

# Akustische und Strukturdynamische Untersuchungen an einer Hochtemperatur-Wärmepumpe

Julia Genßler<sup>1</sup>, Nico Setzepfand<sup>2</sup>, Erik W. Schneehagen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für elektrifizierte Luftfahrtantriebe (DLR), 03046 Cottbus, Deutschland, Email: julia.genssler@dlr.de*

<sup>2</sup> *Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse (DLR), 03046 Cottbus, Deutschland, Email: nico.setzepfand@dlr.de*

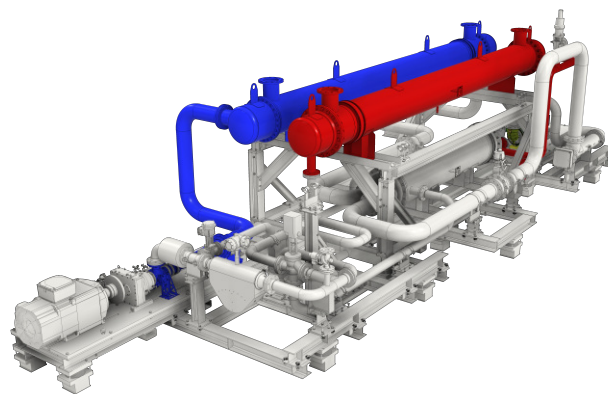
## Einleitung

Die Welt steht mit dem Klimawandel vor einer der größten Herausforderungen der heutigen Zeit. Durch die Verbrennung fossiler Energieträger wird immer weiter CO<sub>2</sub> freigesetzt, was einen negativen Einfluss auf die Erderwärmung hat. Wärmepumpen haben einen höheren Wirkungsgrad als Verbrennungskraftmaschinen und verbrennen keine fossilen Energieträger. Mit Strom aus erneuerbaren Energien können die Wärmepumpen CO<sub>2</sub>-neutral arbeiten. Im Wohnsektor werden Wärmepumpen bereits zunehmend zur Wärmeerzeugung genutzt. Beim DLR in Cottbus wurde eine Pilotanlage einer Hochtemperatur-Wärmepumpe, welche nach dem Brayton-Prinzip arbeitet, geplant und aufgebaut. Die Anlage kann sowohl Wärme als auch Kälte erzeugen. Ziel ist eine Integration in Industrieprozesse, um fossile Energieträger zu ersetzen. Im Rahmen einer sicheren Erstinbetriebsetzung der Hochtemperatur-Wärmepumpe werden experimentelle Modalanalysen im Bereich der Turbomaschinen durchgeführt. Dabei werden Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen messtechnisch ermittelt. Unter Verwendung von Campbell-Diagrammen können anschließend kritische Betriebsdrehzahlen identifiziert werden.

Im vorliegenden Paper werden die Ergebnisse akustischer Messungen im Hüllflächenverfahren nach DIN EN ISO 3746:2011-03 mit den Ergebnissen einer experimentellen Modalanalyse verglichen. Neben den akustischen Messungen werden außerdem die zur Zustandsüberwachung am Generator installierten Beschleunigungssensoren ausgewertet, um einen Rückschluss auf die Schallquellen zu ermöglichen.

## Funktionsweise CoBra

Bei einer Hochtemperatur-Wärmepumpe können, im Fall der CoBra (COttbus, BRAYton-Prozess), Temperaturen von bis zu 300°C auf der Verdichterseite und am Turbinenausstritt eine Temperatur von -30°C erreicht werden, die bei Industrieprozessen, wie beispielsweise in der Lebensmittelindustrie, benötigt werden. Dabei wird trockene Luft als Arbeitsmedium genutzt, um der Anlage einen stabilen Prozess ohne Wasserablagerungen und Kondensation zu ermöglichen. Im elektrisch angetriebenen Verdichter wird das Arbeitsmedium komprimiert und dadurch erwärmt. Anschließend wird ein Großteil der Wärme, unter Verwendung eines Wärmeübertragers, ausgekoppelt und kann im Industrieprozess verwendet werden. In der nachfolgenden Turbine wird das Arbeitsmedium entspannt und weiter abgekühlt wobei je nach Fahrweise der Wärmepumpe unterschiedlich nied-

