

Innovative Hochtemperaturwärmepumpen: Wärme für die Industrie sowie für Fern- und Nahwärmenetze

Elektrische Wärmepumpen stehen vor allem im Bereich der Gebäudeheizung im Blickfeld der Öffentlichkeit. Inzwischen gibt es jedoch auch zahlreiche Konzepte, diese energieeffiziente und klimaschonende Technik auch für die industrielle Prozesswärmeversorgung sowie bei der Fern- und Nahwärmeversorgung zu nutzen. – Mit dieser Zielsetzung befasste sich am 3. April 2024 beim **Kolloquium der Fakultät Angewandte Wissenschaften, Energie- und Gebäudetechnik (NG)** der Hochschule Esslingen **Steffen Klein**, der Geschäftsführer des Unternehmens Combitherm GmbH. In seinem Vortrag „**Hochtemperaturwärmepumpen**“ verdeutlichte der Vortragende vor mehr als 100 interessierten Zuhörern mit der Sachbezogenheit und Nüchternheit eines Ingenieurs den Stand der technischen Entwicklung auf diesem Gebiet. Das Kolloquium wurde von **GU-Professor Dr.-Ing. Ulrich Eser** geleitet.

Wärmewende braucht Hochtemperaturwärmepumpen

Steffen Klein zeigte zu Beginn seines Vortrags auf, dass die Wärmewende und die dabei angestrebte Defossilisierung Wärmepumpen in den Fokus der industriellen Wärmeerzeugung bringe. Da weit mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs der Industrie für die Bereitstellung von Prozesswärme benötigt werde, eröffne sich für industrielle Großwärmepumpen ein großes Potenzial. Der Vortragende beschrieb den aktuellen Stand und die Herausforderungen dieser Aufgabenstellung aus verschiedenen Blickwinkeln. Mit weiterentwickelten Techniken könne die Umsetzung der strombasierten Wärmeerzeugung beschleunigt und optimiert werden. Der Stand der Technik liege bei Heißwasser-Temperaturen von etwa 100 °C; mögliche Wege zur Dampferzeugung reichten bis zu Temperaturen von rund 160 °C. Ein Schlüssel für höhere Temperaturen seien neuartige Kältemittel und optimierte Komponenten des Kältekreislaufs.

Gemessen an den energiepolitischen Zielen der Bundesregierung bis zum Jahr 2050 erscheine es möglich, etwa 25 % des industriellen Endenergiebedarfs durch Wärmepumpen abzudecken. Dies entspreche für die kommenden knapp 30 Jahre in Deutschland rund 2000 Anlagen pro Jahr je 500 kW Wärmeleistung. Bei 400 €/kW und 200.000 € pro Wärmepumpe ergebe sich das jährliche Marktvolumen für Deutschland zu etwa 400 Mio. €/a. Weltweit werde das Marktpotenzial zu rund 10 Mrd. €/a abgeschätzt. Bei hohen Strompreisen sei mit geringeren Werten zu rechnen.

Thermodynamik als Grundlage der Wärmepumpentechnik

Die Idee der Wärmepumpentechnik reiche zwei Jahrhunderte zurück: Im Jahr 1824 habe Nicolas Sadi Carnot den nach ihm benannten idealen Kreisprozess konzipiert, der dem Kompressionswärmepumpenkreislauf zugrunde liege. 1834 habe Jacob Perkins eine erste Kompressions-Kältemaschine mit geschlossenem Kreislauf vorgestellt. 1852 habe William Thompson (Lord Kelvin) eine „Kältemaschine zum Heizen“ - also eine Wärmepumpe - beschrieben. Auf das Jahr 1876 gehe Carl von Lindes Patent und der Bau einer Ammoniak-Kältemaschine zurück. 1911 habe Willis H. Carrier erstmals einen Turboverdichter für die Kältetechnik eingesetzt. Seit 1929 hätten sich Wärmepumpen zur Gebäudeheizung insbesondere in der Schweiz – etwa im Züricher Rathaus – allmählich durchgesetzt. Und einen Schub brachte 1973 die Erste Ölpreiskrise bei der Einführung von Wärmepumpen im Heizungssektor.

