

Entwicklung und Aufbau einer Hochtemperaturwärmepumpe zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme und -kälte

Steffen Klöppel^{1*}, Enrico Jende², Leander Schleuß²,
Göksel Özüylasi¹

¹ Institut für CO₂-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),
Schwenninger Weg 1, 02763 Zittau
steffen.kloeppe@dlr.de

² Institut für CO₂-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),
Walther-Pauer-Straße 5, 03046 Cottbus
* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Die Vermeidung der Emission klimaschädlicher Gase stellt eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar. Während die Erzeugung elektrischer Energie die entsprechende öffentliche Diskussion dominiert, haben sowohl die Stofumwandlung als auch die Prozesswärme in der Industrie einen hohen Anteil an den Gesamtemissionen. Etwa ein Viertel der Emissionen geht auf diesen Sektor zurück.

Um die Industrie bei dem Erreichen ihrer Dekarbonisierungsziele zu unterstützen, wurde im Jahr 2019 das Institut für CO₂-arme Industrieprozesse des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt mit den Standorten Cottbus und Zittau gegründet.

Ein Schwerpunkt des Institutes ist die Entwicklung von Hochtemperaturwärmepumpen mit Wärmesenktemperaturen deutlich oberhalb von 150°C, welche bei der Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom die klimaneutrale Prozesswärmebereitstellung ermöglichen. Darüber hinaus spielen diese Systeme eine zentrale Rolle bei der Primärenergieeinsparung in der Industrie, besonders durch die Aufwertung von Abwärme.

Im Hinblick auf eine zunehmende Besteuerung der CO₂-Emissionen bei gleichzeitig steigendem Anteil der erneuerbaren Energien an der Elektroenergieerzeugung werden Hochtemperaturwärmepumpen zukünftig auch ökonomisch gegenüber fossilen Feuerungsanlagen an Bedeutung gewinnen.

In diesem Beitrag wird ein erster Versuchskreislauf auf Basis des linksläufigen Brayton-Prozesses mit interner Wärmerückgewinnung vorgestellt, wobei als Arbeitsmedium Luft eingesetzt wird. Der Versuchskreislauf erlaubt eine gleichzeitige Bereitstellung sowohl von Wärme bis zu 350°C als auch von Kälte bis -80°C.

Charakteristisch für den Brayton-Prozess ist der Temperaturgleit an Wärmequelle und -senke.

Als eine mögliche Anwendung wird die Gasverflüssigung bei gleichzeitiger Erzeugung von Prozessdampf diskutiert. Insbesondere für Luftzerlegungsanlagen in Chemieparks ergeben sich dabei mögliche Anwendungen. In dieser Veröffentlichung wird der Ersatz der Vorkühlung des Stickstoffverflüssigers bei gleichzeitiger Wärmebereitstellung untersucht. Es sind exergetische Wirkungsgrad von ca. 66% beziehungsweise ein COP von 2,35 zu erwarten.

Stichwörter:

Hochtemperaturwärmepumpe, Industrielle Wärme, Brayton-Prozess

1 Einleitung

Der Klimaschutz stellt seit langem in Deutschland ein gesamtgesellschaftliches Ziel dar, aber auch weltweit konnte in den letzten Jahren eine Übereinkunft zum globalen Klimaschutz in Paris unterzeichnet werden. Derzeit wurde in Deutschland der Fokus in der öffentlichen Diskussion auf die Vermeidung klimaschädlicher Gase bei der Erzeugung elektrischer Energie gelegt. Gegenüber dem Jahr 1990 konnten in 2020 bei der Energiewirtschaft ca. 40% Treibhausgasemissionen verringert werden, Abbildung 1 [1].

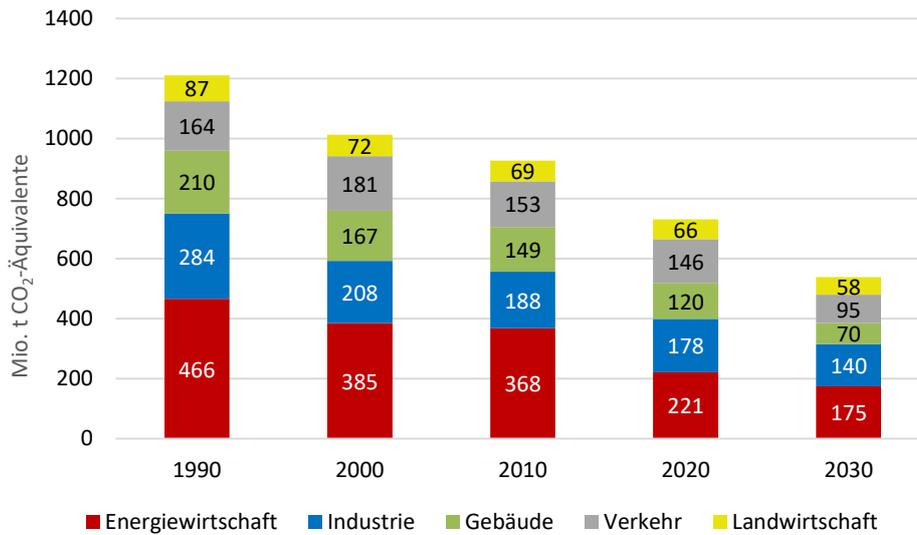


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren (in Mio. t CO₂-Äquivalente) in Anlehnung an [2]

Ein großer Anteil an CO₂-Emissionen beruht auf dem Bedarf an Energie sowohl für die Stoffumwandlung als auch für Prozesswärme, der dem Bereich Industrie zuzuordnen ist. In diesem Sektor wurden im Jahr 2017 ca. 68 % der eingesetzten Energie für Prozesswärme und – kälte eingesetzt. Die dafür eingesetzte Energie betrug 2016 ca. 1713 PJ, was ca. 22% des Endenergieverbrauchs darstellt [1]. Diese Zahlen offenbaren ein erhebliches Einsparpotential für CO₂-Emissionen.