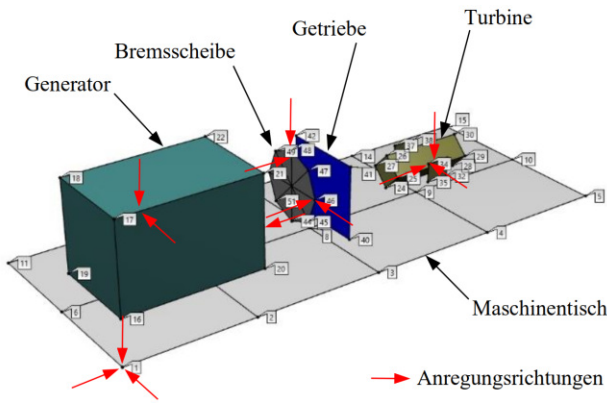


**Abbildung 1:** CAD-Modell der CoBra mit heißem und kaltem Bereich, vorne links befindet sich der akustisch vermessene Generator

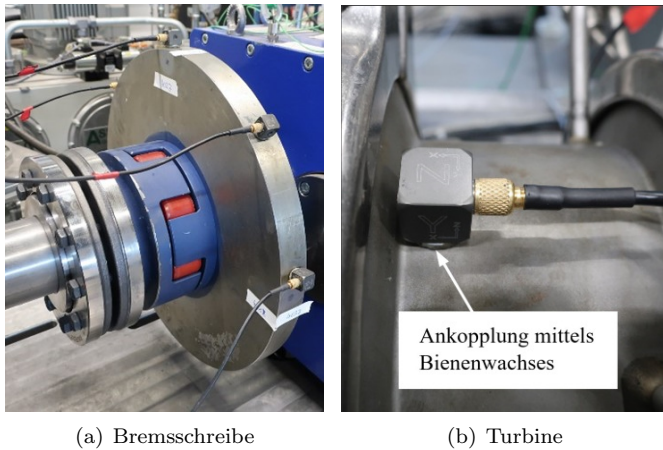
rige Temperaturen erreicht werden können. Die Turbine treibt einen Generator an, der einen Teil der elektrischen Energie für den Antrieb des Verdichters zur Verfügung stellt. Die Anlage verfügt über einen Rekuperator, um u.a. die Möglichkeit zu haben die Verdichtereintrittstemperatur zu steigern. Mit Hilfe eines Erhitzers kann die Temperatur des Arbeitsmediums im entsprechenden Anlagenteil gezielt eingestellt werden. Im stationären Zustand kann dem System Wärme bzw. Kälte entnommen werden. Da die CoBra mit trockener Luft als Arbeitsmedium arbeitet, findet die Wärme- bzw. Kälteabgabe mittels Wärmetauschern statt. In Abbildung 1 ist der heiße und kalte Bereich der Anlage in rot bzw. blau dargestellt. Der in den hier vorgestellten Messungen untersuchte Generator ist vorne links im Bild zu sehen.

## Experimentelle Modalanalyse

Um Eigenschwingungsformen und Eigenfrequenzen zu bestimmen, wird eine experimentelle Modalanalyse im Anlagenbereich der Turbine mit Getriebe und Generator durchgeführt. Während der Erstinbetriebsetzung des Generators kann damit erkannt werden, ob ein erhöhtes Schwingungsniveau auf den Zustand der Resonanz zurückzuführen ist. Bei ungünstiger strukturdynamischer Abstimmung wird anschließend eine Abstimmungsoptimierung durchgeführt. Die Messungen werden mit insgesamt fünf Triaxialbeschleunigungsaufnehmern an wechselnden Messstellen und einem Modalhammer mit integriertem Kraftsensor, welcher zur Anregung der Struktur dient, durchgeführt. Somit werden die Übertragungsfunktionen zwischen den Stellen der Anregungen, also den Referenzen, und insgesamt 153 Be-



