

Forschungsprojekt

Wärmepumpen machen Dampf

In Industriebetrieben fällt oft Abwärme an. Gleichzeitig wird Prozessdampf benötigt. Daher bestehen günstige Bedingungen für den Einsatz von dampferzeugenden Wärmepumpen. Ein Forscherteam der Ostschweizer Fachhochschule hat die Erfolgsbedingungen für diese energieeffiziente und klimafreundliche Form der Wärmebereitstellung untersucht.

Von Benedikt Vogel*

Bild: Aneo Industry



Seit 2024 ist in Trondheim (Norwegen) eine Ammoniak-Wärmepumpe in Betrieb, die in einem Werk für Tierfutter 120-gradigen Dampf mit einer Leistung von 1,6MW bereitstellt.

Die wachsende Verbreitung der Wärmepumpen in den letzten zwei Jahrzehnten liegt auch darin begründet, dass moderne Neubauten Heiztemperaturen von lediglich 25 bis 35 Grad Celsius benötigen. Wärmepumpen stellen solche Heizwärme mit hoher Effizienz – also geringem Strombedarf – bereit. In den letzten Jahren haben die Wärmepumpen-Hersteller indes auch Lösungen auf den Markt gebracht, die weit höhere Temperaturen meistern. Eine Reihe von Geräten stellt Dampf im Bereich von

100 bis 165 Grad Celsius bereit, wie er in Industriebetrieben gebraucht wird. Unter Beizug eines Dampfkompessors kann man diese Temperaturen sogar noch überbieten, muss dafür aber zusätzliche Energie aufwenden, was die Effizienz des Gesamtprozesses mindert. Dampferzeugende Wärmepumpen arbeiten insbesondere dann effizient, wenn sie kontinuierlich eine vergleichsweise warme Wärmequelle von 50 und mehr Grad nutzen können.

Das ist in vielen Industriebetrieben möglich, wo Abwärme beispielsweise bei

der Kühlung entsteht und bislang ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird. Ein typisches Beispiel sind Destillationsprozesse etwa in Nahrungsmittel- oder Pharmaunternehmen. Hier braucht man Wärme zum Destillieren und Kälte zum Kondensieren. Die Abwärme aus der Kühlung kann von einer Wärmepumpe zur Dampfproduktion genutzt werden. Auf dem Weg lassen sich fossile Energieträger wie Öl und Erdgas klimafreundlich substituieren. Wärmepumpen werden in der Schweiz bisher nicht zur Bereitstellung

Kältemittel	kritischer Druck [bar]	kritische Temperatur [°C]	Druckverhältnis für 70°C/120°C	Gasdichte @ 70°C	brennbar	giftig	GWP	ODP
R717 (Ammoniak)	83.2	132.3	2.8	26.4	(leicht)	ja	0	0
R600a (Iso-Butane)	36.4	134.7	2.6	28.4	ja	nein	<5	0
R600 (N-Butane)	38.0	152.0	2.7	20	ja	ja	<5	0
R718 (Wasser)	220.6	373.9	6.4	0.2	nein	nein	0	0
R1336mzz(Z)	29.0	171.3	3.4	21	nein	nein	2	0
R1233zd(E)	35.7	165.6	3.1	27	nein	nein	1	~0.00034

Zur Dampferzeugung muss die Temperatur des Kältemittels mindestens 5 Grad höher liegen als jene des Prozessmediums. Auch sind sie potenziell brennbar, giftig, klimaschädlich oder Ozon emittierend.

von industriellem Prozessdampf genutzt. Im Ausland gibt es bereits gute Beispiele für diese energieeffiziente Wärmeproduktion. So nutzt im norwegischen Trondheim die Tierfutter-Firma Felleskjøpet Agri seit 2024 ein zweistufiges Wärmepumpen-System mit kombiniertem Kreislauf (siehe Kasten zu den Verfahren), um 120-gradigen Dampf bereitzustellen.

