische Beispiele in der Lebensmittelindustrie sind Molkereien. Sie benötigen neben Eiswasser auch Niedrigtemperaturwärme. Zudem müssen ihre Abwässer vor der Einleitung in Gewässer heruntergekühlt werden.

Wirtschaftlichkeit

Investitions- und Betriebskosten

Im **Vergleich zu Gaskesseln haben Wärmepumpen zunächst deutlich höhere Investitionskosten – die Tendenz ist mit zunehmender Verbreitung jedoch fallend**. Die Betriebskosten ergeben sich im Wesentlichen aus den Energiekosten, die direkt vom COP und vom Strom- und Gaspreis abhängen. Diese Faktoren können sich zwischen Unternehmen erheblich unterscheiden. Je höher die Auslastung der Wärmepumpe ist, desto schneller kann die Amortisation erfolgen.

In Zukunft werden die steigenden CO₂-Kosten im EU-Emissionshandel (European Union Emissions Trading System, EU ETS) sowie infolge des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) den Preis für den Einsatz von Erdgas erhöhen (50 Euro je t CO₂ entsprechend etwa 1 ct je kWh Erdgas). Zudem wird die sinkende EEG-Umlage bei vielen Stromverbrauchenden für eine Stabilisierung der Stromkosten sorgen. Dadurch wird sich das Verhältnis der Kosten der Energieträger zugunsten von Wärmepumpen verschieben.

Um die Technologieoptionen während der Investitionsentscheidung adäquat zu bewerten, sollten die Total Cost of Ownership (TCO, Gesamtkosten des Betriebs) während der gesamten Lebenszeit der Anlage betrachtet werden. Darin sollte auch eine Prognose der Energie- und CO₂-Kostenentwicklung enthalten sein.

Förderung

Ein geeignetes **Förderprogramm ist das BAFA-/ KfW-Programm „Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft“**. Relevant sind dabei die Module 2 und 4.

Im Rahmen von **Modul 2** werden Anlagen zur Bereitstellung von „Prozesswärme aus erneuerbaren Energien“ gefördert, darunter auch Wärmepumpen, sowie zugehörige Maßnahmen wie Wärmespeicher, Anbindung an bestehende Prozesse, Baumaßnahmen etc.

Die maximale Förderung beträgt 10 Millionen Euro pro Investitionsvorhaben bei einer Förderquote von bis zu 45 Prozent (55 Prozent für KMU) der förderfähigen Investitionskosten. Abwärmenutzung zählt hierbei nicht als erneuerbare Energiequelle.

Wärmepumpen, die auf Abwärme basieren, sind durch **Modul 4** („Energiebezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen“) abgedeckt, das technologieoffene CO₂-Einsparmaßnahmen mit bis zu 10 Millionen Euro fördert. Die Förderquote liegt bei 30 Prozent für die förderfähigen Investitionsmehrkosten (40 Prozent für KMU) und ist gedeckelt auf einen maximalen Zuschuss pro jährlich eingesparte Tonne CO₂.

Integration in industrielle Prozesse

Die Integration einer Wärmepumpe sollte idealerweise von einer umfassenden Analyse und Optimierung des Gesamtsystems begleitet werden. Dabei sind verschiedene Fragestellungen zu beachten, wie z. B.:

- Welche Prozesse mit Wärme- und/oder Kühlbedarf gibt es?
- Ist der Wärmebedarf der Prozesse bereits optimiert?
- Sind ausreichend (Ab-)Wärmequellen vorhanden und sind diese in etwa gleichzeitig wie der Wärmebedarf verfügbar (Lastprofile)?
- Ist der Temperaturhub nicht höher als 60 °C?
- Wie hoch wird die Auslastung der Wärmepumpe sein?
- Wie hoch sind die Betriebskosten der Referenzinvestition bzw. der Altanlage?
- Steht im Moment ohnehin der Austausch eines Altkessels oder ein Umbau der Anlage an?

Diese und weitere Fragen müssen in einer Detailanalyse betrachtet werden, damit die Wärmepumpe und die Prozessintegration optimal ausgelegt werden können. Dafür sollte ein fachkundiger Planer von Wärmepumpen herangezogen werden.

Quellen

Arpagaus, Cordin (2019): Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale. Berlin: VDE Verlag.

BAFA – Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021): Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit. Novellierung 2021. https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/energieeffizienz_und_prozesswaerme_node.html, Zugriff am 15.10.2021.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>, Zugriff am 15.10.2021.

VDI – Verein Deutscher Ingenieure (2021): VDI-Richtlinien 4646: Anwendung von Großwärmepumpen (geplant für 09/2022). <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4646-anwendung-von-grosswaermepumpen>, Zugriff am 15.10.2021.



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz**

Die Veröffentlichung dieser Publikation erfolgt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) unterstützt die Bundesregierung in verschiedenen Projekten zur Umsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele im Rahmen der Energiewende.

Bei Interesse wenden Sie sich bitte an:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Armin Kühn
Teamleiter Energieeffizienz Industrie
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 (0)30 66 777-690
Fax: +49 (0)30 66 777-699

E-Mail: Armin.Kuehn@dena.de
Internet: www.dena.de