

DAS ZEOLITH-WASSER-HEIZGERÄT

*Dr.-Ing. Rainer Lang, Dipl.-Ing. Uwe Marx
Vaillant GmbH, Remscheid*

Schlagwörter: Wärmepumpe, Heizgerät, Adsorption, Zeolith, Energieeinsparung

Gasbeheizte Adsorptionswärmepumpen bieten eine attraktive Alternative zu Elektrowärmepumpen, wenn es darum geht, Wohnwärme und Warmwasser zur Verfügung zu stellen. Für diesen Anwendungsfall ist das Adsorptionssystem Zeolith-Wasser bestens geeignet. Es ermöglicht problemlos Vorlauftemperaturen, wie sie bei der Wohnraumbeheizung und Trinkwassererwärmung erforderlich sind. Außerdem ist es aus ökologischer Sicht unbedenklich, was bei einem Einsatz im Wohnbereich sehr vorteilhaft ist. Ein gasbetriebenes Zeolith-Heizgerät ermöglicht primärenergetische Nutzungsgrade von 130 % bis 135 %, die deutlich über denen der Brennwerttechnik liegen. Diese Entwicklung stellt damit einen weiteren Meilenstein in der Gasheiztechnik dar.

1. EINLEITUNG

Sorptionssysteme sind in der Kälteerzeugung schon über 100 Jahre bekannt. Im 20. Jahrhundert wurden sie jedoch von den Kompressionssystemen weitgehend ersetzt. Im Rahmen der immer drängenderen Umweltprobleme und der in diesem Zusammenhang geführten Diskussionen erleben sie in jüngster Zeit eine Renaissance. Auf dem Gebiet der Adsorption sind Ammoniak-Wasser [1, 2] und Wasser-Lithiumbromid die am häufigsten eingesetzten Stoffsysteme. In der Adsorptionstechnik hat man die Wahl zwischen Aktivkohle [3], Silikagel [4] und Zeolith als Adsorbentien sowie Wasser, Ammoniak oder Methanol als Kältemittel.

In diesem Beitrag wird die Entwicklung einer Zeolith-Wasser-Wärmepumpe vorgestellt. Zeolith hat in Verbindung mit dem Kältemittel Wasser einige für diesen Anwendungsfall sehr günstige thermodynamische Eigenschaften [5; 6; 7]. Es können mit diesem Stoffsystem hohe Vorlauftemperaturen, wie sie zum Beispiel bei der Trinkwassererwärmung erforderlich sind, problemlos realisiert werden. Zeolith ist innerhalb der Betriebstemperaturen thermisch absolut stabil. Weiterhin ist Zeolith ungiftig und nicht brennbar, was besonders beim Einsatz im Hausheizungsbereich sehr wichtig ist. Dem hohen Gefrierpunkt des Kältemittels Wasser kann mit dem entwickelten Einzelmodul-Konzept begegnet werden, das auch einen Betrieb der Wärmepumpe bei Umgebungstemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes ermöglicht. Zeolith ist außerdem in verschiedenen Ausführungen gut erhältlich.

Alle Konzepte, deren Adsorber auf der Basis von Zeolithgranulat-Schüttungen aufgebaut sind, weisen lange Sorptionszykluszeiten und eine damit verbundene geringe Leistungsdichte der Anlage auf. Der Grund hierfür ist die geringe Wärmeleitfähigkeit der Zeolithschüttung von etwa 0,15 W/(mK) [8].

Der Einsatz von Zeolith-Pulver ist aufgrund des ungenügenden Wärme- und Stofftransports innerhalb einer pulverisierten Zeolithstruktur ebenfalls nicht vielversprechend [5].

Aussichtsreicher ist die Verwendung dünner Zeolithschichten mit einem direkten Kontakt zur Wärmeaustauscherfläche. Eigene Untersuchungen weisen allerdings darauf hin, daß es äußerst schwierig ist, eine Zeolithschicht, die aus Zeolith-Pulver und einem Binder vorbereitet wird, mit einem dauerhaft guten Kontakt auf eine metallische Wärmeaustauscherfläche aufzubringen. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen von Zeolith und Metall führen nach Durchlaufen einiger Sorptionszyklen zwischen 30°C und 200°C zu einem Abplatzen der Zeolithschicht [9].

Die besten Ergebnisse ergab der Einsatz einer einlagigen Schicht von Zeolith-Granalien, die direkt auf der Wärmeaustauscherfläche aufgebracht ist. Bei dieser Geometrie wird eine große Stoffübergangsfläche kombiniert mit einem ausreichend guten Wärmetransport, da jedes Zeolith-Pellet direkten Metallkontakt hat.