Steffen Klein benannte die gängige Einteilung von Kompressionswärmepumpen wie folgt:

- *Hauswärmepumpen*: Heizleistung 2 bis 50 Kilowatt (kW), hergestellt in Serienfertigung, Auslegung nach Katalogangaben durch den Installateur, Warmwassertemperatur t_0 : 55 °C bis 60 °C bzw. niedriger für Flächenheizkörper
- *Industriewärmepumpen*: Heizleistung 20 bis 2.000 kW, hergestellt in typisierter Fertigung, Auslegung durch Hersteller in Verbindung mit einem Planungsbüro, Warmwassertemperatur t_0 : 65 °C bis 120 °C
- *Großwärmepumpen*: 2.000 bis 50.000 kW, hergestellt in Einzelfertigung, Errichtung unter Mitwirkung von Behörden, Architekt, Ingenieurplanung und Hersteller, Warmwassertemperatur t_0 : 75 °C bis 160 °C

Von Hochtemperatur-Wärmepumpen könne man bei Warmwassertemperaturen ab 80 °C bis hinauf zu wesentlich höheren Temperaturen sprechen.

Im Folgenden ging Steffen Klein auf die Wärmepumpentechnik ein. Eine „Carnotisierung“ – also eine gute Annäherung an den idealen Carnot-Prozess – werde dadurch erreicht, dass der Prozess weitgehend im Nassdampfgebiet von Kältemitteln ablaufe; ausgenommen sei allerdings vor allem die Verdichtung, die im überhitzten Dampfgebiet erfolge. Die vier grundlegenden Prozessschritte seien die Verdichtung, die Verflüssigung, die Expansion und die Verdampfung.

Der Vortragende verwies darauf, dass die *Leistungszahl* einer Wärmepumpe ein Augenblickswert sei und als Verhältnis von Wärmeleistung zu Verdichterleistung definiert sei; zur Ermittlung der *Jahresarbeitszahl* würden alle Zustände über den jährlichen Betrieb hinweg aufsummiert. Der *Carnot-Wirkungsgrad* ergebe sich als Verhältnis aus oberer Kelvin-Temperatur T_0 zur Differenz von oberer Kelvin-Temperatur T_0 und unterer Kelvin-Temperatur T_U : $\eta_{WPC} = T_0 / (T_0 - T_U)$, sei also abhängig vom „Temperaturhub“ ($T_0 - T_U$). Bei Hauswärmepumpen erreiche der *Gütegrad* etwa 50 Prozent des Carnot-Wirkungsgrads.

Vielseitige Anwendungen möglich

Als *Wärmequellen* kämen Fluss- oder Seewasser, das Erdreich, die Umgebungsluft, Solarmodule, Absorber, Kaltwassernetze, industrielle Prozessabwärme oder Abwärme von Blockheizkraftwerken in Betracht. Als *Wärmesenken* seien vor allem Heizungswasser, Raumluft, Brauchwarmwasser, industrielle Prozesswärme sowie Fern- und Nahwärmernetze zu nennen.

Gehe es um Anwendungen für Hochtemperaturwärmepumpen, hätten *Hersteller* insbesondere die Thermodynamik der Kältemittel im Blick: spezifische Heizleistung, kritischer Druck, kritische Temperatur, Energieeffizienz, Materialverträglichkeit sowie die Öl/Kältemittel-Kompatibilität seien zu beachten. Aus Sicht von *Betreibern* stünden Sicherheit, Kältemittel-Brennbarkeit, Anlagenverfügbarkeit, Toxizität, Umweltverträglichkeit sowie Anschaffungs- und Betriebskosten im Vordergrund.