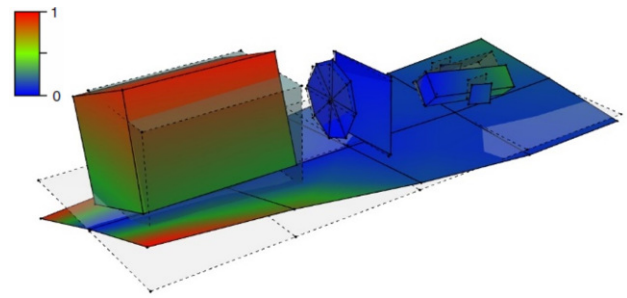
**Abbildung 2:** CAD-Modell zur Darstellung der Eigenschwingungsformen, Kennzeichnung der Referenz-/Anregungsstellen und Nummerierung der Beschleunigungsmessstellen



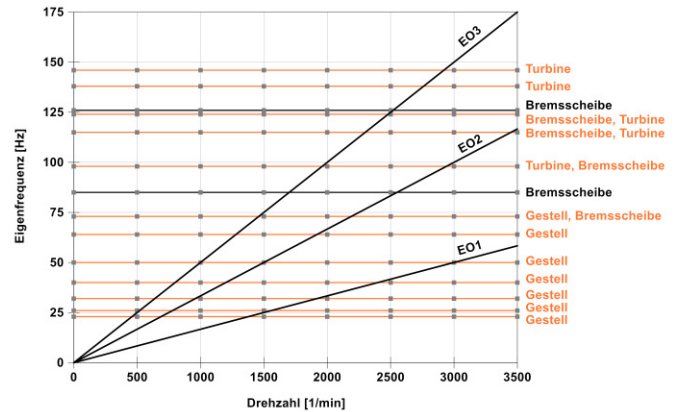
**Abbildung 3:** Ankopplung der Beschleunigungsaufnehmer

schleunigungsmessrichtungen ermittelt. In Abbildung 2 ist ein Computer-Modell gezeigt, welches zur Darstellung der Eigenschwingungsformen verwendet wird. Es ist zu erkennen, dass der Anlagenbereich an 13 Referenzstellen angeregt wird, um möglichst alle für den Betrieb der Anlage entscheidenden Eigenschwingungsformen messtechnisch zu erfassen. Es wird ein Modalhammer mit einer Masse von ca. 450 g verwendet und senkrecht mit der Aluminiumspitze auf das Gehäuse gehauen. Das Material der Hammerspitze hat einen großen Einfluss auf den anregbaren Frequenzbereich. Weiche Materialien betonen eher den tieferen Frequenzbereich im Vergleich zu härteren Materialien. Mit der verwendeten Aluminium-Hammerspitze ist ein Frequenzbereich von 0 bis über 2 kHz anregbar. Dieser Frequenzbereich ist insbesondere vor dem Hintergrund der Erstinbetriebsetzung der Turbine entscheidend, da die Turbine eine maximale Betriebsdrehfrequenz von 1 kHz besitzt.

Wie in der Abbildung 3 zu erkennen ist, werden die Triaxialbeschleunigungsaufnehmer mittels Bienenwachs an die jeweiligen Bauteiloberflächen angekoppelt. Da die Beschleunigungsantwortmessungen in allen drei Raumrichtungen erfolgen sind 3D-Darstellungen der Eigen-



**Abbildung 4:** Eigenschwingungsform der normierten Auslenkung,  $f=50$  Hz, Torsion Maschinentisch/Gestell



**Abbildung 5:** Campbell-Diagramm, Generator als Schwingerreger

schwingungsformen möglich, die eine gute Abschätzung der Anregbarkeit im Betrieb ermöglichen. Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen werden sog. Modal Peaks Functions (kurz MPF) verwendet. Die MPF ergibt sich aus der Aufsummierung aller quadrierten Imaginärteile der Übertragungsfunktionen und betont somit Frequenzanteile, welche sich dominant in vielen Übertragungsfunktionen wiederfinden. In Abbildung 4 ist beispielhaft eine Eigenschwingungsform als Ergebnis der experimentellen Modalanalyse gezeigt. Die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse werden anschließend in Campbell-Diagrammen (vgl. Abbildung 5) dargestellt, um kritische Betriebsdrehzahlen zu identifizieren. Im Campbell-Diagramm in Abbildung 5 sind neben den Eigenfrequenzen der entsprechenden Eigenschwingungsformen, die Erregerordnungen 1 bis 3 des Generators (kurz: EO1 bis EO3) dargestellt.