2. DER PERIODISCHE WÄRMEPUMPENPROZEß

Für die energetische Bewertung eines thermisch angetriebenen Wärmepumpenprozesses dient die Wärmeziffer (Coefficient of Performance, COP), die wie folgt definiert ist:

$$COP = \frac{Q_{\text{Nutzen}}}{Q_{\text{Aufwand}}} = \frac{Q_{\text{Ads}} + Q_{\text{Abk}} + Q_{\text{Kond}}}{Q_{\text{Des}} + Q_{\text{Auf}} + W_p} \quad (1)$$

Darin sind als Nutzwärmen die Adsorptionswärme, die Abkühlwärme sowie die Kondensationswärme aufgeführt; dem Prozeß zugeführt werden die Desorptionswärme, die Aufheizwärme sowie die Arbeit für die Umwälzpumpen. Die Energiebilanz des Prozesses lautet folgendermaßen:

$$Q_{\text{Verd}} + Q_{\text{Des}} + Q_{\text{Auf}} + W_p = Q_{\text{Abk}} + Q_{\text{Ads}} + Q_{\text{Kond}} \quad (2)$$

Hierbei sind die Wärmeverluste nach außen nicht berücksichtigt, da sie bei guter Isolierung gering sind. Vernachlässigt man außerdem die zur Überwindung der Druckverluste erforderlichen Pumpenleistungen, so läßt sich die Wärmeziffer in der folgenden, einfachen Form darstellen:

$$COP = 1 + \frac{Q_{\text{Verd}}}{Q_{\text{Des}} + Q_{\text{Auf}}} \quad (3)$$

Gleichung 3 verdeutlicht die Wichtigkeit der aus der Umgebung entnommenen Verdampfungswärme für die Wärmeziffer der Wärmepumpe. Die Auslegung des Wärmepumpenprozesses muß somit das Ziel haben, die Verdampfungswärme zu maximieren bei gleichzeitig reduzierter Desorptions- und Aufheizwärme. Letzteres ist durch den modularen Aufbau der Wärmepumpe und dem dadurch realisierbaren, internen Wärmeaustausch möglich. Eine möglichst große Verdampfungswärme setzt eine große Beladungsbreite während eines Sorptionszyklus voraus.

Zur näheren Erläuterung dieses Sachverhalts ist in Bild 1 ein Dampfdruckdiagramm dargestellt, das den idealen sowie den realen Wärmepumpenprozeß beschreibt. Der ideale Prozeß gibt die maximale Kältemittelmenge (bezogen auf die Menge trockenen Zeoliths) Δx_{max} vor, die unter Nutzung von Umgebungswärme während eines Wärmepumpenzyklus verdampft werden kann:

$$\Delta x_{\text{max}} = \frac{m_{w,\text{max}}}{m_{\text{zeo}}} \quad (4)$$

Diese Kältemittelmenge kann im realen Prozeß jedoch nicht vollständig genutzt werden. Zum Auskoppeln der Heizwärme vom Adsorber zum Heiznetz sowie zum Einkoppeln der Brennerwärme vom Brenner zum Desorber sind jeweils Temperaturgradienten erforderlich, die die nutzbare Beladungsbreite auf den Wert Δx reduzieren, die durch die Wasserbeladung des Zeoliths am Ende der Adsorptionsphase x_{Ads} und am Ende der Desorptionsphase x_{Des} bestimmt ist. Die bei dieser Beladungsbreite dem Prozeß zuführende Verdampfungswärme ist bestimmt durch:

$$Q_{Verd,max} = m_w \cdot r = m_{zeo} \cdot (x_{Ads} - x_{Des}) \cdot r = m_{zeo} \cdot \Delta x \cdot r \quad (5)$$

worin m_w die Wassermenge und r die spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers bedeuten. Eine weitere Reduktion der durch Einkopplung von Umgebungswärme verdampfba- ren Wassermenge folgt aus dem nicht-isothermen Verlauf der Abkühlphase. Er rührt daher, daß von der gesamten Wassermenge m_w , die während der Desorptionsphase kondensiert wurde, eine bestimmte Menge $m_{w,Abk} = m_{zeo} \cdot \Delta x_{Abk}$ verdampft werden muß, um den Verdampfer auf Umgebungstemperatur abzukühlen.