Steffen Klein erläuterte, dass die technischen Entwicklungen sich an vier Temperaturebenen orientierten:

- *Temperatur-Level 0*: t_0 bis etwa 80 °C: Heizwärme und Niedertemperatur-Prozesswärme, Kältemittel R134a, **R513A**, R450A, R1234yf, (NH₃, CO₂, R290)
- *Temperatur-Level 1*: t_0 bis etwa 100 °C: Prozesswärme und Fern- bzw. Nahwärme, Kältemittel **R515B**, **R1234ze(E)**, HCs z.B. R600a, NH₃, CO₂

- *Temperatur-Level 2*: t_0 bis etwa 125 °C: Prozesswärme und Fern- bzw. Nahwärme, Kältemittel **R245fa, R1233zd(E)**, R1224ydZ, R1336mzzE, R1336mzzZ, HCs (z.B. R600a/601a)

- *Temperatur-Level 3*: t_0 bis etwa 160 °C: Prozesswärme und industrielle Dampferzeugung, Kältemittel **R1336mzz(Z)**, R601 (n-Pentan)

Technische Weiterentwicklung entscheidend

An verfügbaren Schraubenverdichtern seien für Komfortanwendungen bei Prozessen t_0 bis 65/70 °C z. B. das Modell Bitzer CSH (Standard) und für Anwendungen mit t_0 von 70 °C bis 93 °C z. B. das Modell Bitzer CSH (erweitert) zu nennen. Nunmehr befinde sich für Anwendungen mit t_0 von 95 bis 125 °C das Modell Bitzer CSH2T in der Feldtestphase. Für Wärmepumpen-Anwendungen bis zu Temperaturen t_0 von 125 °C bis 160 °C sei ein neues Verdichter-Design erforderlich; dies gelte auch für künftige Anwendungen mit t_0 von 160 °C bis 200 °C.

Bei der Verdichtertechnik seien die folgenden Bauteile anzupassen: bei den *elektrischen Teilen* Magnetventile, der Elektromotor, die Stromdurchführung, die interne Verdrahtung, das Motorschutzgerät sowie die Regelung des Ölstands. Bei den *mechanischen Teilen* gehe es um Toleranzen, Lager und Ventile. Weiter sei die Auswahl des Öls bezüglich des eingesetzten Kältemittels wesentlich. Daneben seien höhere Anforderungen an *Dichtungen* zu stellen. Als Daumenregel gelte: Jede Erhöhung der Anwendungstemperatur t_0 um 25 °C verdopple die Komplexität.

Beim Verdichter-Prototyp CSH2T sei inzwischen der folgende Entwicklungsstatus erreicht: Die Verdampfungstemperatur t_U liege bei 50/70°C, die Anwendungstemperatur t_0 (Verflüssigungstemperatur) reiche bis 125°C, die Heizleistung bis 410 kW, der Auslegungsdruck bis 19/28 bar beim Kältemittel R1233zd(E). Für Prozesswärme- und Fernwärmeanwendungen würden Anwendungstemperaturen t_0 von maximal etwa 100 °C bzw. etwa 140 °C erreicht. Steffen Klein machte hierzu auf umfangreiche Prüfstands-Ergebnisse aufmerksam. Ergänzend benannte er als mögliche Anwendungsbereiche von Hochtemperaturwärmepumpen auch eine Abwärmenutzung aus der künftigen Wasserstoffherzeugung über Elektrolyse sowie industrielle Trocknungsprozesse.

Wasser als Kältemittel

Als weiteres technisches Feld erläuterte Steffen Klein Konzepte mit dem Kältemittel Wasser (H₂O). Seine Eigenschaften machten Wasser als Kältemittel durchaus interessant: Es sei ein Sicherheitskältemittel, ungiftig, nicht brennbar, umweltverträglich, F-Gase-frei, ölfrei, gut verfügbar und kostengünstig, habe eine hohe kritische Temperatur und sei damit einsetzbar bis hinauf zu etwa $t_0 = 370$ °C, besitze im unteren Temperaturbereich ein geringes Druckniveau, verfüge über eine große spezifische Verdampfungsenthalpie, eine hohe spezifische Wärmekapazität, eine hohe Wärmeleitfähigkeit und verspreche in technischen Anwendungen gute Leistungszahlen. Nachteilig sei allerdings, dass Wasser unterhalb von etwa 100 °C im Unterdruck gegenüber dem Luftdruck betrieben werden müsse und nur hinab bis zu $t_U = 5$ °C reiche.

