

## Entwicklung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe zur industriellen Wärmeversorgung

**Simon Höckenkamp<sup>1</sup>, Matthias Utri<sup>1</sup>, Fabian Ahrendts<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fraunhofer IEG, Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG,  
Am Hochschulcampus 1 IEG, 44801 Bochum, Deutschland  
Gulbener Straße 23, 03046 Cottbus, Deutschland

**Keywords:** Prozesswärme, Hochtemperatur-Wärmepumpe, R718, Schraubenverdichter

### Zusammenfassung

Zur Minimierung der Klimaerwärmung ist eine umfangreiche Reduzierung der Treibhausgasemissionen erforderlich. Für viele Bereiche der Wirtschaft folgt daraus eine notwendige Umstrukturierung der Prozesse. Insbesondere energieintensive Industrien stehen vor der großen Herausforderung, ihre bestehenden Wertschöpfungsketten vor dem Hintergrund der steigenden Energiepreise und der notwendigen Dekarbonisierung aufrecht zu erhalten.

Hochtemperatur-Wärmepumpen können Wärme auf einem Temperaturniveau zwischen 100 bis ca. 200 °C zur Verfügung stellen. Dabei wird die Wärme in vielen industriellen Prozessen mit Hilfe von Prozessdampf als Wärmeträger übertragen. Für diese Anwendungsfelder können Hochtemperatur-Wärmepumpen in Betracht gezogen werden, die quellenseitig verschiedene Wärmequellen verwerten können. Da die Effizienz von Wärmepumpen mit sinkenden Temperaturdifferenzen zwischen Quelle und Senke steigt, eignen sich für den Einsatz in Industrieprozessen mit hohen Senkentemperaturen besonders Quellen wie Industrieabwärme bzw. die tiefe Geothermie, die eine hohe Temperatur aufweisen. Bedingt durch die hohen Bedarfe verschiedener Industrien haben sich diverse Hersteller und Forschungsprojekte auf dieses Anwendungsfeld ausgerichtet.

In dem öffentlich geförderten Projekt SteamScrew wird eine mit Wasser (R718) als Kältemittel betriebene Hochtemperatur-Wärmepumpe entwickelt. Kern des Projekts ist die Auslegung und Realisierung der Wärmepumpe und die Entwicklung des wassereingespritzten Schraubenverdichters. Da es sich bei dem Arbeitsmedium um ein äußerst klimafreundliches, nicht giftiges und nicht brennbares Kältemittel handelt, kommen viele Anwendungsfelder in Betracht – eine direkte Nutzung des verdichteten Wasserdampfes im Sinne einer mechanischen Dampfverdichtung ohne geschlossenen Wärmepumpenkreislauf ist ebenfalls möglich. Ein Modell der Hochtemperatur-Wärmepumpe wurde in Sprache Modelica in der Entwicklungsumgebung Dymola umgesetzt und simuliert.

Stellvertretend für die jeweiligen Industrien wurden für die Simulation verschiedene Szenarien ausgewählt und deren Prozessbedingungen durch eine Variation der Randbedingungen beschrieben. Ziel der Simulation der Hochtemperatur-Wärmepumpe ist die Untersuchung des Anlagenverhaltens für die jeweiligen Betriebsfälle sowie eine Steigerung der Energieeffizienz des Gesamtprozesses.

## 1. Einleitung

Verschiedene Institutionen haben unterschiedliche Ziele vorgestellt, den bilanziellen Ausstoß von Treibhausgasen zu unterbinden. Um die Klimaerwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, empfehlen die Vereinten Nationen bis zum Jahr 2030 dringend eine Reduzierung der Emissionen um 45 % gegenüber 2010. Im Jahr 2050 müssen weiter alle Treibhausgasemissionen bilanziell ausgeschlossen sein (United Nations Environment Programme, 2022).

Die Europäische Union möchte im Rahmen des „European Green Deal“ als erster Kontinent keine Treibhausgase mehr emittieren. Bis zum Jahr 2030 sollen die Emissionen gegenüber dem Jahr 1990 um 55 % verringert werden. Analog zu den Vereinten Nationen werden demnach bis zum Jahr 2050 bilanziell keine Treibhausgase mehr emittiert (Europäische Kommission, 2021).

Das novellierte Klimaschutzgesetz der deutschen Regierung sieht indes vor, den bilanziellen Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2030 um 65 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Die Treibhausgasneutralität soll somit bis 2045 erreicht werden (§3 KSG).

Gemessen am Gesamtausstoß der Treibhausgase macht die deutsche Industrie, wie sie gemäß des Klimaschutzgesetzes definiert ist, im Zeitraum von 2017 – 2022 einen Anteil von durchschnittlich 23 % aus (Umweltbundesamt, 2023). Davon fällt ein großer Teil auf die Erzeugung und Bereitstellung von Prozessdampf im Temperaturbereich zwischen 100 bis 200 °C, wie er beispielsweise in der Chemie-, Papier- oder Lebensmittelindustrie verwendet wird.

Der vorliegende Beitrag fokussiert sich auf die Kombination aus Wasser als Kältemittel und einen Schraubenverdichter als verwendete Verdichtertechnologie. Dieser robuste und wartungsarme Verdichtertyp hat gegenüber alternativen Konzepten den Vorteil, dass die Einspritzung von flüssigen Medien zu Kühl-, Schmier- und Abdichtungszwecken in den Arbeitsraum möglich ist.

Für die Entwicklung von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln werden aktuell große Kapazitäten aufgewandt. Wasser als Kältemittel wurde bereits in verschiedenen Forschungsvorhaben betrachtet.

