

Reduktion des Energiebedarfs durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen in Industrieprozessen

Sabrina Dusek¹, Veronika Wilk¹, Felix Hubmann¹, Manuel Verdnik², Rene Rieberer², Benjamin Zühlsdorf³

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggass 2, AT-1210 Wien, +43 664 8251411, Sabrina.Dusek@ait.ac.at, www.ait.ac.at

²TU Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25b, AT-8010 Graz, +43 316 8737302, rene.rieberer@tugraz.at, www.iwt.tugraz.at

³Danish Technological Institute, Kongsvang Allé 29, DK-8000 Aarhus C, +45 722 01258, bez@teknologisk.dk, www.dti.dk

Kurzfassung: In einer Vielzahl von Industrieprozessen wird thermische Energie auf einem Temperaturniveau über 100°C benötigt. Dieser Bedarf wird aktuell zu einem großen Anteil aus fossilen Energieträgern gedeckt. Hochtemperaturwärmepumpen mit Wärmenutzungstemperaturen über 100°C können hier eingesetzt werden, um die Effizienz des Prozesses zu steigern und somit den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Verschiedene Aspekte zu Hochtemperaturwärmepumpen werden im IEA HPT Annex 58, mit dem Ziel eine Wissensbasis zu schaffen, untersucht. In diesem Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse aus dem Projekt vorgestellt. Zum einen werden drei Anwendungsmöglichkeiten (Dampferzeugung, Ziegelrocknung und Extrusionskochen) von Hochtemperaturwärmepumpen vorgestellt. Weiters wird ein Einblick in den Hochtemperaturwärmepumpenmarkt in Bezug auf maximale Nutzungstemperatur (Senkenaustrittstemperatur) und Heizleistungsbereich gegeben. Auf Basis von Leistungszahlen ausgewählter Wärmepumpenprodukte wird das Einsparungspotential in Bezug auf Energiebedarf und CO₂-Emissionen näher erläutert. Am Ende des Beitrages wird noch ein Überblick zu den Entwicklungsperspektiven von Hochtemperaturwärmepumpen in verschiedenen Hochtemperaturbereichen und Heizleistungskategorien gegeben.

Keywords: Integrationsbeispiele, Elektrifizierung, Effizienzsteigerung, Marktentwicklung

1 Einleitung

Wärmepumpen spielen bei der Dekarbonisierung sowohl im Gebäudebereich als auch in der Industrie eine wichtige Rolle. Die Verkaufszahlen sind im Gebäudebereich im Jahr 2022 weltweit um 11% gestiegen [1]. In Österreich lag das Wärmepumpenmarktwachstum im Jahr 2021 bei 21,6% und im Jahr 2022 bei 59,9% [2]. Im Gebäudebereich ist die Wärmepumpe bereits eine etablierte Technologie zur Heizung und Warmwasserbereitung, im Industriebereich jedoch werden Wärmepumpen bisher nur vereinzelt eingesetzt. Im Jahr 2022 lag die Verkaufszahl von Industrierwärmepumpen in Österreich bei 131 Stück. Dies entspricht einer Steigerung des Absatzes um mehr als das Doppelte gegenüber dem Jahr 2021. [2]

Der österreichische Industriesektor hatte im Jahr 2022 einen Endenergieverbrauch von 89 TWh, dies entspricht einem Anteil von 30% am österreichischen Gesamtendenergieverbrauch [3]. Ein großer Anteil des industriellen Endenergieverbrauchs wird für die Nutzenergiekategorien „Raumklima und Warmwasser“ und „Prozesswärme <200°C“ verwendet. Im Jahr 2022 lag der Endenergieverbrauch für diese Nutzenergiekategorien bei 33 TWh [3]. In Abbildung 1 wird der Endenergieverbrauch je Industriesektor für die beiden Nutzenergiekategorien (siehe Abbildung 1 „Gesamt“) für das Jahr 2022 gezeigt. Außerdem wird der mit fossilen Energieträgern gedeckte Endenergiebedarf der beiden Nutzenergiekategorien je Industriesektor dargestellt.

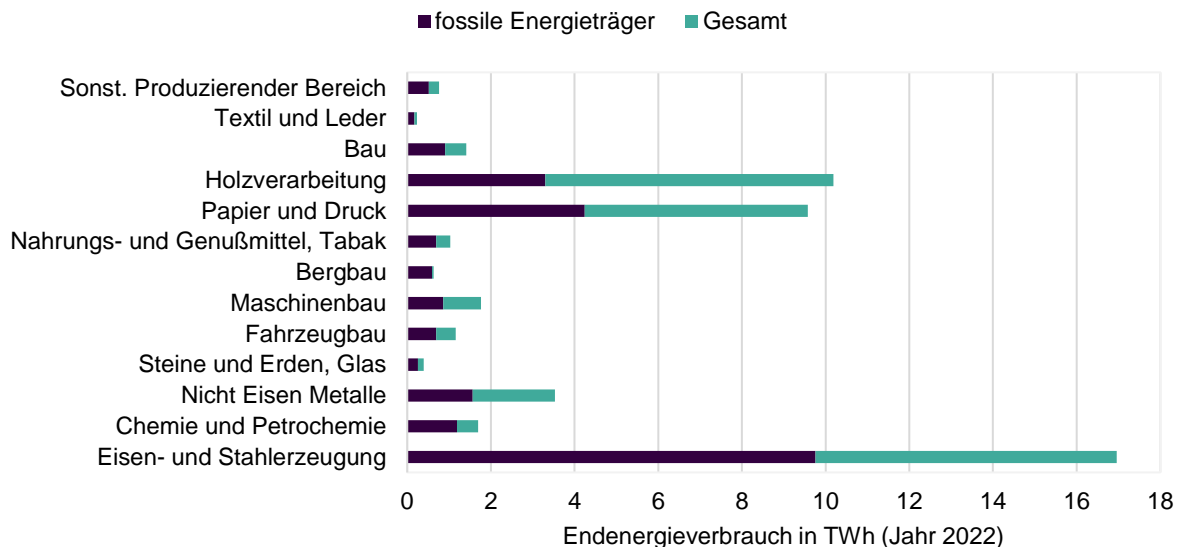


Abbildung 1: Gesamter Endenergieverbrauch für die Nutzenergiekategorien „Raumklima und Warmwasser“ und „Prozesswärme < 200°C“ sowie Anteil fossiler Energieträger für verschiedene Industriesektoren im Jahr 2022 (basierend auf [3]).