Dampf aus lauwarmem Wasser

In der ersten Stufe produziert eine Wärmepumpe unter Einsatz des natürlichen Kältemittels Ammoniak 85-gradigen Wasserdampf, wobei der Prozess mit Unterdruck erfolgt. Dabei liegt die Verdampfungstemperatur von Wasser tiefer als 100 Grad. Der Wasserdampf wird anschliessend durch Dampfkompensation (1,5 bar) auf 120 Grad gebracht. Als Wärmequelle dient feuchte, 30- bis 40-gradige Luft, die bei der Tierfutter-Herstellung als Abwärme anfällt. Das System aus Wärmepumpe (Aneo Industry) und Dampfkompressoren (Piller) arbeitet mit einer Effizienz, wie man sie von Wohnbauten kennt. Mit dem eingesetzten Strom wird das Dreifache an Wärme erzeugt (COP 3). Die Anlage hat eine Leistung von 1,6 MW und produziert 2 Tonnen Dampf pro Stunde.

«Technisch ausgereift»

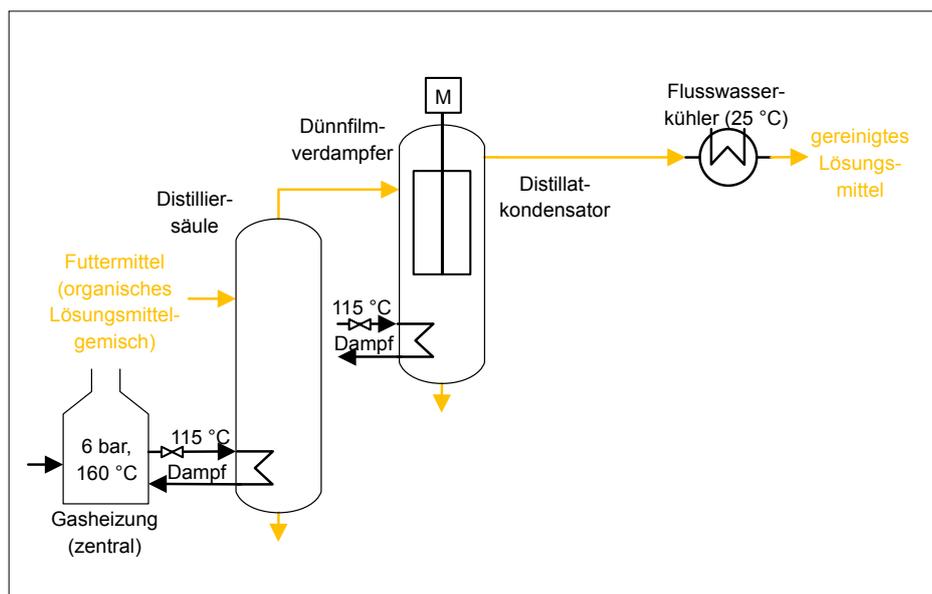
Dieses Beispiel könnte in der Schweiz Schule machen. Ein Team aus Wissenschaftlern der Ostschweizer Fachhochschule (OST) hat in einem dreijährigen Projekt das Potenzial dampferzeugender Wärmepumpen für die Schweiz untersucht. «Unsere Studie belegt, dass derartige Wärmepumpen heute technisch ausgereift und für den kommerziellen Einsatz verfügbar sind», sagt OST-Projektleiter Frédéric Bless. Das vom Bundesamt für

Energie (BfE) finanziell unterstützte Projekt wurde vor kurzem mit dem Schlussbericht beendet. Zu den Ergebnissen gehören zwei Fallstudien, mit denen der Einsatz dampferzeugender Wärmepumpen in bestehenden Industriebetrieben beispielhaft untersucht wurde. Die erste Untersuchung betrifft eine 2014 erbaute Produktionsstätte von UCB Farchim in Bulle FR. Das Biotech-Unternehmen benötigt für einen Destillationsprozess Dampf (110 Grad; 1,5 bar), der bis anhin mit einem Gaskessel erzeugt wird. Der mit Wärmepumpen erzeugte Dampf lässt sich energieeffizient und umweltfreundlich bereitstellen, wie das OST-Forscherteam anhand von Simulationen und einer Pinch-Analyse zeigen konnte. Dabei handelt es sich um ein systematisches Verfahren mit

dem Ziel, den Energiebedarf der Kälte- und Wärmeproduktion für industrielle Prozesse zu minimieren. Dies wird primär erreicht, indem vorhandene Kälte- und Wärmeströme ideal miteinander kombiniert werden.