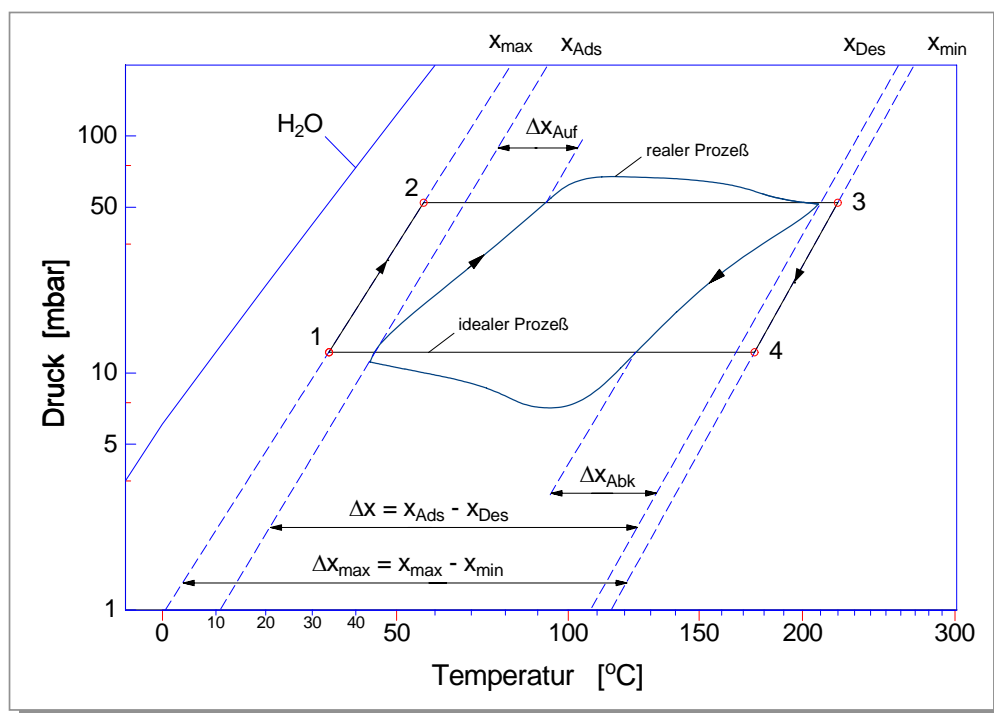


Bild 1: Der periodische Wärmepumpenprozeß [9]

Die damit verbundene Abkühlwärme berechnet sich zu:

$$Q_{Verd,Abk} = m_{w,Abk} \cdot r = m_{zeo} \cdot \Delta x_{Abk} \cdot r \quad (6)$$

mit

$$\Delta x_{Abk} = \frac{(mc)_{Verd} + (mc)_w}{m_{zeo} \cdot r} \cdot \Delta \vartheta_{KV} \quad (7)$$

$(mc)_{Verd}$ stellt hierbei die Wärmekapazität des Verdampfers einschließlich des im Verdampfer enthaltenen Wärmeträgers, $(mc)_w$ die Wärmekapazität des im Verdampfer gespeicherten Kältemittels dar und $\Delta \vartheta_{KV} = \vartheta_{Kond} - \vartheta_{Verd}$ ergibt sich aus der erforderlichen Abkühlung von Kondensator- auf Verdampferturniveau. Somit beträgt die aus der Umgebung ein- koppelbare Verdampfungswärme

$$Q_{Verd} = Q_{Verd,max} - Q_{Verd,Abk} = m_{zeo} \cdot (\Delta x - \Delta x_{Abk}) \cdot r \quad (8)$$

Die Summe der zur Desorption des Kältemittels erforderlichen Desorptionswärme Q_{Des} und der zur Erhöhung der inneren Energie des Zeoliths erforderlichen Aufheizwärme Q_{Auf} ist nachfolgend dargestellt:

$$Q_{Des} + Q_{Auf} = m_{zeo} \cdot \Delta x \cdot \bar{q}_{ads} + (m_{zeo} \cdot \bar{c}_{zeo,w} + (mc)_{Des}) \cdot \Delta \vartheta_{D-A} \quad (9)$$

Hier bedeuten \bar{q}_{ads} die über der Beladung des Zeoliths gemittelte Adsorptionswärme, die sich aus der mittleren Benetzungswärme \bar{q}_B und der spezifischen Verdampfungswärme r zusammensetzt. $\bar{c}_{zeo,w}$ ist die über die Beladung gemittelte spezifische Wärmekapazität des Zeoliths, $(mc)_{Des}$ ist die Wärmekapazität des Desorbers einschließlich des in ihm enthaltenen Wärmeträgers und $\Delta \vartheta_{D-A}$ beschreibt die Temperaturdifferenz vom Beginn bis zum Ende der Desorption.