Chamoun et al. haben in verschiedenen Arbeiten den Betrieb einer Hochtemperatur-Wärmepumpe in Simulationen und Experimenten umfangreich untersucht. Dabei wurde ein wassereingespritzter Schraubenverdichter ausgewählt. Sowohl in Messungen als auch in Simulationen konnte das dynamische Verhalten der Anlage und die vorteilhaften Aspekte der Wassereinspritzung nachvollzogen werden (Chamoun et al., 2012, 2013, 2014).

Im Rahmen der Dampfverdichtung haben Hu et al. den wassereingespritzten Schraubenverdichter mit anderen Verdichtertypen verglichen und den Verdichter experimentell innerhalb einer Wärmepumpe untersucht. Vor allem für tendenziell hohe Druckverhältnisse und insbesondere mit der Wassereinspritzung sehen sie für Schraubenverdichter ein großes Potential (Hu et al., 2018).

Einen ähnlichen Ansatz haben Wu et al. verfolgt, die das Potential von Wasser als Kältemittel im Vergleich zu synthetischen und natürlichen Alternativen theoretisch und in Experimenten untersucht haben. Der verwendete Verdichter war stets der wassereingespritzte Schraubenverdichter. Vor allem für Hochtemperatur-Anwendungen hat sich demnach gezeigt, dass Wasser ein sehr vorteilhaftes Kältemittel ist (Wu et al., 2020).

Mösch et al. haben neben einer Gegenüberstellung von Wasser mit anderen synthetischen sowie natürlichen Kältemitteln einen trocken- und einen nasslaufenden Schraubenverdichter in Hinblick auf eine Auswahl industrieller Prozessbedingungen optimiert (Mösch et al., 2021).

Mithilfe eines zweistufigen Turbo-Verdichters haben Zühlsdorf et al. verschiedene Wasserdampf-Wärmepumpen in Hochtemperatur-Anwendungen simulativ untersucht und vor allem die Verdichter sowie verschiedene Konzepte der Zwischenkühlung ausgewertet. Dabei wurden neben der Berücksichtigung eines überfluteten Verdampfers verschiedene Formen der Kühlung durch die Einspritzung flüssigen Wassers untersucht, um die bei der Verdichtung entstehenden Temperaturspitzen zu vermeiden (Zühlsdorf et al., 2018).

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird über den COP (Coefficient of Performance) ausgedrückt und ist definiert als das Verhältnis aus abgegebenem Wärmestrom bezogen auf die zugeführten Leistungen (Verdichter/Pumpen/etc.):

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Kondensator}}{\sum_i P_i}$$

Der für eine Wärmepumpe übliche Vergleichsprozess ist der Carnot-Prozess. Er beschreibt einen Kreisprozess, bei dem die Zustandsänderungen isotherm bzw. isentrop erfolgen. Der COP des Prozesses wird ausschließlich über die Quellen- und Senkentemperatur definiert:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Senke}}{T_{Senke} - T_{Quelle}}$$

Der Carnot-Gütegrad drückt das Verhältnis aus dem COP der vorliegenden Wärmepumpe und dem COP des Vergleichsprozesses aus:

$$\eta_{Carnot} = \frac{COP}{COP_{Carnot}}$$

Eine weitere wichtige Kenngröße ist der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters. Dieser wird definiert als das Verhältnis von der Enthalpiedifferenz unter Annahme einer isentropen Verdichtung zu der tatsächlichen Enthalpiedifferenz:

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

## 2. Kernaspekte der verwendeten Wärmepumpentechnologie

### 2.1 Großwärmepumpen für die Wärmewende

Hochtemperatur-Wärmepumpen können größtenteils den Großwärmepumpen zugeordnet werden, da die hohen Senkentemperaturen vornehmlich für Anwendungsfälle benötigt werden, in denen hohe Wärmemengen erforderlich sind – bspw. in der Industrie.

Der quellenseitige Wärmeeintrag in die Wärmepumpe kann durch verschiedene Ressourcen bereitgestellt werden. Wenngleich die tiefe Geothermie z.T. Wärme auf einem hohen Temperaturniveau bereitstellen kann, kann der Anwendungsbereich durch den Einsatz von Großwärmepumpen erweitert werden. Bereits bei Erreichen von Temperaturen von 80 bis 100°C

sind durch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen Anwendungsbereiche mit hohen Senktemperaturen mit einem vergleichsweise hohen COP möglich. Trotz der hohen benötigten Antriebsleistungen der in Großwärmepumpen verbauten Verdichter kann auf diese Weise das Potential und damit die Wertschöpfung einzelner Projekte gesteigert werden.

Vor allem für die Bereitstellung von Wärme in Wärmenetzen hat sich in den vergangenen Jahren die Anzahl von verfügbaren Großwärmepumpenmodellen vergrößert (Agora Energiewende & Fraunhofer IEG, 2023). Fernwärmenetzen in Deutschland muss Wärme teilweise bei bis zu 130 °C im Winter dargeboten werden. Für die Bereitstellung von Wärme auf einem Temperaturniveau, was über diesen Anwendungsfall hinaus geht, arbeiten einige Hersteller und Forschungseinrichtungen an weiteren Lösungen. In diesem Umfeld ist auch die in dieser Arbeit beschriebene Hochtemperatur-Wärmepumpe zu verorten.

## **2.2 Wasser als Kältemittel**

Die Auswahl des Kältemittels innerhalb kältetechnischer Anlagen ist ein bedeutendes Kriterium für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg einer Anlage. Dabei sind die regulatorischen Randbedingungen ein sehr wichtiger Aspekt bei der Auswahl des Kältemittels.