Wärmepumpen werden in der Industrie eingesetzt, um Abwärme, die auf Grund ihrer zu geringen Temperatur ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird, wieder für den Prozess nutzbar zu machen. Dadurch kann die Effizienz eines Prozesses gesteigert und somit der Endenergiebedarf und der Primärenergiebedarf gesenkt werden. Vor allem in den hier hervorgehobenen industriellen Nutzenergiekategorien kann davon ausgegangen werden, dass ihr Bedarf grundsätzlich mit Wärmepumpen gedeckt werden kann, sofern eine geeignete Wärmequelle vorhanden ist. Somit kann der Einsatz von fossilen Energieträgern und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen, vor allem bei der Anwendung von erneuerbarem Strom deutlich reduziert werden.

In vielen Industrieprozessen wird thermische Energie auf einem Temperaturniveau über 100°C benötigt, daher sind sogenannte Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) von besonderem Interesse. Als HTWP werden Wärmepumpen, die Wärmenutzungstemperaturen über 100°C bereitstellen, bezeichnet. Das IEA HPT Annex 58 Projekt [4] ist ein Projekt der Internationalen Energieagentur, in dem der Stand der Technik und die Potentiale der Hochtemperaturwärmepumpen erarbeitet wurden, um dieses Wissen breit zugänglich zu machen. Dieser Beitrag basiert auf den Informationen, die im Zuge dieses Projekts gesammelt und aufbereitet wurden. Es werden Anwendungsmöglichkeiten von HTWP (Dampferzeugung, Ziegel Trocknung und Extrusionskochen) vorgestellt. Weiters wird ein Überblick über die bereits

am Markt verfügbaren Wärmepumpentechnologien für den Hochtemperaturbereich gegeben. Abschließend wird ein Ausblick über die zukünftigen Entwicklungsperspektiven der Wärmepumpentechnologie im industriellen Umfeld präsentiert.

2 Anwendung von HTWP in Industrieprozessen

Wärmepumpen können in einer Vielzahl an Industrieprozessen eingesetzt werden. Grundlage dafür ist, dass eine geeignete Wärmequelle vorhanden ist. In vielen Industrieprozessen gibt es Abwärme, die als Wärmequelle genutzt werden kann. Auch Prozesse, die bereits aktiv gekühlt werden, können als Quelle für eine Wärmepumpe dienen.

Dampf spielt in vielen Industrieprozessen eine große Rolle und wird als Reaktions- oder als Wärmetransportmedium eingesetzt, daher werden im Folgenden Möglichkeiten zur Dampferzeugung mittels Wärmepumpe vorgestellt. Weiters gibt es eine Vielzahl an Trocknungsprozessen in der Industrie. Die Integrationsmöglichkeiten von Wärmepumpen in solchen Prozessen werden beispielhaft anhand der Ziegel Trocknung näher erläutert. Anhand des Anwendungsbeispiels Extrusionskochen wird gezeigt, wie Wärmepumpen in Prozessketten eingesetzt werden können. Die im Folgenden vorgestellten Anwendungsfälle werden im Zuge des IEA HPT Annex 58 Task 2 [4] publiziert.

2.1 Dampferzeugung

Abbildung 2 zeigt eine Wärmepumpe, die Heißwasser erzeugt und mit einem Flash-Tank zur Dampferzeugung kombiniert wird. Hier entsteht Dampf durch Entspannung des Heißwassers in einem sogenannten Flash-Ventil. Der Dampf wird aus dem Flash-Tank entnommen. Das Druckwasser aus dem Flash-Tank wird dann mit einer Pumpe zum Kondensator geleitet und dort wieder aufgeheizt.

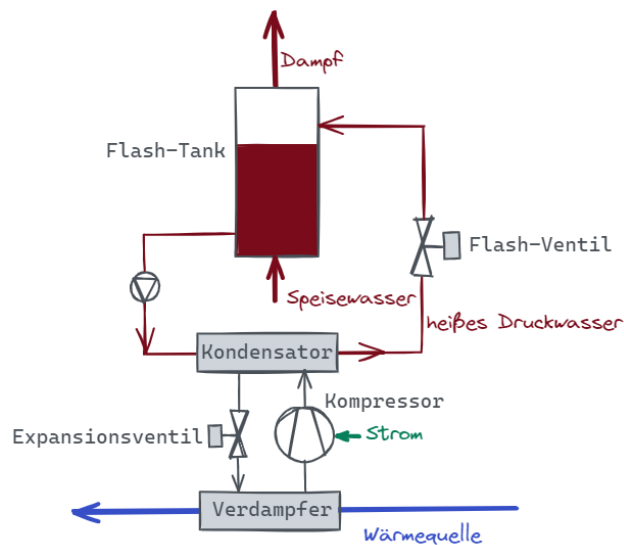


Abbildung 2: Dampferzeugung mit Wärmepumpe und Flash-Tank (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

Dieses Konzept hat den Vorteil, dass bereits am Markt verfügbare Wärmepumpen zur Heißwassererzeugung auch zur Dampferzeugung eingesetzt werden können. Der Nachteil dieses Systems liegt zum einen in der zusätzlichen Komponente und zum anderen daran,

dass das Heißwasser auf eine höhere Temperatur bereitgestellt werden muss, da es bei der Entspannung zu einem Temperaturabfall kommt und daher eine niedrigere Dampftemperatur resultiert. Grundsätzlich ist es auch möglich dieses System mit natürlicher Zirkulation anstatt mit einer Pumpe zu betreiben. Hier kommt es schon im Kondensator der Wärmepumpe zu einer Teilverdampfung und im Behälter werden die Flüssig- und die Dampfphase voneinander getrennt.

Das zweite Konzept mit einer Wärmepumpe Dampf zu erzeugen, besteht darin den Kondensator einer geschlossenen Wärmepumpe so auszuführen, dass der benötigte Dampf direkt im Kondensator erzeugt wird (siehe Abbildung 3). Dieses Konzept wird auch oftmals als direkte Dampferzeugung mit Wärmepumpe bezeichnet. Ein solcher Kondensator ist üblicherweise als Plate-and-Shell Wärmetauscher ausgeführt. Auf der einen Seite des Wärmetauschers wird das Kältemittel kondensiert, auf der anderen Seite Wasser verdampft. Somit kann die Übertragung der Heizleistung über den Wärmetauscher großteils bei konstanter Temperaturdifferenz zwischen den beiden Medien erfolgen.