Mit Hilfe der Gleichungen 5 bis 9 erhält man den folgenden Ausdruck für die Wärmeziffer eines einstufigen, periodischen Wärmepumpenprozesses:

$$COP = 1 + \frac{1 - \frac{\Delta x_{Abk}}{\Delta x}}{1 + \frac{\bar{q}_B}{r} + \frac{\bar{c}_{zeo,w} \cdot \Delta \vartheta_{D-A}}{\Delta x \cdot r} + \frac{(mc)_{Des} \cdot \Delta \vartheta_{D-A}}{m_{zeo} \cdot \Delta x \cdot r}}$$

$$= 1 + \frac{1 - K_{Verd}}{1 + K_{Ads} + K_{zeo} + K_{Des}} \quad (10)$$

Es ist direkt ersichtlich, daß die Wärmeziffer umso größer wird, je kleiner die Kennzahlen K_i sind. K_{Verd} ist ein Maß für die Wärme, die während der Abkühlphase im Verdampfer abgeführt werden muß, ihr Wert liegt im Bereich von $K_{Verd} = 0,1$. Aus Gleichung 7 wird deutlich, daß die Verdampfermasse einschließlich des in ihm enthaltenen Wärmeträgers möglichst gering sein muß, um K_{Verd} gering zu halten. Außerdem hat eine geringe Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta_{K-V}$ einen positiven Einfluß auf die Wärmeziffer. Dies bedeutet, daß Niedertemperatur-Heizsysteme beim Einsatz von Wärmepumpen zu präferieren sind.

K_{Ads} stellt die Stoffeigenschaften des Systems Zeolith-Wasser dar und liegt für den eingesetzten Zeolith im Bereich von $K_{Ads} = 0,35$. Die Kennzahl K_{zeo} beschreibt die Wärme, die dem Zeolith während der Desorptionsphase zur Änderung seiner inneren Energie zugeführt werden muß. Eine geringere Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta_{D-A}$ resultiert allerdings in einer geringeren Beladungsbreite Δx während des Sorptionsprozesses, so daß die maximale Desorptionstemperatur, die direkten Einfluß auf $\Delta \vartheta_{D-A}$ hat, zur Erreichung einer möglichst hohen Wärmeziffer sorgfältig bestimmt werden muß. K_{zeo} liegt beim vorliegenden Stoffsystem im Bereich von 0,4.

Je größer die Aufheizwärme Q_{Auf} des Adsorbers während der Desorptionsphase ist, desto geringer ist die Wärmeziffer. Dies verdeutlicht Gleichung 3 und ist in Gleichung 10 durch die Kennzahl K_{Des} berücksichtigt. Man erkennt, daß die Adsorbermasse, analog zur Verdampfermasse, zum Erreichen einer guten Wärmeziffer möglichst gering sein muß. Desweiteren wird auch hier wieder die erforderliche sorgfältige Betrachtung der maximalen Desorptionstemperatur deutlich. K_{Des} liegt je nach Auslegung der Wärmeaustauscher sowie des Vakuumbehälters im Bereich von 1,25 bis 2,75.

Mit Hilfe von Gleichung 10 kann gezeigt werden, daß die Wärmeziffer eines einstufigen Wärmepumpenprozesses allein durch die beiden Kennzahlen K_{zeo} und K_{Ads} auf einen Wert von $COP=1,5$ begrenzt wird [9]. Berücksichtigt man weiterhin die erforderlichen Behältermassen, so werden die erreichbaren Wärmeverhältnisse auf 1,2 bis 1,3 begrenzt. Eine deutliche Prozeßverbesserung läßt sich durch einen internen Wärmeaustausch zwischen den einzelnen Wärmepumpenmodulen erreichen. Dadurch wird die von außen zuzuführende Hochtemperaturwärme verringert und die Wärmeziffer erhöht, wie Gleichung 3 verdeutlicht. Das hier verwendete Stoffsystem Zeolith-Wasser eignet sich besonders gut für diese Art der

Prozeßführung, da es eine breite Überschneidung der Temperaturen während der Desorptions- und Adsorptionsphase aufweist, wie aus Bild 1 ersichtlich ist.

3. ADSORPTIONSVERHALTEN UNTERSCHIEDLICHER ZEOLITHSCHICHTEN

Die Geometrie der im Adsorber eingesetzten Zeolithschichten hat einen entscheidenden Einfluß auf die Sorptionskinetik. Diese wiederum beeinflußt die erreichbare Wärmeziffer und die Leistungsdichte der Anlage, wobei grundsätzlich eine möglichst gute Kinetik anzustreben ist. Aus diesem Grund sollten eigene Untersuchungen dazu dienen, kompakte Zeolithschichten dauerhaft gut und direkt mit dem Wärmeaustauscher zu verbinden. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen von Metall und Zeolith führten jedoch wiederholt zum Abplatzen der Schichten nach einigen Wärmepumpenzyklen [9]. Eine Alternative zum Herstellen kompakter Zeolithschichten ist der Einsatz handelsüblicher Zeolith-Pellets, die typischerweise in einer Größe von 1 bis 4 mm erhältlich sind. Sie sind mechanisch dauerhaft stabil und damit für den Einsatz in einem Heizgerät geeignet.