Die natürlichen Kältemittel erfahren eine zunehmende Aufmerksamkeit, da sie unter anderem vergleichsweise geringe CO<sub>2</sub>-Äquivalente aufweisen und aus Sicht der F-Gase-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014) als weniger kritisch betrachtet werden. Das Kältemittel Wasser sticht dabei besonders durch seine positiven Eigenschaften heraus. Das CO<sub>2</sub>-Äquivalent (GWP) beträgt 0 bis 0,2. Darüber hinaus ist Wasser ungiftig und nicht brennbar (Pachai et al., 2021).

Die hohe kritische Temperatur von 373,9 °C und die hohe Verdampfungsenthalpie für den in Hochtemperatur-Wärmepumpen relevanten Druckbereich sind weitere Gründe für die Verwendung von Wasser als Kältemittel. Da mit sinkenden Verdampfungstemperaturen die Dampfdrücke und damit die Dampfdichten ebenfalls reduziert sind, müssten zur Realisierung relevanter Anlagenleistungen ab einem gewissen Punkt große Komponenten vorgesehen werden. Mit steigender Verdampfungstemperatur überwiegen die positiven Eigenschaften des Kältemittels zunehmend. Daher werden mit dem nachfolgend beschriebenen Konzept auch vornehmlich hohe Temperaturen (Quelle: 80 – 120°C, Senke: 150 – 200 °C) in den Fokus gestellt.

## **2.3 Schraubenverdichter**

Als Verdichtertechnologie wird der Schraubenverdichter ausgewählt, da er für die hier betrachtete Kompression von Wasserdampf verschiedene Vorteile gegenüber anderen Verdichtertypen mit sich bringt. Besonders hervorzuhebende Eigenschaften sind hohe erreichbare Druckverhältnisse über eine Verdichterstufe, das pulsationsarme Förderverhalten und die Möglichkeit zur Einspritzung flüssiger Medien in den Verdichtungsraum.

Verschiedene Arbeiten haben auf die Herausforderungen bei dem Betrieb des Verdichters bei einer Wasserdampfanwendung hingewiesen. Um die latente Wärme bei einem ausreichend hohen Temperaturniveau abgeben zu können, muss der Verdichter ein hohes Druckverhältnis erreichen. Mit dem Druckverhältnis steigt die Temperatur am Verdichtungsende im Vergleich zu anderen Kältemitteln stark an und kann dazu führen, dass der Wasserdampf um mehrere 100 K überhitzt wird (Chamoun et al., 2013; Mösch et al., 2021; Wu et al., 2020; Zühlsdorf et al., 2018).

Bis zum Erreichen des Enddruckes ist daher eine Kühlung des Wasserdampfes notwendig, damit die Temperaturen innerhalb der Maschinengrenzen bleiben und ein zuverlässiger Betrieb gewährleistet ist, was zu einem großen technischen Mehraufwand führen kann. Bei dem Schraubenverdichter kann die notwendige Kühlung durch Einspritzen von flüssigem Wasser in den Arbeitsraum erreicht werden, vgl. Abschnitt 3.3.1. Die Verdichtung kann somit in einer Stufe erfolgen.

## 2.4 Ausführungsformen der vorgestellten Wärmepumpe

Ein wesentlicher Aspekt der dargestellten Wärmepumpe ist die Verwendung von Wasser als Kältemittel. Dies ermöglicht unterschiedliche Ausführungsformen der Maschine und lässt sich in zwei grundsätzlich unterschiedliche Klassen unterteilen: Die offene und geschlossene Wärmepumpen-Anwendung, vgl. Abbildung 1. Dabei übernimmt die geschlossene Ausführung die Aufgabe einer klassischen Wärmepumpe. Der Kältemittelkreis ist hermetisch sowohl von der Quelle als auch von der Senke getrennt. Im Falle der Prozessdampferzeugung kann in dem Kondensator unter Druck stehendes Speisewasser erwärmt und anschließend in einer Flash-Verdampfung verdampft werden. Alternativ kann der Kondensator senkenseitig als Verdampfer ausgeführt werden und die Erzeugung von Prozessdampf ermöglichen.

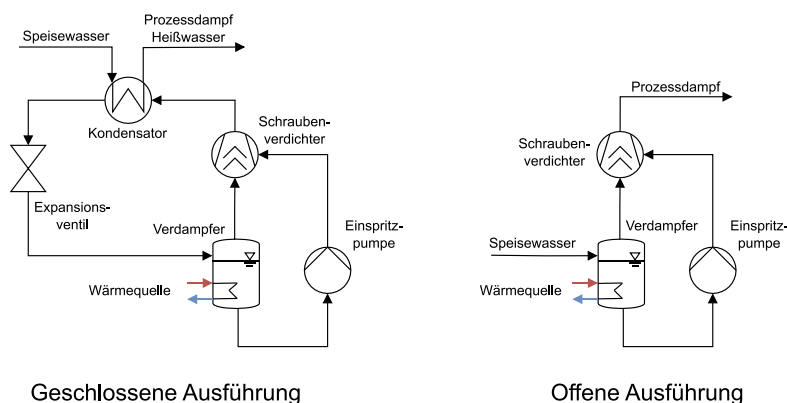


Abbildung 1 Schematische Darstellung der unterschiedlichen Verwendungsformen der Hochtemperatur-Wärmepumpe mit Wasser als Kältemittel

In der offenen Ausführung wird das Speisewasser direkt als Kältemittel verwendet, vgl. Abbildung 1. Die Überhitzung des Dampfes kann während der Verdichtung über das Einleiten von Wasser eingestellt werden. Dieser Anwendungsfall wird auch als Dampfverdichtung (Mechanical Vapor Recompression, MVR) bezeichnet.