Um effiziente Technologien und Strategien zur Reduzierung dieser industriellen Emissionen zu entwickeln, wurde 2019 ein neues DLR-Institut gegründet. Das Institut für CO₂-arme Industrieprozesse fokussiert sich auf die Forschungsfelder Simulation und Optimierung von Industrieanlagen, Substitution von konventionellen Reduktionsmitteln durch kohlenstoffarme Alternativen und die Entwicklung von Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP). Derzeitig auf dem Markt platzierte kommerzielle Wärmepumpen besitzen Senkentemperaturen von bis zu 160°C und basieren auf der subkritischen Kondensation [3]. Die zu erzeugenden Temperaturniveaus der verschiedenen Industriezweige variieren signifikant. Ein Großteil der Industrien benötigt Wärme zwischen 100 - 500°C. Insbesondere für die chemische, die Ernährungs-, die Gummi- und Kunststoff-, die Verlags- und Druckgewerbe- sowie die Papierindustrie sind diese Temperaturen vorrangig interessant, Abbildung 2, [4].

Die Abteilung Hochtemperaturwärmepumpen hat zum Ziel, mit Wärmesenkentemperaturen deutlich oberhalb von 150°C, welche bei der Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom emissionsfrei sind, die klimaneutrale Wärmebereitstellung zu ermöglichen. Darüber hinaus spielen diese Systeme eine zentrale Rolle bei der Primärenergieeinsparung in der Industrie, besonders durch die Aufwertung von Abwärme oder der gleichzeitigen Bereitstellung von Prozesswärme und -kälte.

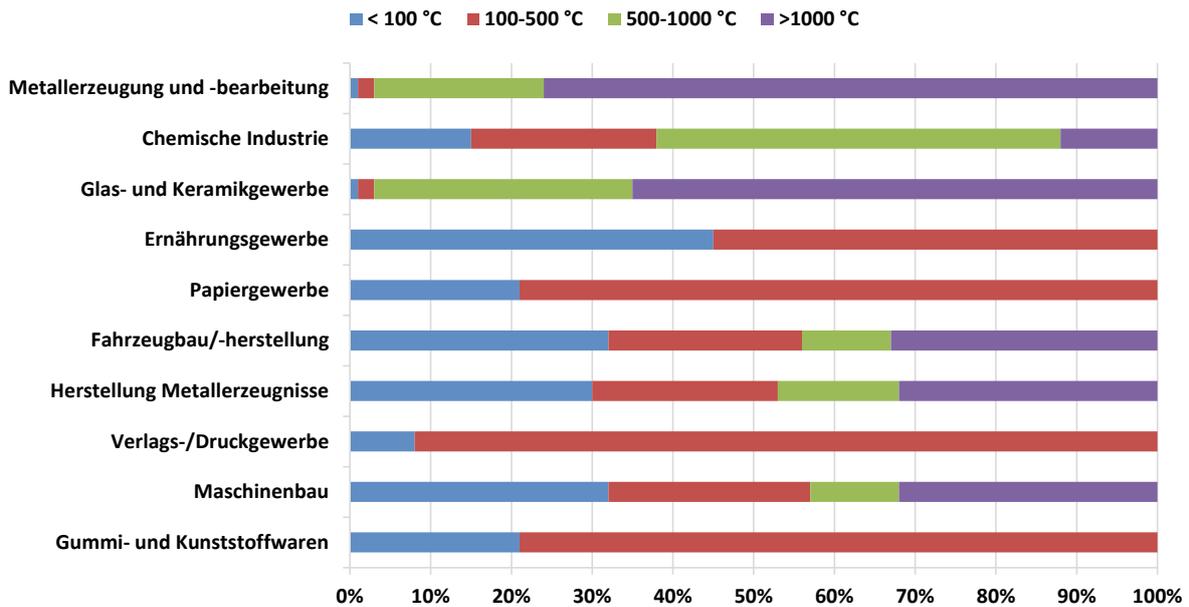


Abbildung 2: Benötigte Prozesswärmertemperaturen unterschiedlicher Industriezweige, nach [4]

2 Aufbau und Funktionsweise der Versuchsanlage

Der Aufbau und die Funktionsweise der Hochtemperaturwärmepumpe auf Basis des umgekehrten Joule- bzw. Brayton-Kreisprozesses folgt den, der einschlägigen Literatur zu entnehmenden, Betrachtungen am idealisierten Kaltgasprozess mit Rekuperation nach Abbildung 3 und hat folgende Zustandsänderungen mit idealem Gas als Arbeitsmedium [5] [6]:

- 1 → 2 Isentrope Kompression im Verdichter, Erhöhung des Druckniveaus und der Temperatur
- 2 → 3' Isobare Wärmeabfuhr (\dot{Q}_{ab}) im warmen Wärmeübertrager als Wärmesenke
- 3' → 3 Interner Wärmetransfer (\dot{Q}_{int}) von 3' zu 1' zur Senkung des Temperaturniveaus der Expansion
- 3 → 4 Isentrope Expansion in Expansionsturbine, Entspannung auf Druckniveau vor Verdichter und deutliche Senkung der Temperatur
- 4 → 1' Isobare Wärmezufuhr (\dot{Q}_{zu}) im Wärmeübertrager als Wärmequelle
- 1' → 1 Interner Wärmetransfer (\dot{Q}_{int}) von 3' zu 1' zur Erhöhung des Temperaturniveaus der Verdichtung