Dampf für Destillationsprozess

Die Forscher schlugen dafür eine Wärmepumpe mit kombiniertem Kreislauf vor, bestehend aus einer Ammoniak-Wärmepumpe (500kW; 0,8 Tonnen Dampf pro Stunde) und zwei Dampfkompressoren. Als Wärmequelle würde in Bulle 25-gradige Abwärme genutzt. Es ist das gleiche Anlagenkonzept, das in der oben erwähnten Tierfutter-Fabrik in Trondheim realisiert wurde. Für die Effizienz des Systems berechneten die OST-Forscher einen COP



Vereinfachte Darstellung des Destillationsprozesses bei «DSM Nutritional Products»: Der Prozessdampf wird bis anhin von einem zentralen Gaskessel bezogen, der Dampf bei 160 Grad und 6 bar erzeugt.

Lieferant	Kompressortyp	Arbeitsfluid (Kältemittel)	Max. Wärmekapazität [MW]	Max. Nutzt-temp [°C]	TRL
Spilling (DE)	Kolben	R718	15	280	9
Enerin (NO)	Kolben	R704	10	250	6
Piller (DE)	Turbo	R718	70	212	8-9
Olvondo (NO)	Kolben (doppelt wirkend)	R704	5	200	9
Turboden (IT)	Turbo	anwendungsspezifisch	30	200	7-9
ToCircle (NO)	Drehschieber	R717+R718	5	188	6-7
Kobelco (JP)	Doppelschraube	R245fa/R134a + R718	0.4	175	9
SRM (SE)	Schrauben	R718	3	165	5
SPH (DE)	Kolben	HFOs	5	165	7-8
Heaten (NO)	Hubkolben	HFOs	6	165	7-9
Weel & Sandvig (DK)	Turbo	R718	5	160	4-9
Siemens Energy (DE)	Turbo	R1233zd(E)/R1234ze(E)	70	160	9
ECOP (AT)	Rotationswärmepumpe	ecop fluid 1	0.7	150	6-7
Rank (ES)	Schrauben	R245fa, R1336mzz(Z), R1233zd(E)	2	150	7
Epcon (NO)	Radiallüfter, Gebläse	R718	30	150	9
MAN Energy Solutions (CH)	Turbo mit Expander	R744	50	150	7-8
Mitsubishi Heavy Industries (JP)	Zweistufig zentrifugal	R134a	0.6	130	9
Fuji Electric (JP)	Hubkolben	R245fa	0.03	120	9
Emerson (US)	Scroll	R245fa, R410a, R718	0.03	120	6
Mayekawa (JP)	Hubkolben	R744	0.1	120	8-9
Fenagy (DK)	Hubkolben	R744	1.8	120	5-6
Johnson Controls (DK)	Hubkolben	R717+R600 (cascade)	5	120	7-8

Liste der Hersteller von Wärmepumpen, die Dampf bei 120 und mehr Grad bereitstellen.

von 2,9. UCB Farchim zögerte seinerzeit bei der Anschaffung der Wärmepumpe, weil die Technologie noch nicht erprobt war, insbesondere nicht das kontrollierte Zusammenspiel von Wärmepumpe und Dampfkompresseur. Als Alternative schlugen die OST-Forschenden eine Lösung vor, bei der zwei Wärmepumpen eines Schweizer Herstellers mit geschlossenem Kreislauf in Kaskade geschaltet werden, wobei die erste als Kältemittel Ammoniak nutzt, die zweite Butan. Diese Lösung ist etwas weniger effizient als der ursprüngliche Vorschlag und setzt das brennbare Butan ein, was besondere Brandschutzmassnahmen erforderlich macht. Aber die Anlage stammt von einem einzigen Hersteller und ist damit sozusagen wie «aus einem Guss». Beide Varianten liegen UCB Farchim nun zum Entscheid vor.