Im Rahmen der vorliegenden Ausführungen wird durchweg die geschlossene Ausführung der Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Erzeugung von unter Druck stehendem Heißwasser betrachtet. Erkenntnisse sind jedoch analog auf die direkte Dampferzeugung in der offenen oder geschlossenen Wärmepumpenanwendung übertragbar.

## 3. Simulative Betrachtung der Hochtemperatur-Wärmepumpe

### 3.1 Prozessbedingungen

Im Rahmen der theoretischen Untersuchung werden repräsentative Anwendungsfelder als Grundlage der Simulationen angenommen. Dazu zählen vornehmlich Prozesse unter Verwendung

von Prozessdampf. Da der Transport und die Wärmeübertragung stets verlustbehaftet sind, muss die Dampftemperatur innerhalb der Wärmepumpe oberhalb der Prozesstemperatur liegen. Die Randbedingungen werden durch zwei für den Energiebedarf relevante Branchen gegeben, vgl. Tabelle 1.

Tabelle 1 Gegenüberstellung repräsentativer Anwendungen und deren Wärmeanforderungen

Branche	Papierindustrie	Lebensmittelindustrie (Molkerei)
Auf Produkt bezogener Wärmebedarf	2,9 – 4,3 MWh/t (Papier)	0,02 – 0,18 MWh/m <sup>3</sup> (Milch)
Prozesstemperatur	115 – 170 °C, Papiertrocknung: 144 – 155 °C	63 – 150°C Ultrahocherhitzung: 135 – 150 °C
Abwärmepotential	Kondensat, Abluft Trocknung, tiefe Geothermie	Kondensat, Produktkühlung, tiefe Geothermie
Quelle	(Ek et al., 2009)	(Blesl & Kessler, 2017)

### 3.2 Randbedingungen der Simulationen

Das Modell der Hochtemperatur-Wärmepumpe wird in der Sprache Modelica definiert und in der Dymola-Umgebung von Dassault Systèmes® simuliert. Die Einzelkomponenten der Wärmepumpe stammen aus der TIL Modellbibliothek der TLK-Thermo GmbH.

Für die Simulationen wird das geschlossene Wärmepumpenmodell gewählt, vgl. Abbildung 2. Dabei werden sowohl quellen- als auch senkenseitig dieselben Wasserparameter angenommen, indem der Massenstrom vor dem Eintritt in den Verdampfer bzw. den Kondensator aufgeteilt wird.

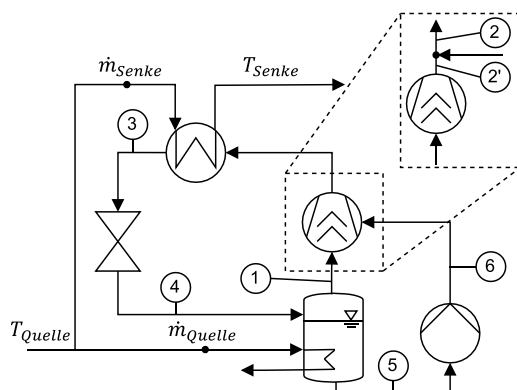


Abbildung 2 Schematische Darstellung des untersuchten Wärmepumpen-Modells

Die Effizienz des Verdichters reagiert empfindlich auf Druckverluste zwischen Verdampfer und Verdichter. Daher wird ein überfluteter Verdampfer verwendet, der durch ein großes Volumen einen verringerten Druckverlust aufweist. Analog zu dem Modell haben Zühlsdorf et al. einen ähnlichen Ansatz gewählt (Zühlsdorf et al., 2018).

Der Verdichter kann vollständig über wenige Parameter definiert werden, vgl. Tabelle 2. Die dargestellten Werte sind eher konservative Annahmen und werden zukünftig anhand detaillierterer Simulationsergebnisse des Verdichters bzw. durch experimentelle Daten aktualisiert.

Tabelle 2 Annahmen zur Beschreibung des Schraubenverdichters

Parameter	Wert	Dimension
Isentroper Wirkungsgrad	0,6	-
Volumetrischer Wirkungsgrad	0,7	-
Mechanischer Wirkungsgrad	0,95	-
Hubvolumen	1,65	l/U
Drehzahl	9000 – 15000	U/min

Die zur Kühlung notwendige Einspritzung erfolgt in der Simulation, indem das Wasser in den Hochdruck-Stutzen des Verdichters eingeleitet wird, vgl. Abbildung 2. Diese Vereinfachung sorgt für eine eher konservative Annahme für die Abschätzung der Verdichterleistung bzw. des COP. Dies liegt vor allem daran, dass bei der realen Verdichtung Flüssigkeit vorhanden ist, die während der Verdichtung verdampfen kann und so den Arbeitsraum kühlt.

Die weiteren zur Definition des Modells notwendigen Annahmen sind nachfolgend aufgelistet:

- Isenthalpe Drossel
- Kein Druckverlust in den Wärmeübertragern oder Rohrleitungen
- Keine Wärmeverluste gegenüber der Umgebung
- Pinch-Point Temperaturdifferenz in den Wärmeübertragern: 2 K
- Überhitzung nach dem Einspritzen des Wassers: 1 K
- Unterkühlung nach dem Kondensatoraustritt: 10 K

Angelehnt an die Randbedingungen in Tabelle 1 werden folgende Randbedingungen für die Einsatzbedingungen des Wärmepumpenmodells angenommen, vgl. Tabelle 3. Es wird von einem breiten Bereich der Quellenbedingungen ausgegangen, wie sie in verschiedenen Industrieprozessen oder in der tiefen Geothermie anfallen könnten.