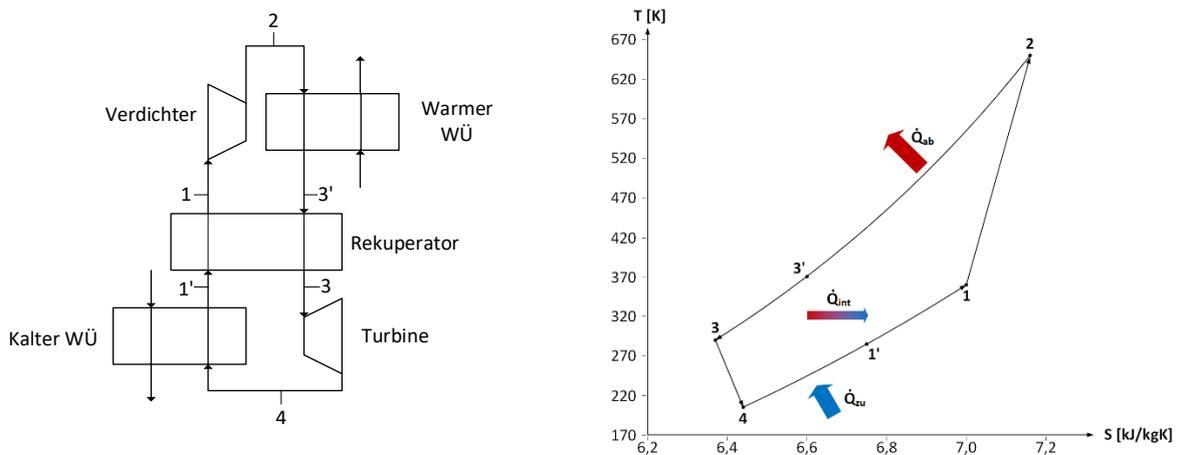


Abbildung 3: Kreisprozess und T;s-Diagramm des umgekehrten rekuperierten Brayton-Kreisprozesses

Der reale Kaltgasprozess weist folgende systematische Abweichungen vom idealen Verhalten auf, wohingegen Abweichungen vom idealen Gasverhalten vernachlässigt lassen [6]:

- Irreversible Verdichtung
- Druckverluste in Wärmeübertragern und Rohrleitungen
- Irreversible Expansion

Die entwickelte und aktuell in Umsetzung befindliche Versuchsanlage der Hochtemperaturwärmepumpe auf Basis des umgekehrten Brayton-Prozesses nach Abbildung 3 orientiert sich am obigen Kaltgasprozess und wurde für die Arbeitsmedien Luft und Argon ausgelegt.

Die speziell für die Versuchsanlagen entwickelten, mehrstufigen Turbomaschinen wurden für Druckverhältnisse bis ca. 7 mit Luft ausgelegt.

Zur unabhängigen Einstellung der Drehzahl ist der von Verdichter (1) und Turbine (2) sind diese nicht direkt über eine Welle verbunden, sondern über Getriebe, E-Maschinen und einem Gleichstromzwischenkreis gekoppelt. Drei Rohrbündel-Wärmeübertrager, welche im Rahmen der Entwicklung und des Aufbaus der Versuchsanlage nach dem Stand der Technik ausgelegt und beschafft wurden, ermöglichen die Wärmeabfuhr (Wärmesenke, 3), die Wärmezufuhr (Wärmequelle, 4) und den internen Wärmetransfer (Rekuperator, 5). Die Tabelle 1 stellt zusammenfassend die Hauptkomponenten und deren Spezifikationen dar.

Bei der Auslegung der Komponenten stand der schnelle Aufbau der Anlage zum Sammeln von Betriebserfahrung im Vordergrund. In nachfolgenden Entwicklungsprojekten sollen die Getriebe im An- bzw. Abtrieb der Turbomaschinen durch direktgekoppelte, schnelllaufende Elektromaschinen ersetzt werden. Somit werden die relativ hohen Verlustanteile durch die Getriebe entfallen.

Des Weiteren werden die Rohrbündelwärmeübertrager durch Wärmeübertrager mit einer sehr hohen spezifischen Wärmeübertragungsfläche, beispielsweise Rippenplattenwärmeübertrager, ersetzt, wodurch sich die Verluste infolge der Temperaturdifferenzen in den Wärmeübertragern reduzieren.

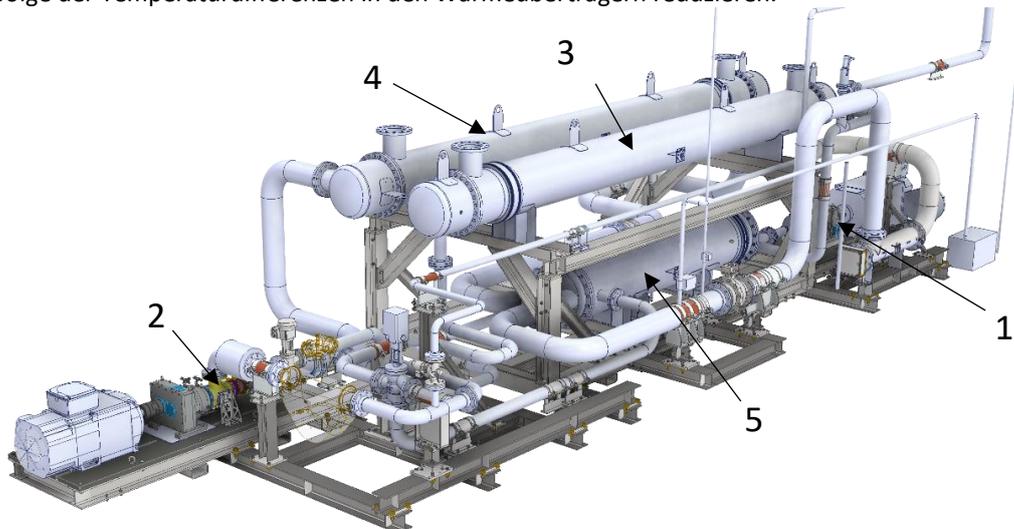


Abbildung 4: Aktuelles CAD-Modell der Versuchsanlage

Tabelle 1: Hauptkomponenten und Spezifikationen

Pos.	Hauptkomponente	Typ	Spezifikationen*
1	Verdichter	3- stufiger Turboverdichter (2 Axialstufen, eine Diagonalstufe)	- Drehzahl: 105.000 min ⁻¹ - Druckverhältnis: ca. 6
2	Turbine	2-stufige Axialturbine	- Drehzahl: 63.000 min ⁻¹
3	Wärmeübertrager (Wärmesenke)	Rohrbündel-Wärmeübertrager	- Übertragungsfläche: 100 m ² - Wärmestrom: ~ 220 kW

