

Effizienzsteigerung bei Gaswärmepumpen

Valentin Schwamberger und Ferdinand P. Schmidt

Im Gebäudesektor besteht bei Aufrechterhaltung des gewohnten Nutzungskomforts ein großes Potenzial zur Reduktion von Energieverbrauch, Betriebskosten und CO₂-Ausstoß der Heizungsanlagen. Eine verbesserte Wärmedämmung, aber auch der Einsatz effizienterer Heizsysteme wie Wärmepumpen sind hier wesentliche Maßnahmen. Elektrische Wärmepumpen haben jedoch den Nachteil, dass die elektrischen Netze zu Spitzenlastzeiten im Winter zusätzlich belastet werden. Thermisch angetriebene Wärmepumpen sind daher eine interessante Alternative.

Frühmorgens können elektrische Wärmepumpen nur teilweise mit regenerativ erzeugtem Strom betrieben werden, da dessen Verfügbarkeit zu dieser Tageszeit limitiert ist. Zukünftig erhöht eine solche Verschiebung von Stromerzeugung und -nutzung den Bedarf an elektrischen Energiespeichern. Schließlich geht die Jahresarbeitszahl elektrischer Wärmepumpen bei höheren Heizungsvorlauftemperaturen und Umweltwärmequellen niedrigerer Temperatur, wie sie in Bestandsgebäuden häufig anzutreffen sind, deutlich zurück.

Thermisch angetriebene Wärmepumpen benötigen aufgrund nur weniger bewegter Bauteile kaum Strom und sind leise, können in Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme integriert werden und haben einen geringeren Umweltwärmebedarf (je nach Effizienz um ca. ein bis zwei Drittel reduziert). Bei Extrembedingungen ist auch konventioneller Heizbetrieb möglich, da ohnehin ein Brenner benötigt wird. Nachteile thermisch angetriebener gegenüber elektrischer Wärmepum-

pen sind der niedrigere Entwicklungsstand, eine geringere Marktverfügbarkeit sowie höhere Investitionskosten.

Damit rentieren sich diese Systeme tendenziell für Gebäude, die nicht nur – wie Neubauten oder Passivhäuser – einen sehr geringen Heizbedarf haben. Zieht man jedoch in Betracht, dass nach aktuellen Prognosen noch im Jahr 2050 ca. 80 % der Gebäude vor dem Jahr 2005 errichtet wurden, so ist ein großer Bedarf an Heizungsanlagen für modernisierte Bestandsgebäude erkennbar. Heute sind erste entsprechende Systeme der großen Hersteller auf dem Markt. In Bezug auf ihre energetische Effizienz gibt es noch zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten.

Arbeitsweise

Bei einer Adsorptionswärmepumpe wird statt eines elektrischen ein „thermischer“ Kompressor (Adsorber) zur Überwindung der Druckdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator eingesetzt. Wie in einer

elektrischen Wärmepumpe verdampft das Arbeitsfluid im Verdampfer, nimmt dabei Umweltwärme auf und strömt durch ein Ventil zum Adsorber. Unter Wärmeabgabe lagert es sich an ein mikroporöses Material, das Adsorbens, an (Adsorption, exotherm). Zur Kühlung wird der Adsorber von einem Wärmeträgerfluid durchströmt. Ist das Adsorbens gesättigt, schließt das Ventil zum Verdampfer. Nun wird der Adsorber über das Wärmeträgerfluid geheizt, und das Ventil zum Kondensator öffnet sich. Das Arbeitsfluid wird desorbiert (endotherm) und strömt in den Kondensator. Dort kondensiert es. Die abgegebene Wärme q_{kond} stellt zusammen mit der Abwärme q_{ab} aus der Adsorptionsphase die Heizwärme q_{nutz} dar. Danach folgt wieder die Adsorptionsphase. Die Betriebsweise ist also instationär.