Tabelle 3 Prozessrandbedingungen der simulierten Wärmepumpenanwendung

Parameter	Wert	Dimension
Massenstrom Wärmequelle	5 – 20	kg/s
Eintrittstemperatur Wärmequelle	80 – 120	°C
Eintrittstemperatur Wärmesenke	80 – 120	°C
Austrittstemperatur Wärmesenke	150 – 200	°C

### 3.3 Simulationsergebnisse

Relevant für die Ergebnisse sind die stationären Betriebspunkte der Wärmepumpenanwendung. Aufgrund des breiten Anwendungsfeldes werden nachfolgend unterschiedliche Randbedingungen variiert und deren Einfluss auf den Betrieb der Wärmepumpe ausgewertet.

#### 3.3.1 Analyse eines beispielhaften Betriebspunktes

Anhand des Druck-Enthalpie-Diagramms ist für einen beispielhaften Betriebspunkt (Quelle: 100 °C, Senke: 180 °C) zu erkennen, dass die Überhitzung nach der Verdichtung ohne eine Kühlung leicht mehrere 100 K erreichen kann (2'), vgl. Abbildung 3. Wie in Abbildung 2 dargestellt, wird im Rahmen dieser Simulation nach der Verdichtung flüssiges Wasser eingespritzt und dadurch eine leichte Überhitzung von 1 K eingestellt (2'-2). Auf diese Weise können die Temperaturspitzen vermieden werden, die im realen Betrieb zu einer Beschädigung des Verdichters führen würden.

Dabei wird die im Kondensator abgegebene Wärmemenge (2-3) nicht nennenswert reduziert. Die geringere Enthalpiedifferenz über den Kondensator kann durch den größeren Massenstrom weitestgehend ausgeglichen werden.

Die getroffenen Annahmen für den isentropen und volumetrischen Wirkungsgrad des Verdichters besitzen einen großen Einfluss auf die Gesamteffizienz der Wärmepumpe. Je höher der isentrope Wirkungsgrad ist, desto geringer ist die Enthalpiezunahme über den Verdichter und desto höher ist der COP der Wärmepumpe. Mit einem zunehmenden volumetrischen Wirkungsgrad nehmen die Massenströme und damit die Leistungen sämtlicher Komponenten zu.

Mithilfe des Druck-Enthalpie-Diagramms ist ersichtlich, dass die über den Kondensator abgegebene Wärmemenge direkt vom Grad der Unterkühlung abhängt, vgl. Abbildung 3. Jedes weitere Kelvin Unterkühlung steigert somit direkt den COP. Da in dem Druck-Enthalpie-Diagramm spezifische Größen aufgetragen sind, die Massenströme durch die Einspritzung in den Wärmeübertragern jedoch unterschiedlich hoch sind, kann der COP nicht direkt über die spezifischen Enthalpiedifferenzen der Wärmeübertrager gebildet werden.

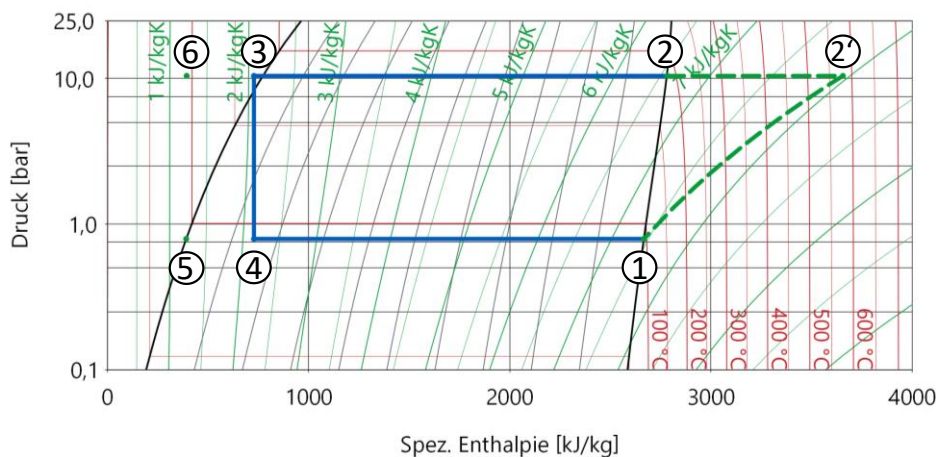


Abbildung 3 Druck-Enthalpie-Diagramm für einen beispielhaften Betriebspunkt (Quelle: Temperatur 100 °C, Massenstrom 10 kg/s; Senke: Temperatur 180 °C; Verdichter: Drehzahl 12000 U/min)

Bei dem Verdampfer (4-1) fällt besonders auf, dass die Temperatur am Verdampferaustritt (1) in dem Wärmepumpenkreis (93,3 °C) deutlich unter der Eintritts-Quellentemperatur (100 °C) liegt, vgl. Abbildung 3. Da gemäß der Randbedingungen Satttdampf vorliegen muss, ergibt sich aus der Temperaturdifferenz von 6,7 K ein Druckunterschied von 0,22 bar, der sich in zweierlei Weise auswirkt. Zum einen muss der Verdichter diesen Druck zunächst wieder aufbauen, was die benötigte Verdichterleistung steigert. Zum anderen sinkt die Dichte des Wasserdampfes mit dem geringeren Druck um ca. 20 %, was sich ebenfalls direkt auf den geförderten Massenstrom und damit die Leistung der einzelnen Komponenten auswirkt.