### Akustische Messungen

Die akustischen Messungen wurden im Rahmen der Inbetriebnahme am Generator durchgeführt.

Es wurden folgende akustische Messungen durchgeführt:

- Messung des Hintergrundgeräusches, mit und ohne eingeschaltete Anlage (Frequenzumrichter, kein Drehen des Motors selbst)
- Messung bei 500, 1000, 1500, 2000, 2500 und 3000 U/min, sowie
- Messung beim Hochlauf und beim Ausschalten.



Abbildung 6: Messaufbau der Mikrofone um den Generator der CoBra

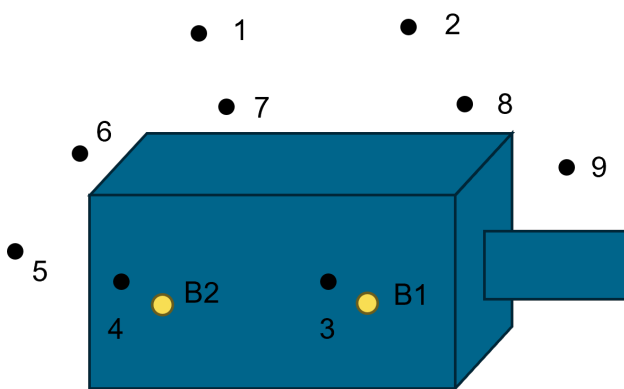


Abbildung 7: schematische Darstellung der Mikrofonanordnung (schwarz) um den Generator (blau) und der Beschleunigungssensoren (gelb) am Generator, die Mikrofone 7 und 8 befinden sich hinter dem Generator

Dabei wurde der Generator (Asynchronmaschine, Käfigläufer) als Motor betrieben und von der Turbine entkoppelt, da bei der Inbetriebnahme erst die einzelnen Systeme getestet werden, bevor die gesamte Anlage getestet wird. Für die akustischen Messungen wurden neun 1/4" Mikrofone (Typ MG M380) auf der quaderförmigen Hüllfläche mit einem Meter Abstand um den Generator der CoBra aufgestellt, wie in Abbildung 6 zu sehen. Dabei sind an allen Seiten und oben je zwei Mikrofone aufgestellt, mit Ausnahme der Seite, auf der die Turbine installiert ist. Dort ist nur ein Mikrofon aufgestellt. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 7 zu sehen. Dabei sind die Mikrofone in schwarz, die Beschleunigungssensoren gelb und der Generator selbst in blau dargestellt. Die Mikrofone wurden mit entsprechenden Haltern an Stativen befestigt, die mittels Gummifüßen mechanisch vom Boden entkoppelt sind. Die Mikrofone an den Seiten wurden auf einer Höhe von 1,35 m über dem Boden Richtung Generator ausgerichtet. Der Generator und die gesamte CoBra sind durch ein federnd gelagertes Gestell ebenfalls mechanisch vom Fußboden weitestgehend entkoppelt, sodass wenig Vibrationen über den Boden übertragen werden. Die Beschleunigungssensoren sind direkt am Generator-