Zwischen den (spezifischen) differentiellen Wärmemengen $\partial q_{\text{ads}}/\partial T$ und $\partial q_{\text{des}}/\partial T$, die vom Wärmeträger während der Adsorptionsphase ab- bzw. in der Desorptionsphase zugeführt werden, besteht eine signifikante Überlappung (Abb. 1, violett). Dies zeigt das Potenzial einer internen Wärmerückgewinnung für Systeme mit einer Antriebstemperatur bis ca. 200 °C. Bei den heute auf dem Markt befindlichen Wärmepumpen mit Wasser als Wärmeträgerfluid ist das Potenzial geringer, da sie nur mit Antriebstemperaturen bis ca. 110 °C arbeiten. Bei höheren Temperaturen wird aufgrund seines geringeren Dampfdrucks Thermoöl eingesetzt. Dabei müssen jedoch strengere Sicherheitsanforderungen (Leckage) berücksichtigt werden, was die Kosten erhöht. Andererseits können die Betriebskosten entsprechender Systeme durch ihre deutlich höhere Effizienz wesentlich reduziert werden.

Die Wärmerückgewinnung hat direkte Auswirkungen auf die Effizienz, d. h. auf den Coefficient of Performance: $COP = q_{\text{nutz}}/q_{\text{antrieb}}$.

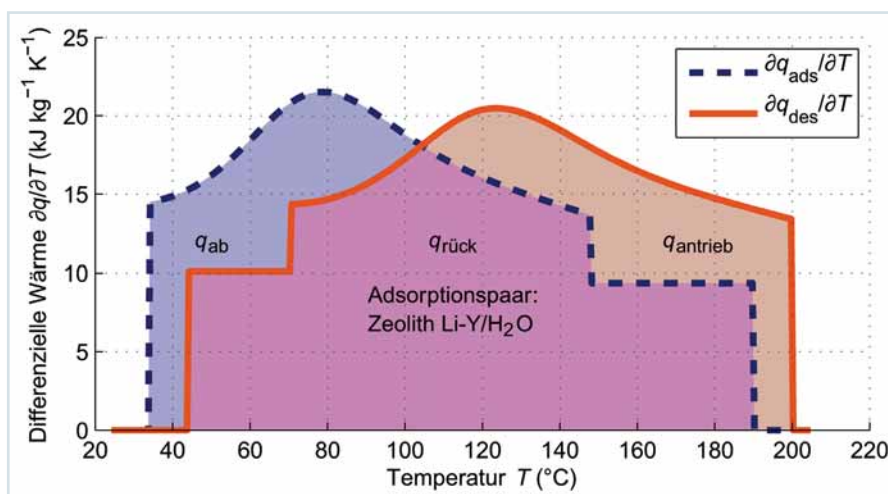


Abb. 1 Wärmerückgewinnung mit idealem Speicher, aber mit Verlusten aufgrund treibender Temperaturdifferenzen zwischen Wärmeträgerfluid und Adsorber ($\Delta T = 5 \text{ K}$, $COP \approx 2,2$). Die Einfärbungen stellen die Antriebswärme q_{antrieb} (beige, Brenner bei 200 °C), die abzuführende Wärme q_{ab} (hellblau, bei 34 °C) und die rückgewinnbare Wärme $q_{\text{rück}}$ (violett) dar. Die Umweltwärme q_{umwelt} wird bei 8 °C bereitgestellt

Kann ein großer Anteil der Adsorptionswärme während der Desorptionsphase zur Regenerierung des Adsorbers eingesetzt werden (die violette Fläche in Abb. 1 stellt das Optimum dar), so sinkt die zuzuführende Wärme q_{antrieb} und der COP steigt. Entsprechend erhöhen bzw. erniedrigen sich die entropischen Mitteltemperaturen der Wärmez- bzw. -abfuhr (Carnotisierung). Herkömmliche einstufige Systeme nutzen dieses Potenzial nur zu kleinen Anteilen aus, was entsprechend niedrige COP zur Folge hat.

Bisherige Konzepte zur Wärmerückgewinnung konnten sich nicht auf dem Markt durchsetzen, da sich ihre technische Umsetzung als schwierig herausstellte. Meist sind mehrere Adsorber und eine aufwändige Hydraulik erforderlich. Im Folgenden wird ein neuartiges Zyklensystem vorgestellt, mit dem große Anteile der Adsorptionswärme zurückgewonnen werden können. Dennoch genügt für eine Heizleistung von 10 bis 20 kW ein relativ einfacher Systemaufbau mit nur einem Adsorber.