4	Wärmeübertrager (Wärmequelle)	Rohrbündel-Wärmeübertrager	- Übertragungsfläche: 100 m ² - Wärmestrom: ~ 55 kW
5	Rekuperator	Rohrbündel-Wärmeübertrager	- Übertragungsfläche: 72 m ² - Wärmestrom: ~ 50 kW

* Alle Angaben mit Arbeitsmedium Luft und im rekuperierten Betrieb

In Abbildung 5 ist der gesamte Systemaufbau im Betrieb mit Rekuperator dargestellt. Weitere prozessbedingte Peripherie zur vereinfachten Abbildung der Industrieprozesskopplung (Prozessauskopplung Wärme- und Kälte) sowie zum Betrieb und zur Konditionierung des Arbeitsmediums prägen den komplettierten Systemaufbau.

Simuliert mit trockener Luft als Arbeitsfluid können im unrekuperierten Betrieb nach aktuellem Stand der Auslegung und bei einer Wärmequellentemperaturen von 15°C Temperaturen über 250°C in der Wärme- und deutlich unter 0°C in der Kälte-Prozessauskopplung erreicht werden. Der rekuperierte Betrieb hebt das Temperaturniveau nach dem Verdichter nochmal deutlich auf über 350°C bei gleichzeitiger Senkung des Temperaturniveaus nach der Turbine auf bis zu -80°C, womit derzeit mit ausgekoppelten Prozesstemperaturuten von über 300°C in der Wärme- und bis zu -50°C in der Kälte-Prozessauskopplung der Versuchsanlage gerechnet wird. Weitere Simulationen mit Argon als Arbeitsfluid zeigen eine geringe Reduzierung der Leistungen und Wärmeströme, aber eine Erhöhung der Prozesstemperatur auf über 410°C in der Prozessauskopplung Wärme.

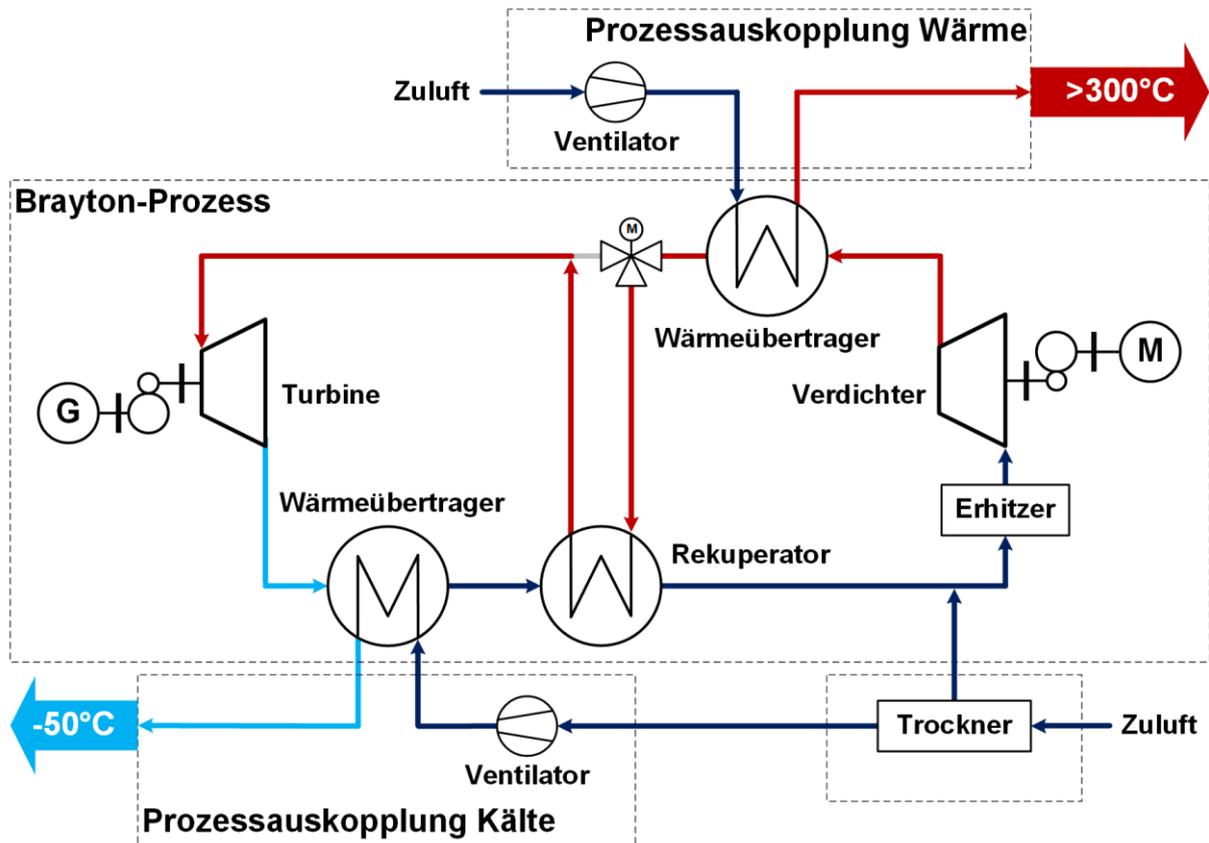


Abbildung 5: Schema der Versuchsanlage der Hochtemperaturwärmepumpe im rekuperierten Betrieb

3 Anwendung bei der Gasverflüssigung

Durch die Turbinenentspannung ergibt sich in dem kalten Wärmeübertrager ein lineares Temperaturprofil der Kältebereitstellung. Ein solches Profil kann für das Abkühlen von Gasströmen, beispielsweise in der Gasaufreinigung oder -verflüssigung genutzt werden.