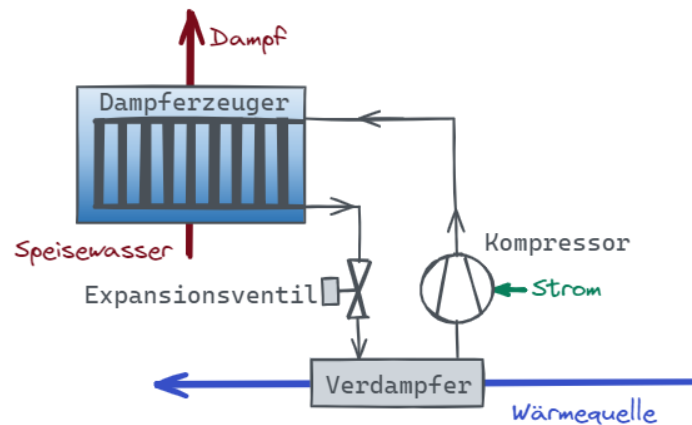


Abbildung 3: Direkte Dampferzeugung mit Wärmepumpe (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

Ein weiteres Wärmepumpenkonzept zur Dampferzeugung beinhaltet einen Dampfkompessor. Mit einem Dampfkompessor wird der Druck eines Dampfmassenstroms durch elektrische Energiezufuhr erhöht. Der entsprechende Dampfmassenstrom auf niedrigerem Druckniveau kann zum Beispiel mit Hilfe von Abwärme über Wärmetauscher erzeugt werden. Dieses Konzept wird in Abbildung 4 dargestellt. Eine weitere Möglichkeit ist zum Beispiel mit einem anderen dampferzeugenden Wärmepumpenkonzept Dampf auf einem niedrigen Druckniveau zu erzeugen und dann mit einem Dampfkompessor auf ein höheres Druckniveau zu bringen.

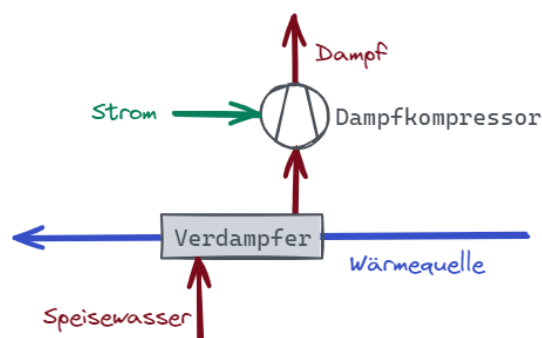


Abbildung 4: Dampferzeugung mit Dampfkompessor (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

In Wilk et al. [5] werden die drei hier vorgestellten Konzepte miteinander hinsichtlich Coefficient of Performance (COP) zur Bereitstellung von 200 kg/h Dampf bei Drücken zwischen 2 – 5 bar_a miteinander verglichen. Der COP beschreibt das Verhältnis zw. der Heizleistung und der benötigten elektrischen Leistung der Wärmepumpe. In dem folgenden Beispiel entspricht die Heizleistung der Leistung, die benötigt wird, um 200 kg/h gesättigten Dampf bei 4 bar_a (144°C) aus Speisewasser mit 80°C zu erzeugen. Dazu wird eine Abwasserquelle von 85°C auf 80°C abgekühlt. Mit der ersten hier vorgestellten Variante (Heißwasserwärmepumpe und Flash-Tank) wurde ein COP von 2,3 errechnet, wohingegen die Variante der direkten Dampferzeugung im Kondensator einen COP von 2,6 erreicht. Wird mit einer direkt dampferzeugenden Wärmepumpe gesättigter Dampf mit 1,5 bar_a (111°C) erzeugt und dieser Dampf anschließend mit einem Dampfkompessor auf 4 bar_a angehoben, ergibt sich ein COP von 3,2. Der höchste COP wurde mit der Kombination aus Dampfkompessor und dampferzeugender Wärmepumpe erreicht. Der Nachteil bei diesem Konzept ist jedoch, dass eine zusätzliche Komponente benötigt wird und die Mehrkosten besonders bei kleinen Systemen erheblich sein können.

An einem Produktionsstandort wird oftmals Dampf auf verschiedenen Druckniveaus benötigt. Aktuell werden zur Deckung des Dampfbedarfs vor allem erdgasbefeuerte Dampfkessel eingesetzt. Diese erzeugen den Dampf im Allgemeinen auf dem höchsten benötigten oder einem noch höheren Druckniveau. Der Dampfbedarf der Verbraucher wird dann durch Entspannung des Dampfes auf das jeweiligen Druckniveau gedeckt. Diese Dampfversorgungsstrategie wird in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