Der Stratisorp-Zyklus

Der Stratisorp-Zyklus basiert auf der Integration eines thermischen Schichtspeichers in den Adsorptionszyklus [1]. Das Wärmeträgerfluid, das den Adsorber durchströmt, wird gleichzeitig auch als Speichermedium eingesetzt. Damit entfällt ein Wärmeübertragungsvorgang. Die thermische Schichtung besteht darin, dass die Fluidtemperatur mit der Höhe des Speichers ansteigt. Die Temperaturabhängigkeit der Fluidichte wirkt Mischungsvorgängen entgegen (Auftrieb).

Über eine konzentrische Ladelanze (Abb. 2, [2]) kann Fluid in den zylindrischen Speicher eingeschichtet werden, d. h. das einströmende Fluid verlässt die Lanze aufgrund von Dichteunterschieden in dem Höhenbereich, in dem es dieselbe Temperatur hat wie das schon in der entsprechenden Speicherschicht vorhandene. Zur Extraktion von Fluid einer bestimmten Temperatur dient eine feste Anzahl von über die Höhe verteilten Entnahmeringen, die über ein Mehrwegeventil selektiert werden können.

Befindet sich das Stratisorp-System in der Adsorptionsphase (Abb. 2), so wird Fluid mit einer gegenüber dem Adsorber geringeren

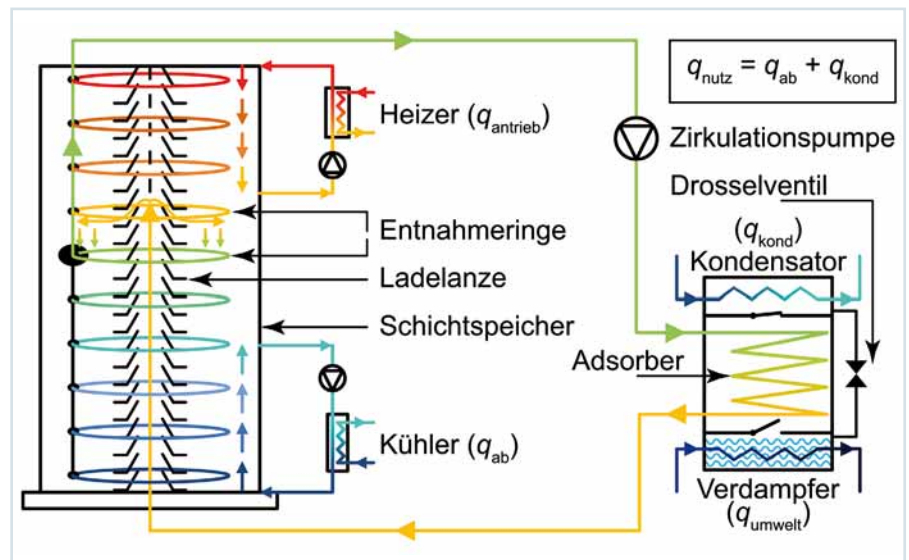


Abb. 2 Systemschema des Stratisorp-Systems. Die Farben zeigen die Fluidtemperaturen für einen Zeitpunkt in der Adsorptionsphase, die schwarz gefüllte Ellipse den selektierten Entnahmering

Temperatur mittels eines Entnahmerings aus dem Speicher gepumpt. Damit wird der Adsorber gekühlt, und das Fluid erwärmt sich entsprechend. Das in den Speicher zurückströmende Fluid verlässt nun die Ladelanze oberhalb des selektierten Entnahmerings. Umgekehrt wird das Fluid in der Desorptionsphase mittels Entnahmeringen extrahiert, die oberhalb der sich jeweils ergebenden Einschichtungsgebiete liegen.

Auf diese Weise kann das System mit einer kleinen treibenden Temperaturdifferenz

zwischen Fluid und Adsorber betrieben werden. Die Verluste bei der Wärmerückgewinnung bleiben damit relativ klein, und die Effizienz des Zyklus erhöht sich. Daneben sind freilich die Speicherverluste zu berücksichtigen: Dazu gehören Vermischungseffekte innerhalb des Fluids (Konvektion, Konduktion) und Wärmeverluste an die Umgebung.