Bild 2 zeigt das Adsorptionsverhalten verschiedener Zeolithschichten. Die Adsorptionskinetik wird dabei durch die bezogene Beladung χ

$$\chi = \frac{x - x_0}{x_\infty - x_0} \quad (11)$$

beschrieben, die das Verhältnis der aktuellen Beladungsänderung $(x-x_0)$ zur maximalen Beladungsänderung $(x_\infty-x_0)$ am Ende der Messung darstellt.

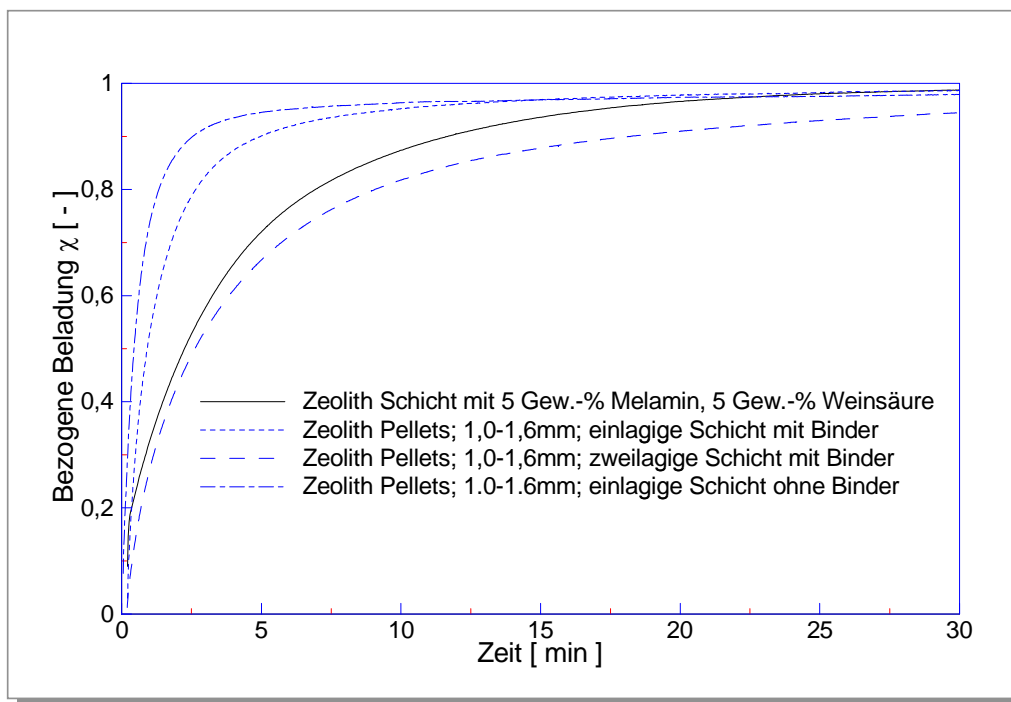


Bild 2: Adsorptionskinetik verschiedener Zeolithschichten

Die durchgezogene Linie in Bild 2 kennzeichnet die Kinetik einer kompakten Zeolithschicht, die aus Zeolithpulver, einem Bindemittel und den Porenbildnern Melamin und Weinsäure hergestellt wurde. Die gestrichelten Linien beschreiben die Kinetik verschiedener Zeolithschichten, die aus Pellets bestehen. Man erkennt deutlich, daß eine zweilagige Schicht die Adsorptionskinetik erheblich hemmt. Hier zeigt sich der Vorteil des guten Wärmetransports bei einer Schicht, in der jedes Pellet direkten Metallkontakt hat. Etwas überraschend ist der Sachverhalt, daß eine einlagige Schicht, die ohne Bindemittel lose aufgebracht wurde, eine bessere Kinetik hat als eine einlagige Schicht, die mit einem Bindemittel auf den Wär-

meaustauscher „aufgeklebt“ wurde. Dies deutet darauf hin, daß der Binder die Oberfläche der Pellets teilweise „verklebt“ und dadurch den Stofftransport behindert. Auf der Basis dieser Ergebnisse wird der Adsorber für eine einlagige Pelletschicht mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm ohne Bindemittel ausgelegt. Diese Geometrie garantiert einen guten Wärmetransport bei gleichzeitig gutem Stofftransport.

4. DAS WÄRMEPUMPEN-MODUL

Die baugleichen Einzelmodule der Zeolith-Wasser-Adsorptionswärmepumpe werden seriell miteinander verschaltet. Dies ermöglicht einen internen Wärmeaustausch zwischen den Modulen, was nach Gleichung 3 die Wärmeziffer erhöht. Der prinzipielle Aufbau des Einzelmoduls ist in Bild 3 dargestellt.