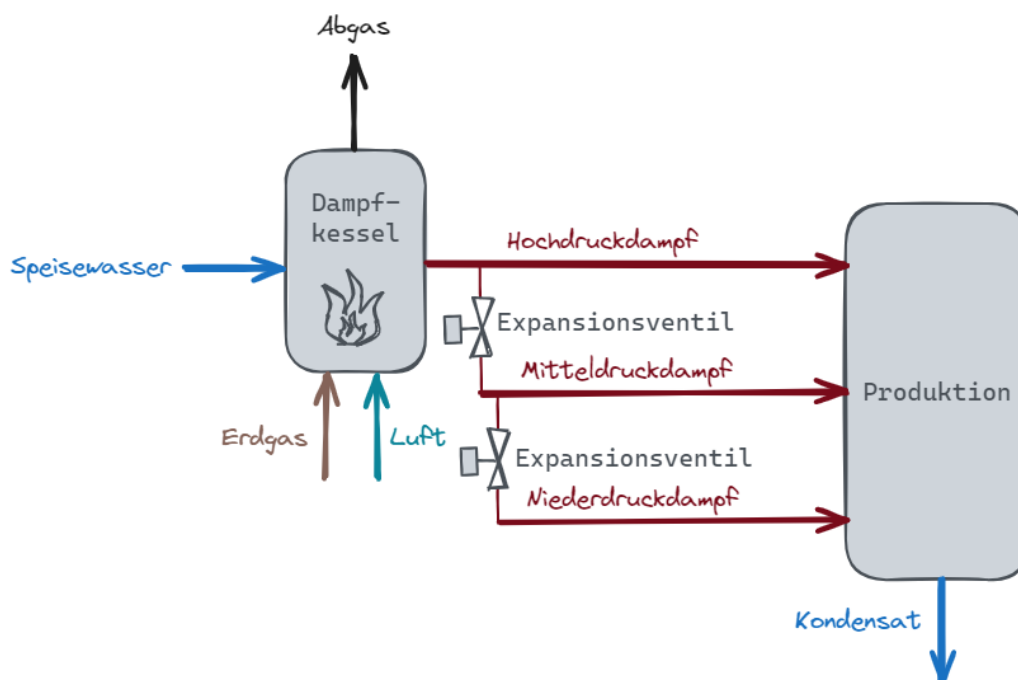


Abbildung 5: Erdgasbasierte Dampfversorgung eines Produktionsstandortes (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

Werden Wärmepumpen zur Versorgung des Dampfbedarfes eingesetzt, ist es deutlich effizienter, mit dem niedrigsten Druckniveau zu beginnen und alle weiteren Druckstufen mit Dampfverdichtern zu versorgen, die jeweils nur die benötigte Dampfmenge liefern. Diese Vorgehensweise ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Der Grund dafür liegt in dem von

der Wärmepumpe zu überwindenden Temperaturhub (Temperaturdifferenz zw. Senkenausstritt und Quellenausstritt). Je geringer der Temperaturhub ist, desto weniger elektrische Energie muss der Wärmepumpe zugeführt werden und desto höher ist die Effizienz bzw. der COP der Wärmepumpe.

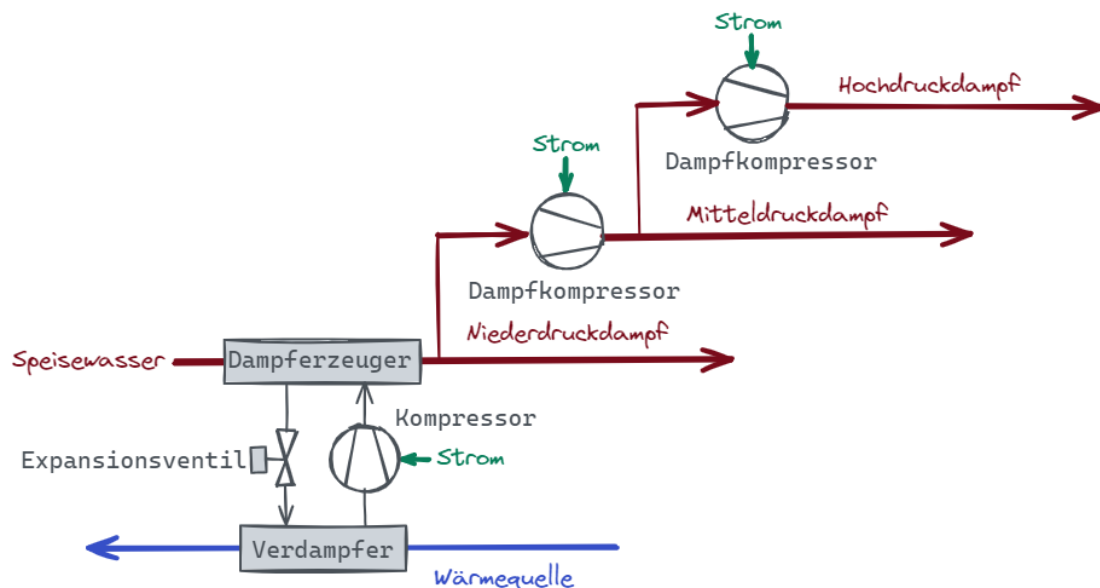


Abbildung 6: Dampfversorgung eines Produktionsstandortes mit Wärmepumpe (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

2.2 Ziegel Trocknung

Bei der Ziegelherstellung ist die Trocknung ein wesentlicher Prozess. Die erforderliche Temperatur im Trockner hängt vom Produkt bzw. von der Trocknungsgeschwindigkeit und der Länge des Trockners ab. Bei niedrigerer Trocknungstemperatur muss der Trockner entsprechend länger ausgeführt werden, um die gleiche Entfeuchtung wie bei höherer Temperatur zu erhalten. In einem weiteren Prozessschritt bei der Ziegelherstellung werden die Ziegel in einem Ofen gebrannt. Dabei entsteht Abwärme, die im Trockner genutzt werden kann. Aktuell wird diese oftmals mittels Gasbrenner weiter aufgeheizt, wenn eine höhere Temperatur benötigt wird.

Bei der konvektiven Trocknung tritt Abwärme in Form von feuchter Luft mit einem Taupunkt zw. 30 °C und 65°C auf [6]. HTWP können eingesetzt werden, indem die feuchte Abluft aus dem Trockner genutzt wird, um thermische Energie zum Aufheizen der Luft im Trockner (Trocknungsluft) bereitzustellen. Abbildung 7 zeigt den Ziegelrockner mit möglicher Wärmepumpenintegration, wobei zwei Konzepte unterschieden werden. Das erste Integrationskonzept beinhaltet nur eine Wärmepumpe (WP1, Abbildung 7), welche die Abluft bei rd. 50°C und einer relativen Feuchte zw. 60-80% über einen Wasserzwischenkreis nutzt. Diese Wärmepumpe heizt einen Wasserkreislauf auf rd. 90°C auf. Anschließend wird die Heizleistung indirekt mittels Wärmetauscher an die Trocknungsluft übertragen. Durch die Integration der Wärmepumpe kann der zugeführte Luftmassenstrom (Zuluft) und dessen Temperatur deutlich reduziert werden. Die Temperatur der Zuluft kann reduziert werden, da diese nicht mehr ausschließlich zur Erwärmung der Trocknungsluft verwendet wird. Dieses Konzept wurde auch von Puskas [7] vorgestellt. Die noch benötigte Zuluft kann, wenn möglich

weiterhin mittels Ofenabluft oder durch eine andere externe Wärmequelle zur Verfügung gestellt werden. Wird der Ofen in Zukunft dekarbonisiert, kann das die verfügbare Abwärme beeinflussen.