Direkt von 45 auf 115 Grad

Die zweite Fallstudie rechnete das OST-Team für DSM Nutritional Products durch. Die Firma stellt in Sisseln Lebensmittelchemikalien her. Dafür nutzt sie ebenfalls einen Destillationsprozess, der 115-gradigen Dampf benötigt und der bislang mit einem Holzheizkessel produziert wird. Da in diesem Werk Abwärme bei 45 Grad zur Verfügung steht, empfahlen die OST-Forscherinnen aufgrund ihrer Berechnungen eine Wärmepumpe mit offenem Kreislauf. Das heisst, das 45-gradige Wasser wird bei Unterdruck verdampft und dann durch acht Dampfkompressoren schrittweise auf 115 Grad gebracht. Für die Effizienz des Verfahrens wurde ein COP von 3,3 berechnet. Nach Auskunft der OST-Forschenden ist die Lösung technisch um-

setzbar mit geschätzten 730 000 Euro Investitionskosten, aber sie ist teurer als eine Lösung mit Holz (370 000 EUR) oder Biogas (550 000 EUR). Den Investitionen stehen tiefere Betriebskosten der Wärmepumpen-Lösung gegenüber. Zudem kann das Unternehmen hier noch anderweitig profitieren: Es kann nachhaltig und kosteneffizient mit Abwärme Dampf erzeugen. Denn bislang wird die Abwärme in den Rhein abgeführt. Die Nutzung des Rheins für Kühlzwecke ist mit Blick auf die Fischbestände allerdings umstritten. Demnach dürfen Firmen den Fluss in den Sommermonaten zeitweise jeweils nicht zur Kühlung nutzen, um die Fische nicht zu gefährden. Wird die Abwärme in den Betrieben selber genutzt, tritt dieses Problem nicht mehr auf.

Auskünfte, Schlussbericht, Fachbeiträge

Der englischsprachige **Schlussbericht** zum BFE-Forschungsprojekt 'IntSGHP – Integration of steam-generating heat pumps in industrial sites (retrofit)' ist abrufbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=49319>

Auskünfte erteilen Elena-Lavinia Niederhäuser (elena-lavinia.niederhaeuser@bfe.admin.ch), Leiterin des BFE-Pro-

gramms Industrielle Prozesse, und Stephan Renz (info@renzconsulting.ch), externer Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte.

Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Industrielle Prozesse finden Sie unter: www.bfe.admin.ch/ec-prozesse.

Pinch-Analyse

Dabei handelt es sich um ein systematisches Verfahren mit dem Ziel, den Energiebedarf für die Kälte- und Wärmebereitstellung in industriellen Prozessen zu minimieren. Dies wird primär erreicht, indem vorhandene Kälte- und Wärmeströme ideal miteinander kombiniert werden.

Unter: www.pinch.ch

Trend zu natürlichen Kältemitteln

Die Autoren stellen mit ihrer Studie auch vertiefende Informationen zu dampferzeugenden Wärmepumpen bereit. So listen sie auf, welche Wärmepumpen zur Dampferzeugung heute auf dem Markt angeboten werden, und sie geben eine Übersicht über die eingesetzten Kältemittel. Dazu hält der Projekt-Schlussbericht fest: «Es existiert kein perfektes Kältemittel für dampferzeugende Wärmepumpen. Die wichtigsten zukunftssicheren Optionen sind die natürlichen Kältemittel R600 (n-Butan), R600a (Iso-Butan), R717 (Ammoniak) und R718 (Wasser) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFO): HCFO-R1233zd, HFO-

R13336mzz(Z). All diese Kältemittel haben kein (oder nur ein geringes) Ozonabbau Potenzial und ein niedriges Treibhauspotenzial, darüber hinaus hat jedes seine Vor- und Nachteile» (siehe Tabelle über die Kältemittel).

Trotz Hürden glaubt OST-Projektleiter Frédéric Bless an den künftigen Einsatz von Wärmepumpen im industriellen Umfeld: «Dampferzeugende Wärmepumpen sind heute noch teurer als fossile Systeme zur Dampferzeugung, aber sie bieten Industriebetrieben einen Hebel für eine klimafreundliche Produktion», sagt der Wissenschaftler. Die grösste Hürde, welche Unternehmen bis anhin vom Einsatz die-

ser wirkungsvollen Dekarbonisierungstechnologie abhält, sieht Bless jedoch bei fehlenden Beispielen, die den verlässlichen Langzeitbetrieb dieser Form der Wärmeerzeugung demonstrieren: «Wir brauchen in der Schweiz Demonstrationsanlagen mit einem mehrjährigen Monitoring, das die Verlässlichkeit dieser Anlagen unter Beweis stellt. Auf diese Weise erhalten Unternehmen, die heute mit der Umstellung noch zögern, einen Nachweis, dass die Technologie funktions- und betriebstüchtig ist, der für den internen Entscheidungsprozess massgeblich sein kann.» ■

* Den Beitrag hat Benedikt Vogel im Auftrag des Bundesamts für Energie verfasst.