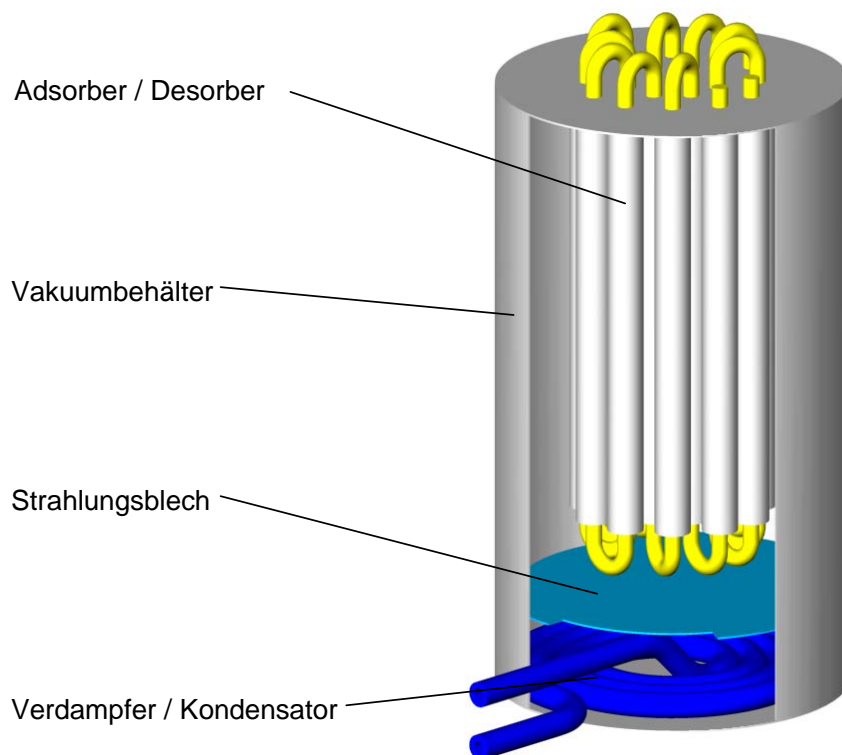


Bild 3: Prinzipieller Aufbau des Einzelmoduls

Das Modul besteht im wesentlichen aus dem Adsorber / Desorber, dem Verdampfer / Kondensator sowie einem zylindrischen Vakuumbehälter mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Länge von etwa 600 mm. Zwischen den beiden Wärmeaustauschern ist ein Strahlungsschutz angeordnet, der einen Wärmestrahlungsaustausch zwischen den beiden auf unterschiedlichem Temperaturniveau operierenden Komponenten verhindert.

Der Adsorber / Desorber ist aus Wendelrippenrohren aufgebaut. Die Zeolith-Granalien werden lose in den Rippenzwischenräumen aufgebracht, wie in Bild 4 dargestellt. Da der Rippenabstand nur unwesentlich größer ist als der Durchmesser der Pellets, entsteht eine einlagige Pelletschicht, die nach den vorgestellten Ergebnissen die beste Sorptionskinetik aufweist. Um einen Adsorbens-Verlust während des Betriebs der Anlage zu verhindern, wird der gesamte Wärmeaustauscher mit einem Metallnetz überzogen.

Verdampfer und Kondensator sind als ein Bauteil realisiert, das abwechselnd die beiden Funktionen wahrnimmt (siehe Bild 5). Während der Desorptionsphase wird der aus dem Zeolith desorbierte Kältemitteldampf kondensiert, gespeichert, und das flüssige Adsorbat wird während der anschließenden Adsorptionsphase wieder verdampft.



Bild 4: Mit Zeolith befülltes Adsorber / Desorber-Rohr



Bild 5: Verdampfer / Kondensator

Der beschriebene konstruktive Aufbau des Einzelmoduls ist sehr einfach ohne bewegte Teile und garantiert damit eine hohe Betriebssicherheit.

Wie in Bild 3 dargestellt, ist die Zufuhr des Wärmeträgers für den Adsorber / Desorber und für den Verdampfer / Kondensator räumlich getrennt, um unerwünschte Wärmeleitung zwischen den beiden Wärmeträgern zu minimieren. Die Anordnung des Verdampfers / Kondensators im unteren Teil des Vakuumbehälters bietet einen weiteren wichtigen Vorteil. Bei einem Kaltstart ist es möglich, daß während der Desorptionsphase ein Teil des aus dem Zeo-

lith desorbierten Kältemitteldampfes an der Wand des Vakuumbehälters kondensiert, da diese kälter ist als der Kondensator. Dieses Kondensat wird durch die gewählte Anordnung auf den Wärmeaustauscherflächen des Verdampfers / Kondensators gesammelt und nimmt damit weiterhin am Sorptionsprozeß teil, was zur Erreichung einer hohen Wärmeziffer entscheidend ist.