Der Vortragende machte hierzu auf drei Forschungsprojekte aufmerksam:

- *EffiKomp*: Wärmepumpen-Temperaturhub von $t_U = 5$ °C bis $t_0 = 100$ °C; Entwicklung eines mehrstufigen Schraubenspindel-Verdichters

- *H3-Pump*: Wärmepumpen-Temperaturhub von $t_U = 75$ °C bis $t_0 = 130$ °C; Zweistufige Verdichtung: erste Stufe mit Roots-Gebläse, zweite Stufe mit Turbo-Kompressor

- *GreenSteam*: Wärmepumpen-Temperaturhub von $t_U = 120\text{ °C}$ bis $t_O = 190\text{ °C}$; Kaskadierung: erste Stufe mit Hochtemperatur-Wärmepumpe, zweite Stufe mit MVR-Dampfprozess

Am Schluss seines Vortrags zog Steffen Klein das folgende Fazit:

- Es gebe keine für alles passende Standard-Wärmepumpenlösung bei industriellen Anwendungen sowie bei Fernwärme- bzw. Nahwärmanwendungen.
- Zu einer Hochleistungs-Industriewärmepumpe gehöre mehr als nur der Verdichter.
- Natürliche und synthetische Kältemittel seien nach wie vor im Wettbewerb miteinander.
- Beim energieeffizientesten Anwendungsfall von Hochtemperaturwärmepumpen würden Wärme- und Kälteanwendungen miteinander kombiniert.
- Industriefirmen, Endverbraucher, ingenieurtechnische Planungsunternehmen und herstellende Unternehmen müssten intensiv zusammenarbeiten, um gemeinsam die besten Lösungen zu erarbeiten.

Text: Prof. Dr.-Ing. Martin Dehli

Verantwortlich: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Eser

Bilder:



Bild 1: Industriewärmepumpe (Bildquelle: Combitherm GmbH)

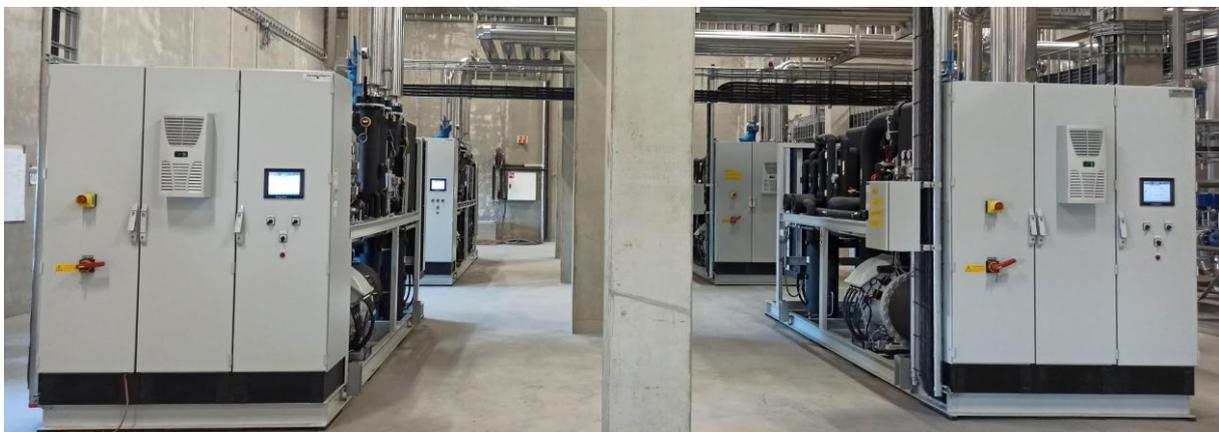


Bild 2: Hochtemperaturwärmepumpen für industrielle Anwendungen (Bildquelle: Combitherm GmbH)