Eine weitere Wärmepumpe (WP2, Abbildung 7) ist im zweiten Integrationskonzept vorhanden. Diese wird genutzt, um über einen Wasserzwischenkreis die Zuluft zu beheizen, wenn nicht ausreichend Ofenabluft verfügbar ist. Als Wärmequelle für diese Wärmepumpe wird der Wasserzwischenkreis, der von der ersten Wärmepumpe aufgeheizt wird, verwendet. Mit diesem Integrationskonzept kann mit der Wärmepumpe theoretisch der gesamte Wärmebedarf des Trockners gedeckt werden. Jedoch ist dabei auf den sinkenden COP bei steigender Senkenaustrittstemperatur zu achten.

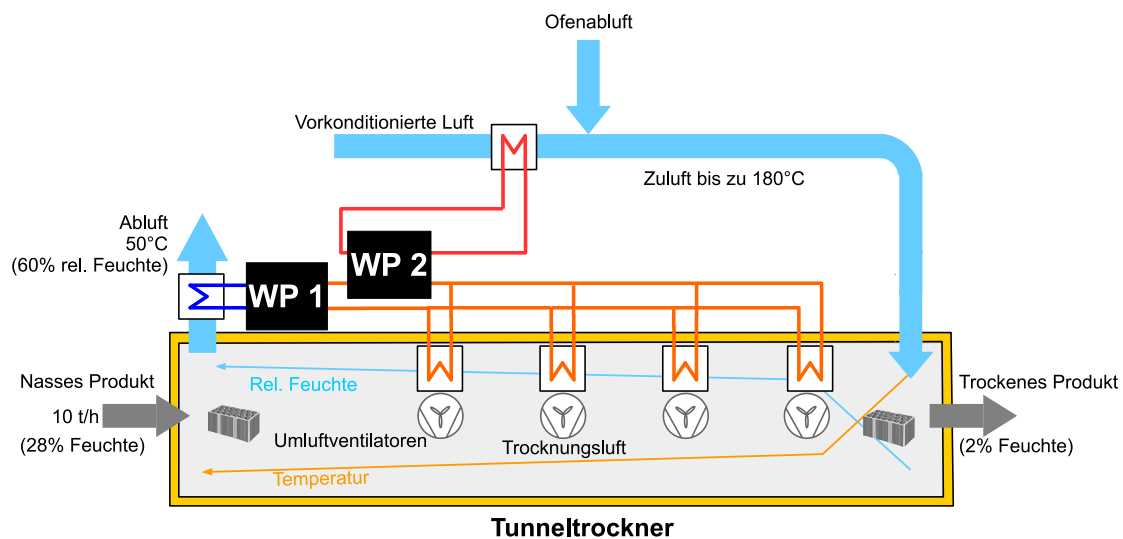


Abbildung 7: Schematische Darstellung der HTWP-Integration in einem Ziegel Trockner. Integrationskonzept 1: nur WP1, Integrationskonzept 2: WP1 und WP2 (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

2.3 Extrusionskochen

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung einer HTWP ist das Extrusionskochen. Eine Vielzahl an Lebensmittel werden mittels Extrusionskochen hergestellt, wie zum Beispiel vorgekochte Nudeln, Getreideflocken, Babynahrung und Tiernahrung [8]. Hier wird die Herstellung von Knäckebrot als Beispiel herangezogen. Bei der Knäckebrotherstellung wird nach Guy [9] der Teig zuerst im Extruder verarbeitet, wobei dieser sich durch die Reibungswärme auf rd. 90°C erhitzt. Die Solltemperatur des Teiges liegt jedoch bei rd. 150°C, daher muss zusätzliche thermische Energie zugeführt werden [9]. Die Beheizung erfolgt über den Zylinder, der entweder direkt elektrisch oder über einen Heizmantel, der mit einem Wärmetransportmedium wie zum Beispiel Öl, Wasser oder Dampf durchströmt wird [10]. Die für die Beheizung des Teiges notwendige Heizleistung kann mit einer HTWP bereitgestellt werden.

Im nachgeschalteten Trockner wird das Knäckebrot von einem Wassergehalt von 10% auf 6% gebracht [9]. Die feuchte Abluft aus dem Trockner kann als Wärmequelle für die HTWP verwendet werden und wird dazu in einen Sprühkondensator geleitet. Der Prozess und das Integrationskonzept einer HTWP sind in Abbildung 8 dargestellt. Es ist erkennbar, dass das Wärmetransportmedium im Zylindermantel eine höhere Temperatur (z.B.: 160°C) aufweisen muss, als benötigt wird um die Solltemperatur des Teiges (150°C) sicherstellen zu können.

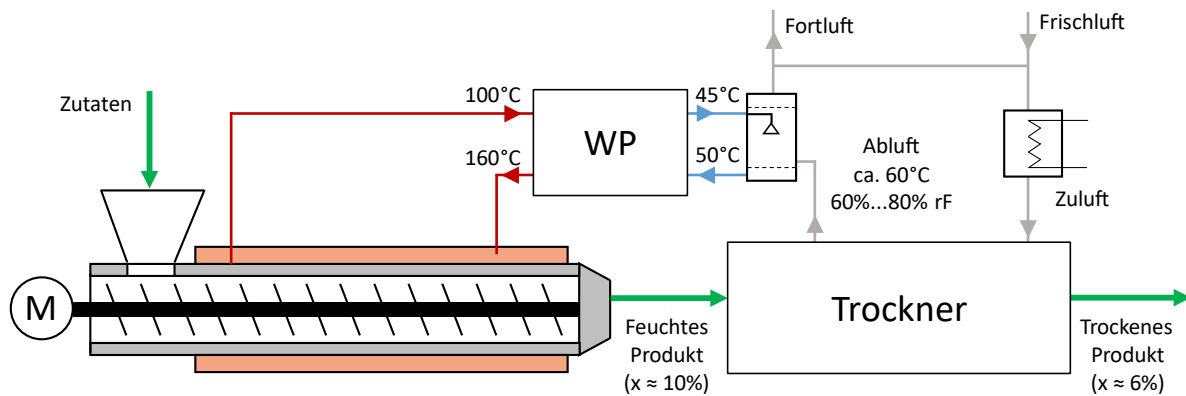


Abbildung 8: Schematische Integration eines HP in einen Extrusionskochprozess (Quelle: TU Graz)