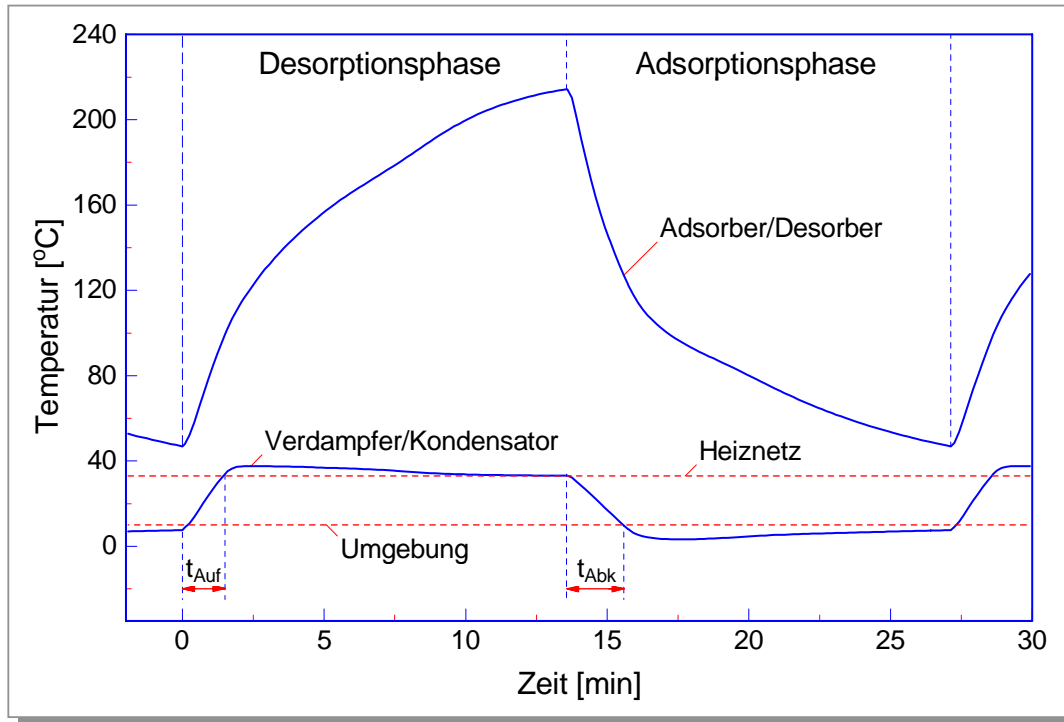


Bild 6: Temperaturverlauf während eines Wärmepumpenzyklus [9]

Bild 6 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf im Adsorber / Desorber sowie im Verdampfer / Kondensator eines Einzelmoduls während eines Wärmepumpenzyklus. Während der Desorptionsphase wird der Wärmeträger im Desorber mittels eines Gasbrenners aufgeheizt, so daß die Temperatur des Zeoliths und der Druck im Modul steigen. Der desorbierte Kältemitteldampf wird im Kondensator verflüssigt, wodurch auch dort die Temperatur steigt. Sobald die Kondensatortemperatur (t_{Auf}) die Temperatur des Heizsystems übersteigt, wird Nutzwärme an das Heizsystem abgegeben. Diese Betriebsphase ist beendet, wenn eine maximale Prozeßtemperatur von etwa 200°C erreicht ist. Die Wärmezufuhr durch den Gasbrenner wird unterbrochen und die Adsorptionsphase beginnt, indem das Modul abgekühlt wird. Dadurch sinken die Temperatur von Zeolith und Verdampfer sowie der Druck im Modul. Sobald die Verdampfertemperatur (t_{Abk}) unter die Umgebungstemperatur abgesunken ist, wird das Kältemittelkondensat durch die Einkopplung von Umgebungswärme verdampft. Der Kältemitteldampf wird vom Zeolith adsorbiert, wobei die Adsorptionswärme als Nutzwärme an das Heizsystem abgeführt wird. Nachdem das gesamte Kältemittelkondensat verdampft wurde, ist die Adsorptionsphase beendet und der Prozeß beginnt mit der nächsten Desorptionsphase von neuem.

5. DER AUFBAU DER MODULAREN WÄRMEPUMPE

Anhand der beschriebenen Temperaturverläufe in den Komponenten des Einzelmoduls läßt sich erkennen, daß das Modul aufgrund des Feststoffsystems diskontinuierlich betrieben werden muß. Ein intermittierender Betrieb ist allerdings für eine Anlage, die zur Wohnraumbeheizung eingesetzt werden soll, nicht akzeptabel. Weiterhin kann mit Hilfe einer thermodynamischen Analyse auf der Basis des zweiten Hauptsatzes gezeigt werden, daß die enor-