Als eine mögliche industrielle Anwendung des Konzepts wird in diesem Abschnitt die Vorkühlung des Hochdruckstroms von Stickstoffverflüssigern an Luftzerlegungsanlagen (LZA) bei gleichzeitiger Erzeugung von Prozessdampf betrachtet.

3.1 Einsatzszenario

In Chemieparks befinden sich zumeist Luftzerlegungsanlagen zur Bereitstellung von Luftgasen über das örtliche Pipelinenetz. Darüber hinaus versorgen diese auch Verbraucher in der weiteren Umgebung mit tiefkalt-verflüssigten Gasen. Insbesondere flüssiger Stickstoff wird als Kälte-träger verwendet, während beim Sauerstoff die Dichteerhöhung und damit der vereinfachte Transport großer Mengen im Vordergrund stehen. Der Energiebedarf der LZA in Deutschland betrug im Jahr 2013 ca. 4,3 GWh [7], diese Energie wird in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Somit ergibt sich ein großes Potential zur Generierung von Prozesswärme.

Aus physikalischen Gründen wird für die Verflüssigung der Luftbestandteile ein sehr viel größerer Energieaufwand als für die Luftzerlegung benötigt. Die benötigte Verflüssigungsleistung ergibt sich dabei aus den benötigten Mengen an flüssigem Produkt.

Diese Verflüssigungsleistung wird nicht von der Luftzerlegungsanlage selbst bereitgestellt, sondern von einem, zu einem gewissen Grad integrierten, Verflüssiger, wobei dessen Kälteleistung teilweise zur Unterstützung der LZA verwendet wird.

Gleichzeitig verfügen Chemieparks zumeist über ein Dampfnetz zur Versorgung der einzelnen Betriebe mit Prozessdampf. Die Wärmeerzeugung basiert dabei zumeist auf fossilen Energieträgern, vornehmlich Erdgas.

Daher soll als eine Möglichkeit der Integration einer Brayton-Wärmepumpe die Vorkühlung des Verflüssigers der Luftzerlegungsanlage bei gleichzeitiger Erzeugung von Dampf untersucht werden.

3.2 Stickstoffverflüssiger mit Ammoniakvorkühlung

Als Vergleichsprozess zum Einsatz der HTWP soll eine konventionelle Vorkühlung des Verflüssigers mit einer Ammoniakkälteanlage betrachtet werden.

Auf der linken Seite von Abbildung 6 ist ein vereinfachtes Schaltbild einer solchen Verflüssigungsanlage nach dem Claude-Prozess mit einer Turbine in Anlehnung an [8] dargestellt. Der Stickstoff wird zunächst von 1,1 bar auf 6,5 bar und dann weiter auf 45 bar verdichtet. Die Verdichtung vom Nieder- auf den Mitteldruck geschieht mit zwei Stufen, diejenige vom Mittel- auf den Hochdruck in drei Stufen. Nach jeder Stufe wird der Stickstoff mit Kühlwasser auf 300 K (26,85°C) zurückgekühlt. Für die einzelnen Verdichterstufen wird ein isentroper Gütegrad von 85% angenommen.

Der Hochdruckstrom wird im Verflüssiger im Gegenstrom vorgekühlt, unterstützt durch eine Kälteanlage, die Ammoniak nahe Umgebungsdruck (Normalsiedepunkt NH_3 : -33,3°C) verdampft.

Ein Teilstrom wird in der Turbine (angenommener isentroper Gütegrad 85%) arbeitsleistend entspannt und kühlt den Hauptstrom weiter herunter. Dieser wird schließlich in zwei Stufen drosselentspannt und die flüssige Phase dem Tank zugeführt, während der gasförmige Anteil jeweils zur Vorkühlung genutzt wird.

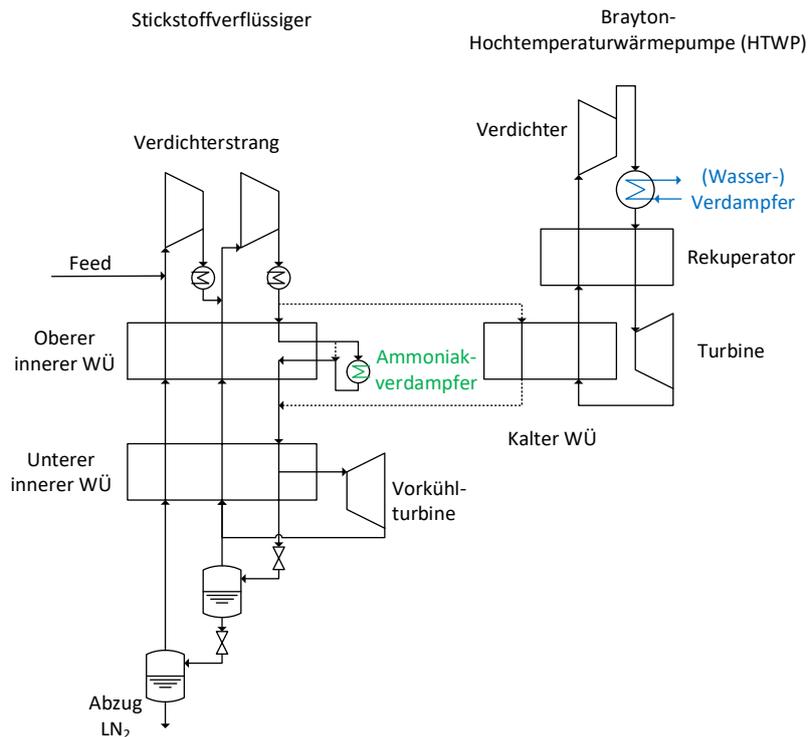


Abbildung 6: Stickstoffverflüssiger konventioneller Bauart mit Ammoniakvorkühlung und alternativ Vorkühlung mit Brayton-Hochtemperaturwärmepumpe. Energierückgewinnung der Turbinen ist nicht dargestellt.