Konstruktionsbedingt ergibt sich durch den überfluteten Verdampfer somit ein direkter Konflikt zwischen dem Erreichen eines möglichst hohen COP und dem Ausnutzen einer zur Verfügung stehenden Wärmequelle. Je geringer die quellenseitige Austrittstemperatur aus dem Verdampfer ist, desto geringer ist die Temperatur auf seiten der Wärmepumpe. Lediglich die Temperaturdifferenz zwischen dem quellenseitigen Austritt und der internen Kreislaufetemperatur kann optimiert werden,



indem für einen möglichst hohen Wärmedurchgang in dem Wärmeübertrager und eine große Übertragungsfläche gesorgt wird.

### 3.3.2 Kennfeldsimulation bei einer Variation der Verdichterdrehzahl

Im nächsten Schritt wird eine Variation der Verdichterdrehzahlen für ein Kennfeld betrachtet, welches aus verschiedenen Quellen- und Senkentemperaturen aufgespannt wird, vgl. Abbildung 4. Der Quellenmassenstrom wird dabei mit 10 kg/s konstant gehalten. Der Senkenmassenstrom wird in Abhängigkeit des Betriebspunktes so eingestellt, dass die vorgegebene Temperatur erreicht wird.

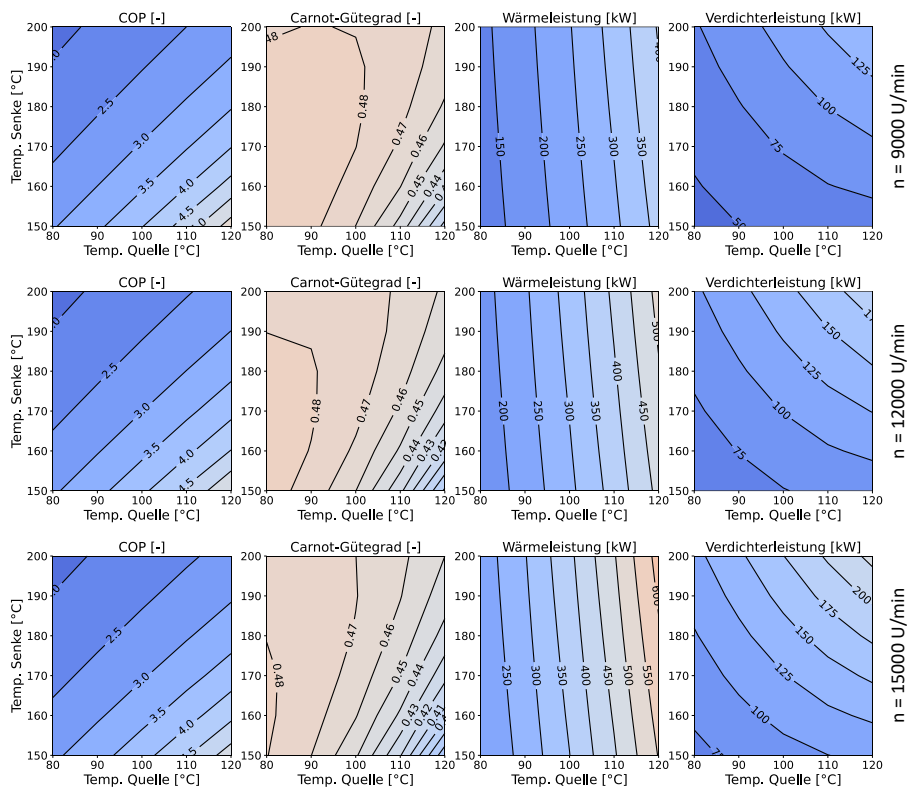


Abbildung 4 Kennfelder für eine Variation der Quellen- und Senkenbedingungen sowie unterschiedliche Verdichterdrehzahlen (Quellenmassenstrom 10 kg/s)

In dem ersten Kennfeld ist für alle Drehzahlen zu erkennen, dass der COP mit zunehmender Quellentemperatur und sinkender Temperaturdifferenz zunimmt, Abbildung 4. Dieser Effekt ist jedoch bereits durch die Definition des Carnot-COP zu erwarten. Interessant ist hingegen, dass der Carnot-Gütegrad mit abnehmender Quellentemperatur und bei geringen Senkentemperaturen zunimmt. Bei den gegebenen Randbedingungen wird das zur Verfügung stehende Potential also vor allem in diesem Bereich besonders effizient genutzt. Hintergrund ist die zunehmende Temperaturdifferenz zwischen dem Verdampferinhalt und der Wärmequelle.

Der insgesamt vergleichsweise geringe Carnot-Gütegrad der Hochtemperatur-Wärmepumpe in den verschiedenen Betriebspunkten ist auch auf die konservativen Annahmen für die Verdichtereffizienzen aus Tabelle 1 zurückzuführen.

Die bereits in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Effekte bewirken gegenüber dem Carnot-COP eine geringere Zunahme des tatsächlichen COP. Das zur Verfügung stehende Potential der

Wärmequelle kann weniger effizient genutzt werden, da die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Verdampfer zunehmend divergieren. Infolge sinkt der Gütegrad bei steigender Quellentemperatur.

Die steigende Quellentemperatur bewirkt darüber hinaus eine Zunahme der Kondensator- und Verdichterleistung. Die Ursache liegt in der steigenden Temperatur des Verdampferinhalts. Da aufgrund der getroffenen Randbedingungen an dieser Stelle Sattdampf vorliegt, nimmt der Druck und die Dichte des Wasserdampfes zu. Der volumetrisch arbeitende Verdichter fördert demnach einen höheren Massenstrom, was in sämtlichen Komponenten zu einer Leistungssteigerung führt.