3 Hochtemperaturwärmepumpenmarkt

In den letzten Jahren gab es einige Entwicklungen am HTWP-Markt. Abbildung 9 gibt einen Überblick über eine Vielzahl am Markt verfügbarer Produkte, wobei hier sowohl die maximale Nutzungstemperatur als auch der Heizleistungsbereich der jeweiligen Technologie angegeben werden. Es sind Produkte für Nutzungstemperaturen von 100°C bis 280°C und Heizleistungen von 30 kW bis 70 MW in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und Preisklassen verfügbar. Die Technology Readiness Levels (TRLs, siehe [12]) dieser Produkte werden vom Hersteller zwischen 4 und 9 angegeben. In der Darstellung sind geschlossene Wärmepumpen, die auf unterschiedlichen Prinzipien beruhen, wie zum Beispiel die Produkte von Olvondo und Enerin auf dem Stirling Prozess und die Produkte von SPH und Fuji Electric auf dem Carnot Prozess basieren. Weiters sind auch DampfkompRESSoren, wie zum Beispiel von den Herstellern Spilling oder Piller in der Darstellung enthalten.

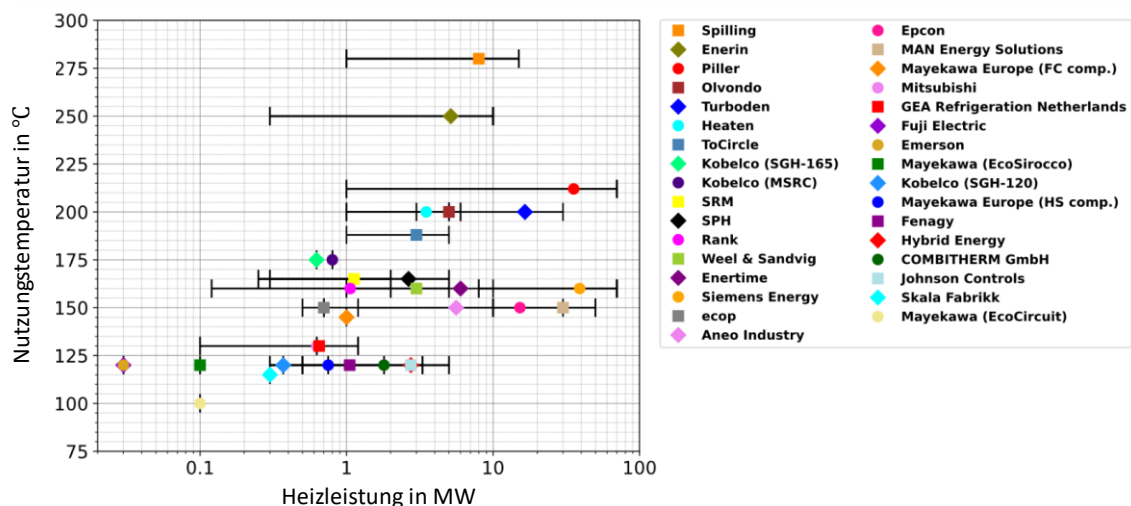


Abbildung 9: Marktüberblick für Hochtemperaturwärmepumpenprodukte inkl. maximale Nutzungstemperatur und Heizleistungsbereich (Quelle: Danish Technological Institute, [11])

Die mit den Produkten erreichbaren COP hängen unter anderem vom Temperaturhub ab. In Abbildung 10a sind die COP in Abhängigkeit vom Temperaturhub in ausgewählten Betriebspunkten und für ausgewählte Hersteller dargestellt. Bei der Auswahl wurden nur klassische Kompressionswärmepumpen zur Heißwasser oder direkten Dampferzeugung, die

auf dem Carnot-Prozess beruhen, berücksichtigt. Außerdem wurden nur Betriebspunkte mit Nutzungstemperaturen über 100°C ausgewählt. Weiters wird der COP-Verlauf für zwei unterschiedliche Carnot-Gütegrade (0,4 und 0,65) in Abhängigkeit vom Temperaturhub dargestellt. Für die Berechnung der beiden Kurven wurde eine Nutzungstemperatur von 120°C angenommen. Der Carnot-Gütegrad beschreibt, wie stark ein realer Wärmepumpenprozess vom idealen Vergleichsprozess, dem Carnot-Prozess, abweicht. Es ist erkennbar, dass der Gütegradbereich von 0,4 bis 0,65 die meisten von den Herstellern angegebenen Betriebspunkte beinhaltet.

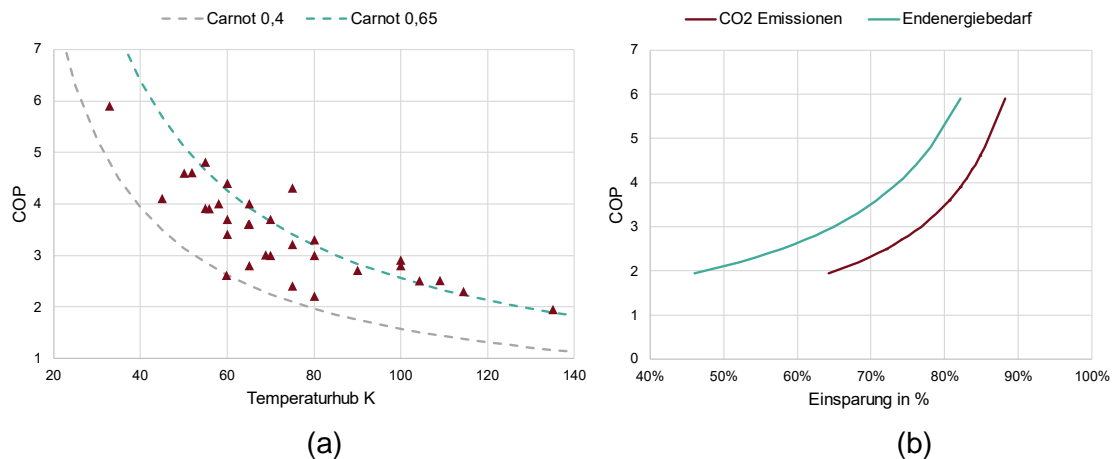


Abbildung 10: a) COP ausgewählter HTWP-Produkte in Abhängigkeit vom Temperaturhub; b) Einsparungen von CO₂ Emissionen und Endenergiebedarfs in Abhängigkeit vom COP (basierend auf [13])

Die Einsparungen in Bezug auf direkte CO₂ Emissionen und Endenergiebedarf für verschiedene COPs sind in Abbildung 10b dargestellt. Als Referenzsystem wurde angenommen, dass die Heizleistung der Wärmepumpe mittels Erdgasverbrennung mit einem Wirkungsgrad von 0,95 erzeugt wird. Zur Berechnung der direkten CO₂ Emissionseinsparungen wurde für Erdgas ein Emissionsfaktor von 201 g/kWh und für elektrische Energie ein Emissionsfaktor von 133 g/kWh angenommen [14]. Es ist erkennbar, dass die CO₂ Emissionseinsparungen im Bereich von 64% und 88% liegen. Die Einsparungen des Endenergiebedarfs liegen im Bereich zw. 46% - 82% in Abhängigkeit vom COP.