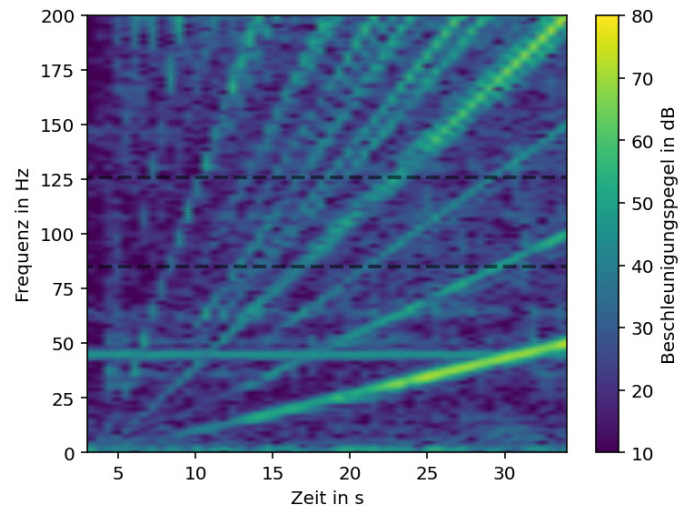


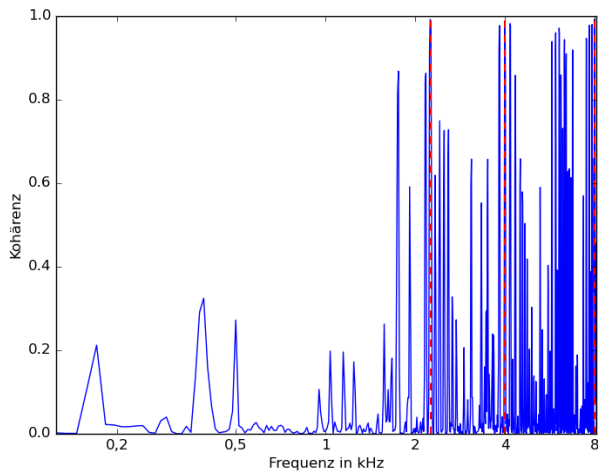
Abbildung 8: Spektrogramm des oberflächennormalen Beschleunigungspegels von Sensor 2 beim Hochlauf, Eigenfrequenzen der Bremsscheibe schwarz gestrichelte Linien

gehäuse befestigt. Zu Beginn der Messungen wurde das Hintergrundgeräusch ohne und mit eingeschalteter Anlage (bei eingeschalteter Anlage läuft insbesondere der Frequenzumrichter) gemessen. Beim Messraum handelt es sich um eine geschlossene Halle mit schallharten Wänden. Der Hochlauf und das Abschalten erfolgen jeweils innerhalb von 34 Sekunden von 0 bis 3000 U/min und umgekehrt. Das Hintergrundgeräusch liegt mit mehr als 3 dB(A) unter dem Mittelwert der Schalldruckpegel des Generators und erfüllt damit das Kriterium für das Fremdgeräusch nach DIN EN ISO 3746:2011-03. An einer der langen Seiten des Generators sind die Beschleunigungssensoren zur Zustandsüberwachung angebracht. Dem Beschleunigungssensor, der weiter weg von der restlichen Anlage installiert ist, steht das Mikrofon 4 gegenüber, welches in diesem Paper zur Betrachtung der Kohärenz zu Beschleunigungssensor 2 herangezogen wird.

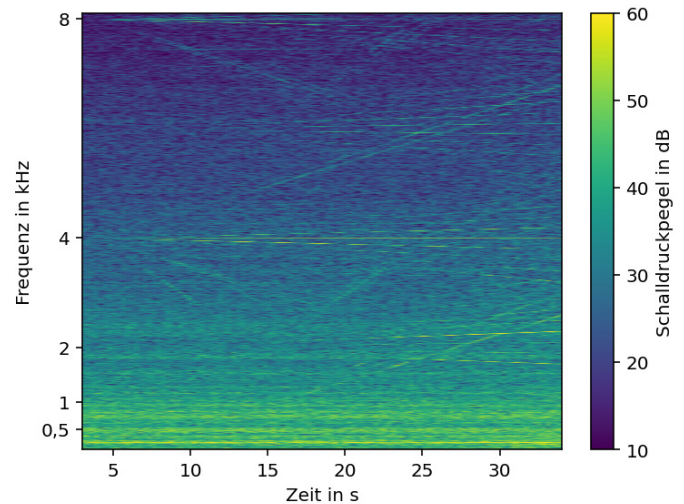
### Messergebnisse

Die in Abbildung 5 dargestellten EO sind auch im Spektrogramm des Beschleunigungssensors in Abbildung 8 deutlich zu erkennen. Dabei ist die EO 1 am deutlichsten zu erkennen, wohingegen die EO 2 und 3 erst oberhalb von 50 Hz deutlich werden. Zu beachten ist in beiden Diagrammen, dass das Campbell-Diagramm bis 3500 U/min geht, das Spektrogramm allerdings nur bis 3000 U/min, die bei Ende des Hochlaufs erreicht wurden. Beim Hochlauf wird bei ca. 29 Sekunden die Drehzahl von 2500 U/min erreicht, bei der die Kohärenz für eine stationäre Messung betrachtet wird. In Abbildung 8 sind dies auch die Schnittstellen zwischen der zweiten EO und der horizontalen Linie bei 85 Hz, respektive der dritten EO und 126 Hz, den beiden dominanten Eigenformen aus der experimentellen Modalanalyse.