Die Berechnung der Verflüssigerkreisläufe erfolgt durch ein eigens erstelltes Softwaretool. Dieses basiert auf einer Tabellenkalkulationssoftware in Verbindung mit dem Stoffdatenprogramm CoolProp [9].

Durch die Abkühlung des Stickstoffs, die Entnahme zur Turbinenentspannung und die Vorkühlung ergeben sich charakteristische Temperaturprofile in dem Verflüssiger. Betrachtet wird eine Verflüssigungsleistung von 1 kg/s, entsprechen 2880 Nm³/h.

Bei Verwendung einer Ammoniakkälteanlage ergeben sich Wärmeübertragerkurven wie in Abbildung 7 a) beispielhaft dargestellt. Zunächst laufen die Wärmeübertragerkurven aufgrund der höheren Wärmekapazität bei höheren Drücken auseinander. Durch die Ammoniakverdampfung werden die Temperaturprofile wieder zusammengeführt (angenommene Temperaturdifferenz am Pinch-Punkt: 3 K), gefolgt von einer weiteren Aufspreizung. Bei tieferen Temperaturen werden die Profile wiederum durch die Vorkühlturbine zusammengeführt.

Durch das Zusammenführen der Wärmeübertragerkurven mittels Ammoniakverdampfung steigt die benötigte Fläche des Wärmeübertragers für das Erreichen des Pinch-Punkts stark an. Anschaulich lässt sich dies durch den benötigten NTU-Wert je übertragener Wärmemenge darstellen (Abbildung 7 c). Es ist zu erkennen, dass die benötigte Wärmeübertragerfläche in der Nähe der Punkte minimaler Temperaturdifferenz (Pinch-Punkte) stark ansteigt. Es werden also große Flächen benötigt, um die Wärmeübertragerkurven sowohl am warmen Ende des Wärmeübertragers als auch nach der Vorkühlung durch die Ammoniakkälteanlage wieder zusammen zu bringen.

3.3 Stickstoffverflüssiger mit Hochtemperaturwärmepumpe

Alternativ zu den herkömmlichen Ammoniakkälteanlagen kann eine Hochtemperaturwärmepumpe nach dem linksläufigen Brayton-Prozess zur Vorkühlung verwendet werden. Bisher ist die Verwendung von Turbinen in diesem Temperaturbereich aufgrund der hohen anteiligen Exergieverluste durch nicht ideale Expansion unattraktiv. Durch die Aufspreizung der Temperaturniveaus der Kompression und der Expansion sinkt dieser Verlustanteil ab. Gleichzeitig kann durch die Verwendung der Wärme zur Dampferzeugung ein zusätzlicher Nutzen generiert werden.

Bei einer bestehenden LZA kann eine HTWP durch das Abkühlen eines Teils des Hochdruckstroms integriert werden, wie auf der rechten Seite von Abbildung 6 gezeigt. Dabei kann die Temperaturspanne über das Druckgefälle in der HTWP optimal auf die vorhandenen Wärmeübertrager angepasst werden. Mit dem, durch die Turbine der

Wärmepumpe erzeugten, linearen Temperaturprofil der Kältebereitstellung ergeben sich Wärmeübertragerkurven wie in Abbildung 7 b) dargestellt. Mit diesem Profil wird der Forderung nach einem linearen Verhältnis von Temperaturdifferenz zu absoluter Temperatur entsprochen [10].