Die steigende Senktemperatur bewirkt vor allem auf den Verdichter einen ähnlichen Anstieg in der Leistungsaufnahme wie eine Steigerung der Quellentemperatur. Die leicht überhitzten Dampfbedingungen am Kondensatoreintritt erfordern bei einer hohen Temperatur ebenfalls einen hohen Druck, was direkte Auswirkungen auf das zu leistende Druckverhältnis und damit die Volumenänderungsarbeit des Verdichters hat.

Die Drehzahl als letzte variierte Größe bewirkt bei einer Vergrößerung eine nahezu lineare Steigerung der Verdichterleistung - jedoch eine Verringerung des COP, vgl. Abbildung 4. Hintergrund sind die als konstant angenommenen Quellenbedingungen: Mit dem höheren geförderten Dampfmassenstrom wird eine größere Wärmemenge aus dem Quellenmassenstrom entnommen, was die Temperatur vom quellenseitigen Austritt verringert. Da diese beiden Temperaturen über die Pinch-Point Temperaturdifferenz gekoppelt sind, bewirkt dies eine Verringerung der im Verdampfer herrschenden Temperatur. Dieser Effekt wirkt sich wie zuvor beschrieben negativ auf den COP der Wärmepumpe aus. Für einen konstanten COP müssten die Quellenbedingungen analog verändert werden, was im nachfolgenden Kapitel behandelt wird.

### **3.3.3 Kennfeldsimulation bei einer Variation des Quellenmassenstroms**

Für die drei zuvor aufgeführten Drehzahlen werden verschiedene Quellenmassenströme betrachtet und für einen repräsentativen Betriebspunkt ausgewertet, vgl. Abbildung 5. Die Einflüsse der Quellen- und Senktemperaturen verhalten sich analog zu den Ausführungen in Kapitel 3.3.2. Der Quellenmassenstrom hat jedoch weitreichende Folgen auf die dargestellten Parameter. Ähnlich wie durch Chamoun et al. beschrieben, nimmt der COP der Wärmepumpe bei zunehmendem Quellenmassenstrom zu (Chamoun et al., 2014).

Diese Tendenz deckt sich mit den zuvor geschilderten Erkenntnissen: Der Verdampfer kann bei einer höheren Temperatur betrieben werden, was dazu führt, dass der Druck und die Dichte des Wasserdampfes zunehmen. Infolge dessen verringert sich das vom Verdichter zu leistende Druckverhältnis, während der Massenstrom zunimmt und die Leistungen ansteigen. In der Konsequenz spiegeln sich diese Effekte im höheren COP und damit im höheren Carnot-Gütegrad sowie in höheren Leistungen wieder.

Wenngleich die Hochtemperatur-Wärmepumpe in Anbetracht der Effizienzkennzahlen effizienter wird je größer der Quellen-Massenstrom ist, nimmt auf der Quellenseite die Austrittstemperatur aus dem Verdampfer zu. Die Wärmequelle wird also weniger ausgekühlt und damit weniger effektiv genutzt. Dieser Aspekt sollte daher bei verschiedenen Anwendungsfällen beachtet werden. Auch eine Änderung des Verdampferkonzepts, beispielsweise durch räumliche die Trennung der Wärmeaufnahme von der Verdampfung (Flash-Verdampfung), könnte diesen Effekt nicht

verhindern, wenngleich andere Vorteile an Gewicht gewinnen würden (z.B. Verwendung von Standard-Komponenten und eine vereinfachte Auslegung).

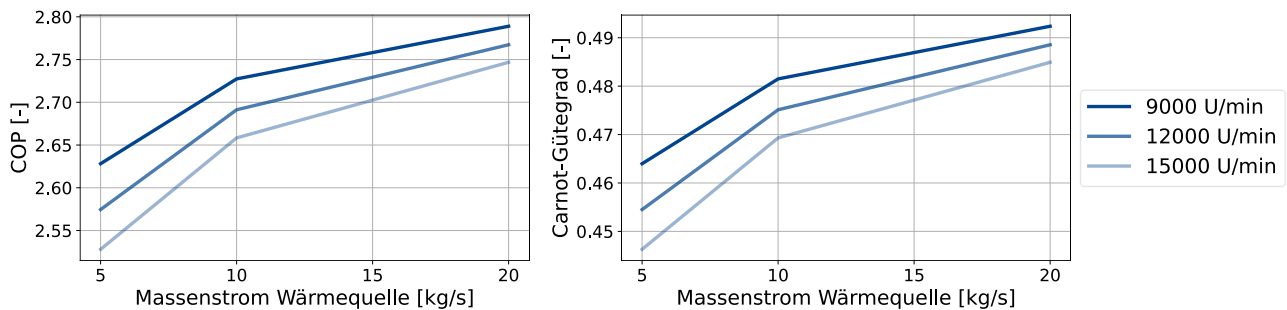


Abbildung 5 Einfluss des Wärmequellenmassenstroms auf den COP und den Carnot-Gütegrad für unterschiedliche Verdichterdrehzahlen (Betriebspunkt: Quelltemperatur 100 °C, Senktemperatur 180 °C)

#### 4. Endergebnis und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich der Schluss ziehen, dass die beschriebene Hochtemperatur-Wärmepumpe mit Wasser als Kältemittel eine sinnvolle und effiziente Technologie zur Versorgung verschiedener Prozesse sein kann, bei denen die Temperaturbereiche zwischen 100 und 200 °C liegen. Daher ist vor allem im Bereich der Prozessdampferzeugung eine effiziente Alternative zur konventionellen Wärmebereitstellung möglich. Bei hohen Quellentemperaturen, wie sie z.B. bei der tiefen Geothermie auftreten, bietet sich dieser Ansatz an. Insbesondere bei der Nutzung eines offenen Systems ist ein einfacher Aufbau der Wärmepumpe und damit eine vergleichsweise geringfügige Anlagenerweiterung möglich.