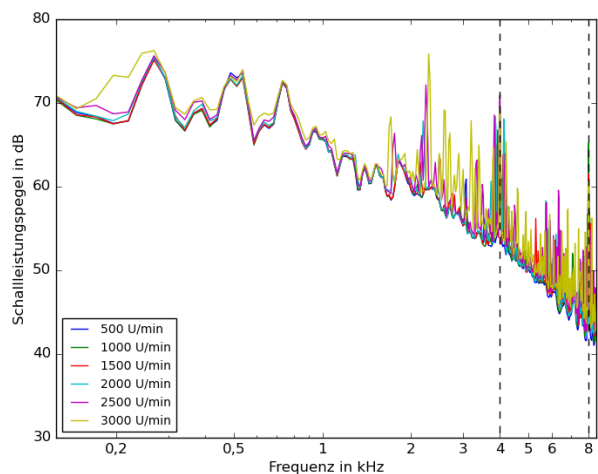
Theoretisch ist die Schallabstrahlung am größten, wenn die Oberfläche am stärksten in ihrer Normalenrichtung



**Abbildung 9:** Kohärenz zwischen Mikrofon 4 und Beschleunigungsaufnehmer 2 bei einer Drehzahl von 2500 U/min. Rot gestrichelte Linien zeigen dominante Frequenzen aus dem Schalleistungsspektrum. (Abb. 10)



**Abbildung 11:** Spektrogramm des Schalldruckpegels von Mikrofon 4 beim Hochlauf



**Abbildung 10:** Schalleistungsspektrum über alle Drehzahlen, 4 kHz und 8 kHz in schwarz dargestellt

schwingt. In diesem Fall sollte die Kohärenz zwischen der Normalenbeschleunigung und des in der Nähe dieser Stelle gemessenen Schalldruckpegels nahe 1 liegen. Abbildung 9 zeigt ebendiese Kohärenz für eine Messung bei 2500 U/min. Bei denen mit gestrichelten Linien gekennzeichneten Frequenzen (2250 Hz und 4 kHz) ist eine hohe Schalleistung im Spektrum in Abbildung 10 vorhanden. Weiterhin ist zu erkennen, dass leicht über- und unterhalb der 4 kHz die Kohärenz sehr hoch ist. Auch diese beiden Peaks finden sich im Schalleistungsverlauf wieder, wenn auch mit etwas geringerer Schalleistung als bei 4 kHz.

Das Spektrogramm des Mikrofons 4 (vgl. Abbildung 11) zeigt den Hochlauf der Anlage. Bei 8 kHz ist eine tonale Komponente erkennbar, die jedoch von der Drehzahl unabhängig ist. Solche tonalen Komponenten sind auch bei 4 kHz zu erkennen. Im Schalleistungspegelspektrum in

Abbildung 10 sind diese tonalen Spitzen ebenfalls zu erkennen. Zur besseren Orientierung wurden vertikale Linien bei diesen Frequenzen eingefügt. Aufgrund der Tatsache, dass diese tonalen Anteile drehzahlunabhängig sind, ist davon auszugehen, dass sie vom Frequenzrichter stammen. Weiterhin ist auffällig, dass die gelbe Kurve in Abbildung 10 insbesondere bei höheren Frequenzen etwas überhalb der Werte der übrigen Frequenzen liegt, was auch dem Ergebnis des Spektrogramms in Abbildung 11 entspricht.

### Fazit

Bei den Messungen wurden keine nennenswerten Auffälligkeiten an der Anlage festgestellt. Die Ergebnisse der akustischen Messungen stimmen sehr gut mit den zuvor experimentell ermittelten Werten überein. Es sind keine zusätzlichen Anpassungsmaßnahmen an der Anlage notwendig.

### Literatur

- [1] DIN EN ISO 3746:2011-03, Akustik – Bestimmung der Schalleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:2010); Deutsche Fassung EN ISO 3746:2010, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- [2] Kabat, N. et al.: Experimental Exergy Analysis of a High-Temperature Brayton Heat Pump. 70th ASME Turbo Expo (2025)