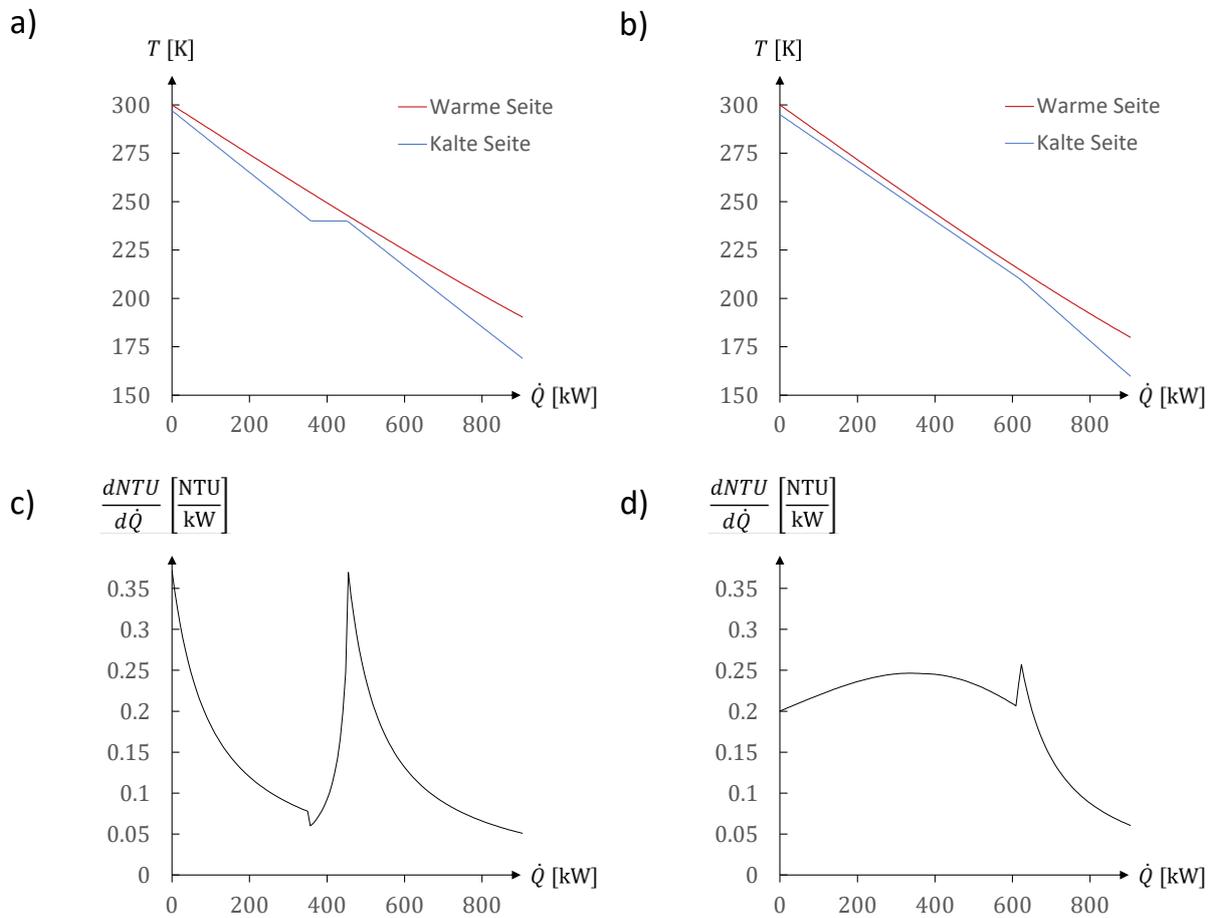


Abbildung 7: a) Wärmeübertragerkurven der Vorkühlung des Stickstoffstroms im Verflüssiger mit Ammoniak, b) mit Hochtemperaturwärmepumpe, c) relativer Bedarf an Wärmeübertragungseinheiten bei Vorkühlung mit Ammoniak, d) bei Vorkühlung mit Hochtemperaturwärmepumpe. Übertragene Wärme bei Verflüssigung von 1 kg/s.

Mit diesem Temperaturprofil ergibt sich eine weitaus günstigere Ausnutzung des Wärmeübertragers, wie aus dem spezifischen NTU-Bedarf über der übertragenen Wärmeleistung in Abbildung 7 d) ersichtlich wird. Infolge der kleinen, linearen Temperaturdifferenzen im Wärmeübertrager kann der durch die Wärmeübertragung resultierende exergetische Verlust reduziert werden, dies zeigt sich durch eine Verringerung des notwendigen Massenstroms für die Turbine des Verflüssigers von 5,6 auf 4,9 kg/s.

Die Verdichtereintrittstemperatur der HTWP wurde mit 115°C angenommen, bei einem Verdichtungsverhältnis von 6, entsprechend dem Druckverhältnis der Versuchsanlage. Der zu verdichtende Massenstrom hängt von der benötigten Vorkühlleistung ab und beträgt in dem Beispiel 1,6 kg/s. Somit werden für die Verdichtung in der HTWP 383 kW benötigt. Die Dampfproduktion erfolgt auf zwei verschiedenen Druck- und somit Temperaturniveaus (25 bar/224°C und 2 bar/120°C), um auf der warmen Seite die Anpassung an das lineare Temperaturprofil des Verdichters zu verbessern. Günstiger wäre eine Nutzung der sensiblen Wärme durch einen Stoffstrom mit annähernd konstanter Wärmekapazität, beispielsweise in der Luftvorwärmung für Trocknungsprozesse. Trotz der relativen Nähe von Wärmeerzeuger und -senke in den Chemieparks muss auf Dampf als Wärmeträger zurückgegriffen werden. Dabei kann es auch vorteilhaft sein, die Verdichtung in zwei Stufen durchzuführen und jeweils mit der Verdichtungswärme Dampf zu produzieren, falls nur eine Dampfschiene verfügbar ist. Im gewählten Beispiel mit der stufenweisen Dampferzeugung können 488 kg/h bei 25 bar und 281 kg/h bei 2 bar bereitgestellt werden. Dies entspricht einer Wärmeleistung von 505 kW.

Die Berechnung der Hochtemperaturwärmepumpe erfolgt mit der Simulationssoftware Epsilon.

3.4 Vergleich der beiden Optionen

Bei der konventionellen Kreislaufgestaltung mit Ammoniakvorkühlung werden für die Verdichtung des Stickstoffs 1540 kW benötigt. Weitere 31 kW benötigt die Ammoniakkälteanlage bei einem angenommenen COP von 3. Durch die Turbinenentspannung können 285 kW zurückgewonnen werden. Somit beträgt der Aufwand an Elektroenergie insgesamt 1285 kW. Wird eine Hochtemperaturwärmepumpe verwendet, die den linksläufigen Brayton-Prozess abbildet, so werden für die Verdichtung nur noch 1424 kW benötigt. Durch den geringeren Turbinenstrom sinkt die Wellenleistung der Turbine auf 243 kW ab. Für den Antrieb der Hochtemperaturwärmepumpe werden 319 kW benötigt. Der gesamte Elektroenergiebedarf beträgt 1499 kW und ist somit um 214 kW höher als derjenige des konventionellen Kreislaufs. Mit diesem geringfügig höheren Wert ist es möglich, Dampf mit einem exergetischen Wert von 107 kW bei 18 bar und 36 kW bei 2 bar zu produzieren.

Im Vergleich zur Vorkühlung mit der Ammoniakanlage ergibt sich ein exergetischer Wirkungsgrad von 66% als Verhältnis der in Wärme bereitgestellten Exergie zum zusätzlichen Aufwand an elektrischer Energie.