Schließlich erkennt man in Abb. 2, dass ein Heizer (gespeist von einem Brenner, q_{antrieb}) und ein Kühler (q_{ab}) ergibt zusammen mit der

Kondensationswärme q_{kond} die Heizwärme q_{nutz}) in den Speicher integriert sind. Dies ermöglicht die Pufferung von Antriebs- und Heizwärme im Stratisorp-Speicher. Außerdem vereinfacht sich die hydraulische Verschaltung. Heizer und Kühler führen die (für den idealisierten Fall) in Abb. 1 beige dargestellte Wärme zu bzw. die hellblau dargestellte Wärme ab.

Modellierung und Ergebnisse

Zur Untersuchung des Stratisorp-Zyklus unter verschiedenen Last- und Umgebungsbedingungen wurden ein stationäres und ein dynamisches Systemmodell in MATLAB entwickelt. Das stationäre Modell (Ergebnisse in Abb. 1) erlaubt eine schnelle Abschätzung wichtiger thermodynamischer Größen bei variierten Temperaturen der Wärmequellen und -senken. Dabei wird eine teilweise ideale Wärmerückgewinnung mit verlustfreiem Speicher vorausgesetzt. Eine Berücksichtigung der Ein- und Ausschichtung von Fluid aus und in den Speicher sowie der Verluste im Speicher erfolgt im dynamischen Modell. Dieses umfasst Mehrknotenmodelle für Adsorber und Speicher, um Temperaturgradienten und Wärmetransport abbilden zu können.

Im Rahmen des Projekts werden effektive Parameter des Speichermodells mittels Strö-

mungssimulation abgeschätzt und ein Prüfstand zur experimentellen Untersuchung des Speichers aufgebaut. Der Abgleich des Adsorbermodells mit einem experimentell validierten Modell ergab eine hohe Übereinstimmung. Die folgenden Simulationen wurden dann mit den Parametern eines innovativen Adsorberprototyps mit Adsorbens-Matrix-Kompositen für eine verbesserte Wärmeübertragung durchgeführt. Dabei wurden die Eigenschaften einer bisher nicht experimentell realisierten Adsorbensbeschichtung mit Li-Y-Zeolith auf Basis einer solchen mit Silicoaluminophosphat abgeschätzt.

Mit dem dynamischen Modell wurden Parameterstudien zur Dimensionierung (Speicher, Wärmeübertrager) und zur Regelung durchgeführt. Die Ergebnisse sind vielversprechend. Für Antriebstemperaturen bis 200 °C können in Teillastpunkten COP bis zu 2,0 erreicht werden. Bei ungünstigen externen Temperaturen wird unter Volllast noch 1,6 erreicht. Angelehnt an die VDI-Richtlinie 4650-2 für ein 55/45 °C-Heizsystem berechnete Jahresnutzungsgrade betragen zwischen 1,8 und 2. Dabei sind zwar einige Verluste bisher nicht (Hilfsenergie, Ventile) oder nur approximativ (Speicher) berücksichtigt, andererseits gibt es noch Optimierungsmöglichkeiten, insbesondere bezüglich der Systemregelung. Bei schwankenden Heizlasten

und bei der Einbindung von Sonnenkollektoren und Erdwärmesonden als Niedertemperaturquellen ist das System in Bezug auf Effizienz und Betriebsweise sehr stabil.

Großes Potenzial

Die theoretische Analyse und die Ergebnisse der Systemsimulationen zeigen, dass der Stratisorp-Zyklus ein erhebliches Potenzial für Adsorptionswärmepumpen bietet. Die berechneten COP überbieten jene der derzeit auf dem Markt verfügbaren Gaswärmepumpen deutlich. Allerdings muss sich das Systemkonzept noch in weiter verfeinerten Simulationen, in der Detailauslegung und als Prototyp im Experiment beweisen.

Anmerkungen

[1] Munz, G.; Schmidt, F. P.; Núñez, T.; Schnabel, L.: Adsorptionswärmepumpe mit Wärmespeicher. Europ. Pat. WO/2008/034561.

[2] Sailer R.; Sailer, W.: Speicheranordnung. Europ. Pat. EP 1 076 219 B1.

V. Schwamberger, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Dr. F. P. Schmidt, Leiter der Forschungsgruppe Energie- und Gebäudetechnologie, Fachgebiet Strömungsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

valentin.schwamberger@kit.edu