4 Zukünftige Entwicklungen Hochtemperaturwärmepumpe

Im IEA HPT Annex 58 Task 1 Bericht [11] werden die Entwicklungsperspektiven für verschiedene Kategorien von Hochtemperaturwärmepumpen bis zum Jahr 2030 beschrieben. Diese Kategorien beinhalten die Unterteilung in zwei Heizleistungsbereiche (200 kW bis 10 MW und >10 MW) und in Abhängigkeit von dieser Unterteilung zwei (<120°C und >120°C) bis drei (<120°C, 120°C-160°C, >160°C) Nutztemperaturkategorien. Die Perspektiven je Kategorie sind in Abbildung 11 dargestellt.

Der kleinere Heizleistungsbereich (200 kW bis 10 MW), im Nutzungstemperaturbereich unter 120°C und im Nutzungstemperaturbereich 120°C-160°C wird von Technologien geprägt, die auf gewerblicher und industrieller Kältetechnik basieren und für höhere Temperaturen weiterentwickelt wurden. Im höheren Nutzungstemperaturbereich (120°C-160°C) gibt es neue Technologieentwicklungen, wie zum Beispiel Kompressoren auf Basis von LKW-Motoren oder Turboladern.

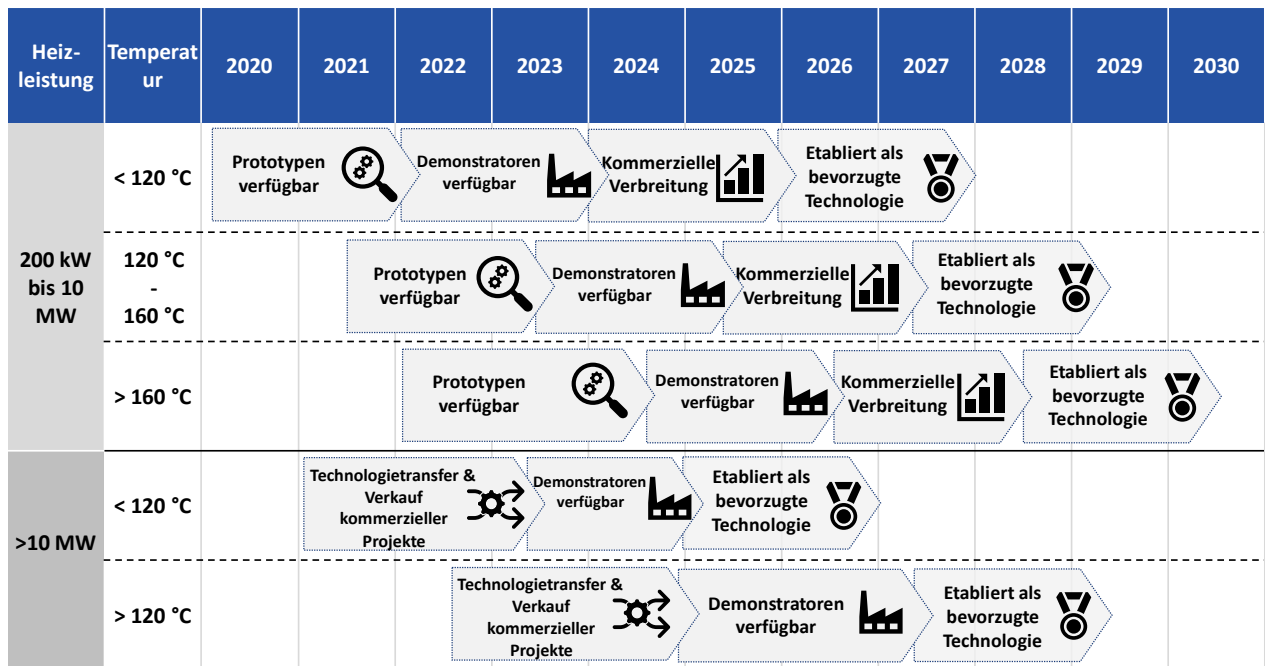


Abbildung 11: Technologieentwicklungsperspektiven für Hochtemperaturwärmepumpen bis 2030 (Quelle: Danish Technological Institute, [11])

Im Nutztemperaturbereich bis 120°C waren in den Jahren 2022 und 2023 nur wenige Produkte kommerziell verfügbar. Dennoch wurden in diesen Jahren Prototypen vor allem im Zuge von Forschungsprojekten demonstriert. Ab dem Jahr 2024 wird erwartet, dass die Technologie kommerziell ausgerollt wird und sich ab dem Jahr 2026 dann als bevorzugte Technologie zur Prozesswärmeversorgung in vielen industriellen Anwendungen etabliert hat. Im Nutztemperaturbereich von 120°C-160°C wird eine zum niedrigeren Nutztemperaturbereich zeitlich versetzte Entwicklung abgeschätzt. Es wird erwartet, dass die kommerzielle Verbreitung im Laufe des Jahres 2025 stattfinden wird. Der Übergang zur etablierten Technologie soll im Laufe des Jahres 2027 folgen. Eine deutlich längere Prototypenphase wird bei einem Nutztemperaturbereich von über 160°C erwartet, da die Technologien derzeit noch weniger ausgereift sind. Dennoch finden in dieser Kategorie vielversprechende Entwicklungen statt. Zum Beispiel eignen sich Dampfkompressoren und Wärmepumpen basierend auf dem Stirling Prozess für diesen Nutztemperaturbereich. Der Start der Demonstrationsphase wird im Laufe des Jahres 2024 und der Beginn der kommerziellen Verbreitung wird im Laufe des Jahres 2026 erwartet. Im Jahr 2028 soll die Technologie dann etabliert sein.