Die gewonnene Hochtemperaturwärme lässt sich ins Verhältnis zu dem zusätzlichen Aufwand an elektrischer Energie setzen. Dabei ergibt sich ein Wert von 2,35. Dieser kann als eine Art COP der Maßnahme betrachtet werden.

3.5 Weitere Aspekte

Während durch den Betrieb der Versuchsanlage die prinzipielle technologische Reife nachgewiesen werden kann, sind für die praktische Umsetzung auch wirtschaftliche und rechtliche Fragen zu klären. In zukünftigen Energiesystemen wird eine Zusammenarbeit der Unternehmen an einem Standort unerlässlich sein, um eine optimale Nutzung der vorhandenen Energieströme zu erreichen. Der Betreiber der Luftzerlegungsanlage wird dabei zum Wärmeproduzenten.

Die gewählten Parameter der Vorkühlung durch die Hochtemperaturwärmepumpe sind an diejenigen der Versuchsanlage angelehnt.

Technologisch betrachtet wäre eine sehr viele stärkere Integration der Wärmepumpe in den Stickstoffverflüssiger besser. Beispielsweise könnten die Verdichtereintrittstemperaturen nach dem ersten Verdichter angehoben und nach jeder Stufe Dampf produziert werden. Dies würde eine vollkommene Integration der HTWP in den Prozess bedeuten. Auch andere Formen der Wärmenutzung sind möglich, beispielsweise durch einen offenen Kaltdampfprozess, der das dann im Unterdruck verdampfende Kühlwasser der Nachkühler direkt als Arbeitsmedium nutzt und als Prozessdampf bereitstellt. Diese größeren Eingriffe in den Verflüssiger setzen aber ein Interesse des Betreibers an dem Verkauf des zusätzlichen Produkts Prozesswärme und den sich aus der Installation und dem Betrieb der HTWP ergebenden Aufwands voraus.

4 Zusammenfassung

Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels ist es notwendig, die CO₂-Emissionen signifikant zu vermindern. Neben der derzeit im Fokus stehenden Branche Energieerzeugung bietet der Sektor Industrie ein gleichwertig hohes Potential zur Einsparung von Treibhausgasen. Insbesondere die Prozesswärmeerzeugung kann unter Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen durch Vermeidung von fossilen Energieträgern dekarbonisiert werden. Das DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse entwickelt Hochtemperaturwärmepumpen im Temperaturbereich zwischen 100-500°C. Dafür werden der linksläufige Rankine- und der Brayton-Prozess genutzt. Diese Kreisprozesse sind in Umsetzung in Form von Pilotanlagen. Die Entwicklungen werden in den nächsten Jahren auf Großanlagen im MW-Bereich übertragen.

Am Standort Cottbus wird derzeit eine Versuchsanlage auf Basis des Brayton-Prozesses aufgebaut. Speziell für die Versuchsanlage entwickelte, mehrstufige Axialturbomaschinen mit Druckverhältnissen im Bereich von 6 finden zur Kompression und Expansion des Arbeitsmediums Anwendung. Der Verdichter ist zur Erhöhung der experimentellen Variabilität der Versuchsanlage nicht direkt über eine Welle mit der Turbine verbunden, sondern über Getriebe, E-Maschinen und einem Gleichstromzwischenkreis miteinander gekoppelt und erhöht damit die Designfreiheit der Turbokomponenten. Drei Rohrbündel-Wärmeübertrager ermöglichen die Auskopplung der Wärme, der Kälte und die Rekuperation. Es werden als Wärmesenke 300°C bei gleichzeitiger Senkung des Temperaturniveaus nach der Turbine auf bis zu -80°C. erzielt. In nachfolgenden Projekten werden die einzelnen Komponenten der Anlage weiter optimiert.

Eine mögliche Anwendung für Hochtemperaturwärmepumpen nach dem linksläufigen Brayton-Prozess ist die Vorkühlung von Stickstoffverflüssigern an Luftzerlegungsanlagen unter gleichzeitiger Erzeugung von Prozessdampf. Der Verflüssigungsprozess profitiert dabei von dem linearen Temperaturprofil der Kältebereitstellung und ermöglicht dabei die Bereitstellung einer Wärmemenge die um den Faktor 2,35 größer als die zusätzlich aufgewendete Elektroenergie ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Energieeffizienz in Zahlen 2019 - Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019,“ Berlin, 2019.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren,“ März 2021. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Industrie/treibhausgasemissionen-deutschland-nach-sektoren.html>. [Zugriff am 23.08.2021].
- [3] C. Arpagaus, „Hochtemperatur Wärmepumpen -Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel,“ NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Buchs (Ch), 2017.
- [4] Agentur für Erneuerbare Energien e.V., „Erneuerbare Energie für die Industrie: Prozesswärme aus Bioenergie sorgt für Unabhängigkeit und Klimaschutz,“ Berlin, 2017.
- [5] P. v. Böckh und M. Stripf, Technische Thermodynamik - Ein beispielorientiertes Einführungsbuch, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [6] J. Dohmann, Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2016.
- [7] M. Blesl und A. Kessler, Energieeffizienz in der Industrie, Springer Vieweg, 2017.
- [8] B. A. Hands, Cryogenic Engineering, London, Orlando: Academic Press, 1986.
- [9] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin und V. Lemort, „Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,“ *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bd. 53, Nr. 6, pp. 2498-2508, 2014.
- [10] P. Grassmann und J. Kopp, „Zur günstigsten Wahl der Temperaturdifferenz und der Wärmeübergangszahl in Wärmeaustauschern,“ *Kältetechnik*, Bd. 10, Nr. 9, pp. 306-309, 1951.
- [11] VDI e.V. (Hrsg.), VDI-Wärmeatlas, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.