Drei Verfahren für die Produktion von Prozessdampf

Zur Produktion von Prozessdampf nutzt die Industrie heute in der Regel die Energieträger Öl oder Gas. Mit Wärmepumpen lässt sich Dampf unter Verwendung von erneuerbarem Strom fossilfrei herstellen. Drei Konstruktionstypen stehen zur Verfügung.

Wärmepumpe mit geschlossenem Kreislauf

Das ist die Funktionsweise der meisten Wärmepumpen, die heute auf dem Markt sind. Sie nutzen ein Kältemittel (vgl. Abb. 01, rote Linien), das in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Das Kältemittel ist so gewählt, dass es verdampft, wenn es die Wärme der Wärmequelle aufnimmt, etwa von industrieller Abwärme. Der Dampf wird mit einem elektrisch angetriebenen Kompressor verdichtet und damit auf eine höhere Temperatur gebracht. Diese hohe Temperatur wird in einem Wärmetauscher zur Erzeugung von Dampf genutzt. Dabei kondensiert das Kältemittel und strömt an den Ausgangspunkt zurück.

Vor-/Nachteile: Diese Technologie ist aus der Heizwärmeerzeugung gut erprobt.

Allerdings gibt es nur eine begrenzte Zahl von Kältemitteln, deren kritische Temperatur (Verdampfungstemperatur) für die Dampferzeugung hoch genug ist, also mindestens die benötigten 105 Grad aufweist.

Wärmepumpe mit offenem Kreislauf

Hier wird kein extra Kältemittel verdampft und komprimiert, sondern das geschieht direkt mit Wasser (vgl. blaue Linien in Abb. 01, Mitte). Damit Wasser die Wärme der Wärmequelle durch Verdampfen aufnehmen kann, braucht es eine Umgebung mit Unterdruck. Anschliessend hebt ein Kompressor die Temperatur des Wasserdampfs an. Ein Dampfkompresseur schafft eine Temperaturerhöhung um 10 bis 20 Grad. Um beispielsweise von 45°C auf 115°C zu kommen, müssen ca. sechs Dampfkompressoren hintereinandergeschaltet werden. Hat der Dampf schliesslich die gewünschte Temperatur, kann er direkt als Prozessdampf eingesetzt werden.

Vor-/Nachteile: Als Kältemittel wird hier Wasser verwendet, das ungiftig und

nicht brennbar ist. Weil Wasser als Kältemittel dient, kann ein Wärmetauscher eingespart werden, was die Systemeffizienz erhöht. Da für den Temperaturhub mehrere Kompressoren benötigt werden, ist das System teuer und wartungsintensiv und hat ein erhöhtes Ausfallrisiko. Liegt die Quelltemperatur unter 70 Grad, arbeitet eine Wärmepumpe mit offenem Kreislauf ineffizient.

Wärmepumpe mit kombiniertem Kreislauf

Sie bewältigt den gewünschten Temperaturhub von Quell- zu Nutzttemperatur in zwei Schritten: Den ersten übernimmt eine Wärmepumpe mit geschlossenem Kreislauf, den zweiten eine Wärmepumpe mit offenem Kreislauf.

Vor-/Nachteile: Diese Lösung ist geeignet für einen grossen Temperatur-Hub, sie ist aber auch besonders komplex, weil sie zwei technische Systeme (klassische Wärmepumpe, Dampfkompressoren) kombiniert. Nötig ist eine Steuerung von Wärmepumpe und Dampfkompressoren, die Schwingungen im System vermeidet. Bisher gibt es erst wenig Erfahrungen. (BV)