In der größeren Heizleistungskategorie (>10 MW) werden vor allem Turbokompressoren angedacht, wobei im Nutztemperaturbereich über 120°C Wasser als Kältemittel bevorzugt wird. Es gibt bereits einige Produkte für Nutztemperaturen über 200°C, wie in Abbildung 9 dargestellt ist. Dampfkompressoren wurden jedoch noch nicht für HTWP demonstriert. Es ist anzumerken, dass die Investitionskosten für Turbokompressoren bei Leistungen unter 10 MW verhältnismäßig hoch sind. Bei größeren Anlagen sollte die Technologie jedoch wettbewerbsfähig sein. In beiden Nutztemperaturbereichen wird erwartet, dass die Demonstration eher im vollen Umfang als kommerzielles Projekt durchgeführt wird und somit die Demonstrationsphase die kommerzielle Verbreitung beinhaltet. Wann die Technologie in dieser Heizleistungskategorie von der Demonstration zur etablierten Technologiephase übergehen wird, ist schwierig abzuschätzen, da es sich hier um hohe Investitionen handelt und

die Investitionsentscheidung stark von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig ist. Jedoch wird geschätzt, dass die Technologie im Nutztemperaturbereich unter 120°C ab 2025 etabliert ist. Im Nutztemperaturbereich über 120°C wird die Etablierung erst im Laufe des Jahres 2027 erwartet.

5 Schlussfolgerung

HTWP können in vielen Industrieprozessen angewendet werden und somit deutlich zur Dekarbonisierung des Industriesektors beitragen. Die richtige Integration ist entscheidend für die Effizienz der Wärmepumpe.

In diesem Beitrag wurden verschiedene Konzepte für den Einsatz von HTWP in Industrieprozessen vorgestellt. Dabei handelte es sich zum einen um Konzepte zur Dampferzeugung und zum anderen um Konzepte für zwei spezifische Anwendungsfälle, die Ziegel Trocknung und das Extrusionskochen. So wie Dampf in vielen Industriesektoren benötigt wird, existieren Trocknungsprozesse in einer Vielzahl von Industrieprozessen. Der Einsatz von Wärmepumpen in diesen Bereichen ist daher von großer Bedeutung für die Effizienzsteigerung und Dekarbonisierung der Industrie.

In den letzten Jahren sind einige Wärmepumpenprodukte im Hochtemperaturbereich auf den Markt gekommen. Diese basieren auf unterschiedlichen Prinzipien und weisen unterschiedliche Reifegrade auf. Der Überblick zeigt, dass je nach COP bzw. Betriebspunkt und Hersteller, eine Endenergieeinsparung zw. 46% und 82% erreichbar ist, wobei hier nur Wärmepumpen zur Heißwasser und direkten Dampferzeugung mit Nutzungstemperaturen über 100°C berücksichtigt wurden.

Es ist davon auszugehen, dass sich in den nächsten Jahren die HTWP-Technologie stark weiterentwickelt und es wird erwartet, dass sich die Technologie sowohl in der kleineren Heizleistungskategorie (200 kW bis 10 MW) als auch in der großen Leistungskategorie (>10 MW) etabliert.

6 Danksagung

Die Inhalte dieses Beitrages wurden im IEA HPT Annex 58: „Hochtemperaturwärmepumpen“ erarbeitet. Es nehmen 14 Länder an diesem Projekt teil, das vom Danish Technological Institute geleitet wird.

Das österreichische Projekt wird im Rahmen der IEA-Forschungskooperation im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Klimapolitik, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie durchgeführt.

7 Referenzen

- [1] International Energy Agency (IEA), „World Energy Outlook 2023“, Frankreich, 2023.
- [2] P. Biermayr und E. Prem, „Wärmepumpen Marktentwicklung 2022. Innovative Energietechnologien in Österreich“, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2023.

- [3] Statistik Austria, STATcube, Nutzenergieanalyse ab 2005, <https://www.statistik.at/datenbanken/statcube-statistische-datenbank>, Abgerufen am 29.01.2024.
- [4] IEA HPT Annex 58: High-Temperature Heat Pumps, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/>, Abgerufen am 01.12.2023.
- [5] V. Wilk, F. Helminger, S. Dusek, M. Lauer mann und T. Fleckl, „Dampferzeugung aus Abwärme mit Wärmepumpen“, DKV-Tagung 2019, Ulm, Deutschland, 20.11.2019 – 22.11.2019.
- [6] M. Lauer mann, S. Falkner, M. Hartl, B. Windholz, S. Puskas, D. Saldsieder und K. Ponweiser, „Industrielle Trocknung mit Kompressionswärmepumpen - Modellbildung und Simulation der konvektiven Ziegel-trocknung“, DKV-Tagung 2016, Kassel 17.11.2016 - 18.11.2016.
- [7] S. Puskas, „Brick Drying“, Präsentation beim NEFI Technology Talk, 12.10.2023, online.
- [8] L. Moscicki (Hrsg.), „Extrusion-cooking techniques: Applications, theory and sustainability“, Wiley-VCH, Weinheim, Deutschland, 2011.
- [9] R. Guy (Hrsg.), „Extrusion cooking: Technologies and applications“, 1. Auflage, Woodhead, CRC Press, Cambridge, Boca Raton, USA, 2001.
- [10] P. Fellows, „Food processing technology: Principles and practice“, Woodhead Publishing, Duxford, Großbritannien, 2017.
- [11] Heat Pump Centre (Hrsg.), „IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps. Task 1 – Technologies“, Task Bericht, August 2023, Schweden, ISBN 978-91-89821-34-7, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>, Abgerufen am 29.01.2024.
- [12] HORIZON 2020, „G. Technology readiness levels (TRL),“ Auszug aus Teil 19 - Entscheidung der Kommission C, 2014. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf, Abgerufen am 05.02.2024
- [13] IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps. Task 1 – Technologies, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>, Abgerufen am 29.01.2024.
- [14] Umweltbundesamt, „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger“, secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html, Abgerufen am 29.01.2024.