Im Zuge der Simulationen ergeben sich verschiedene Potentiale, wie die Effizienz der hier beschriebenen Wasserdampf-Wärmepumpe gesteigert werden kann. Dabei kann die Temperatur in dem überfluteten Verdampfer einen wichtigen Einfluss auf den Betrieb des Verdichters und somit auf den COP der Anlage ausmachen. Eine hohe Temperatur verringert die von dem Verdichter zu leistende Arbeit und steigert die Anlagenleistung. Dies kann jedoch zu Lasten der Ausnutzung einer Wärmequelle gehen. Im Falle einer Anwendung im Zusammenhang mit tiefer Geothermie wirkt sich dies in Form einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen dem entnommenen und rückgeführten Thermalwasser aus.

Für mögliche Energieeinsparungen liegen somit einige Maßnahmen nahe. Die direkte Effizienzsteigerung des zu optimierenden Prozesses liegt auf der Hand. Eine Dekarbonisierung kann jedoch auch über die Verringerung der Prozesstemperatur erreicht werden. Auf diese Weise kann gemäß des Carnot-Gütegrades leichter ein hoher COP erreicht werden. Auch Prozesse, die vorher nicht rentabel mit einer Hochtemperatur-Wärmepumpe versorgt werden konnten, könnten auf diese Weise mittels Hochtemperatur-Wärmepumpen erreicht werden.

Perspektivisch wird das Modell der Hochtemperatur-Wärmepumpe weiter verfeinert. So werden die Verlusteffekte in den Komponenten berücksichtigt (Druckverluste in Rohrleitungen und Wärmeübertragern) und die Wirkungsgrade des Verdichters genauer abgebildet, die in der Realität nicht konstant sind, sondern von Parametern wie Drehzahl und Druckverhältnis abhängen. Geplant ist darüber hinaus die praktische Realisierung des Wärmepumpenkreislaufes sowie der Aufbau eines Versuchsstandes, in dem die beschriebene Wärmepumpe experimentell vermessen wird.

## 5. Danksagung

Diese Publikation ist im Rahmen des Verbundvorhabens SteamScrew (03EN4048A-C) entstanden, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird. Ein besonderer Dank für die Zusammenarbeit gilt den Projektpartnern: Der Aerzener Maschinenfabrik GmbH sowie dem Fachgebiet Fluidtechnik der Technischen Universität Dortmund.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Quellenangaben

- Agora Energiewende & Fraunhofer IEG. (2023). *Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie (293/03-S-2023/DE)*. Agora Energiewende.
- Blesl, M. & Kessler, A. (2017). *Energieeffizienz in der Industrie* (2. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg.
- Chamoun, M., Rulliere, R., Haberschill, P. & Berail, J. F. (2012). Dynamic model of an industrial heat pump using water as refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 35(4), 1080–1091. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.12.007>
- Chamoun, M., Rulliere, R., Haberschill, P. & Peureux, J.-L. (2013). Modelica-based modeling and simulation of a twin screw compressor for heat pump applications. *Applied Thermal Engineering*, 58(1–2), 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.020>
- Chamoun, M., Rulliere, R., Haberschill, P. & Peureux, J.-L. (2014). Experimental and numerical investigations of a new high temperature heat pump for industrial heat recovery using water as refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 44, 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.019>
- Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. (2009). *Pulping chemistry and technology* (Bd. 2). De Gruyter.
- Europäische Kommission. (2021, Juli 14). *A European Green Deal*. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- Hu, B., Wu, D. & Wang, R. Z. (2018). Water vapor compression and its various applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 92–107. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.050>
- Mösch, T. W., Klotsche, K. & Hesse, U. (2021). *Schraubenverdichter für industrielle R718-Wärmepumpen*. DKV-Tagung 2021, Dresden.
- Pachai, A. C., Normann, J., Arpagaus, C. & Hafner, A. (2021). *Screening of future-proof working fluids for industrial high-temperature heat pumps up to 250 °C*. 9th IIR Conference: Ammonia and CO2 Refrigeration Technologies, Ohrid. <https://doi.org/10.18462/IIR.NH3-CO2.2021.0007>
- Umweltbundesamt. (2023, März 15). *Treibhausgas-Emissionen*. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>
- United Nations Environment Programme. (2022). *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window—Climate crisis calls for rapid transformation of societies* (DEW/2477/NA; S. 132). United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>
- Wu, D., Hu, B., Wang, R. Z., Fan, H. & Wang, R. (2020). The performance comparison of high temperature heat pump among R718 and other refrigerants. *Renewable Energy*, 154, 715–722. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.034>
- Zühlsdorf, B., Schlemminger, C., Bantle, M., Evenmo, K. & Elmegaard, B. (2018). *Design recommendations for R-718 heat pumps in high temperature applications*. 13. <https://doi.org/10.18462/iir.gl.2018.1367>

Fraunhofer IEG, Am Hochschulcampus 1 IEG, 44801 Bochum, Deutschland  
[simon.hoeckenkamp@ieg.fraunhofer.de](mailto:simon.hoeckenkamp@ieg.fraunhofer.de)