men Temperaturdifferenzen zu Beginn der Desorptions- und der Adsorptionsphase eine erhebliche Verschlechterung der erreichbaren Wärmeziffer zur Folge haben [9]. Zur Vermeidung dieser Wirkungsgradverluste schlagen Härkönen und Aittomäki [10] ein Wärmepumpenkonzept mit einem geschlossenen Wärmeträgerkreis vor. Dabei strömt der Wärmeträger ausgehend von einem Hochtemperatur-Wärmeaustauscher in eine Wärmepumpe, die sich in der Desorptionsphase befindet, weiter zum Niedertemperatur-Wärmeaustauscher und danach durch eine Wärmepumpe, die sich in der Adsorptionsphase befindet und anschließend zurück zum Hochtemperatur-Wärmeaustauscher. Die Umschaltung der Betriebsphasen erfolgt durch Strömungsumkehr des Wärmeträgers. Das Ziel dieser Anordnung ist die Verkleinerung der Temperaturgradienten in den Modulen, wodurch sich die Wärmeziffer erhöht.

Eine solche Anlage ist in Bild 7 abgebildet. Die Umkehr der Strömungsrichtung im Primärkreis kann durch einen Drehrichtungswechsel der Pumpe oder durch ein Vierwegeventil bewirkt werden. Die Verschaltung von Solekreislauf und Sekundärkreislauf kann ebenfalls mit einem Mehrwegeventil vorgenommen werden. Aufgrund der bereits vorliegenden Untersuchungen erscheint das in Bild 8 dargestellte Entwicklungsziel von 135 % im Jahresmittel realistisch. Dies bedeutet im Vergleich zur Brennwertechnik eine Verbesserung des Nutzungsgrades um nahezu 30 % und eine damit verbundene CO₂-Einsparung um etwa 20 %.

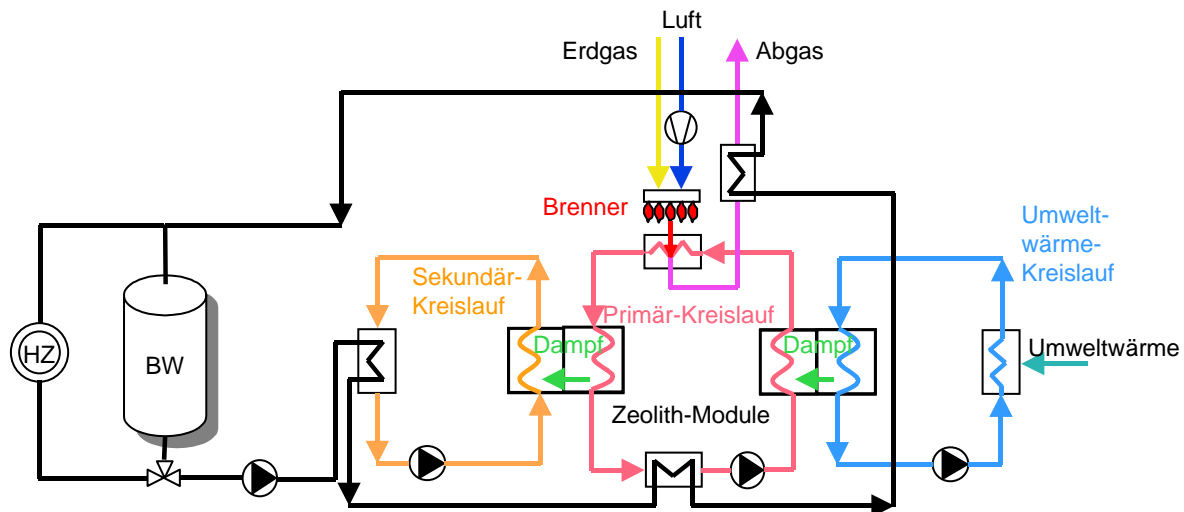


Bild 7: Aufbau einer modularen Wärmepumpe

Abschließend sei noch auf die in Bild 9 dargestellte Design-Studie des modularen Zeolith-Heizgerätes verwiesen. Man erkennt darin alle Komponenten eines konventionellen Heizgerätes und zusätzlich die Module der Zeolith-Einheit.

6. Verzeichnis der Bilder

Bild 1: Der periodische Wärmepumpenprozeß [9]

Bild 2: Adsorptionskinetik verschiedener Zeolithschichten

Bild 3: Prinzipieller Aufbau des Einzelmoduls

Bild 4: Mit Zeolith befülltes Adsorber / Desorber-Rohr

Bild 5: Verdampfer / Kondensator

Bild 6: Temperaturverlauf während eines Wärmepumpenzyklus [9]

Bild 7: Aufbau der modularen Wärmepumpe

Bild 8: CO₂-Einsparpotenzial im Vergleich zur Brennwertechnik

Bild 9: Bauraumstudie eines Zeolith-Heizgerätes

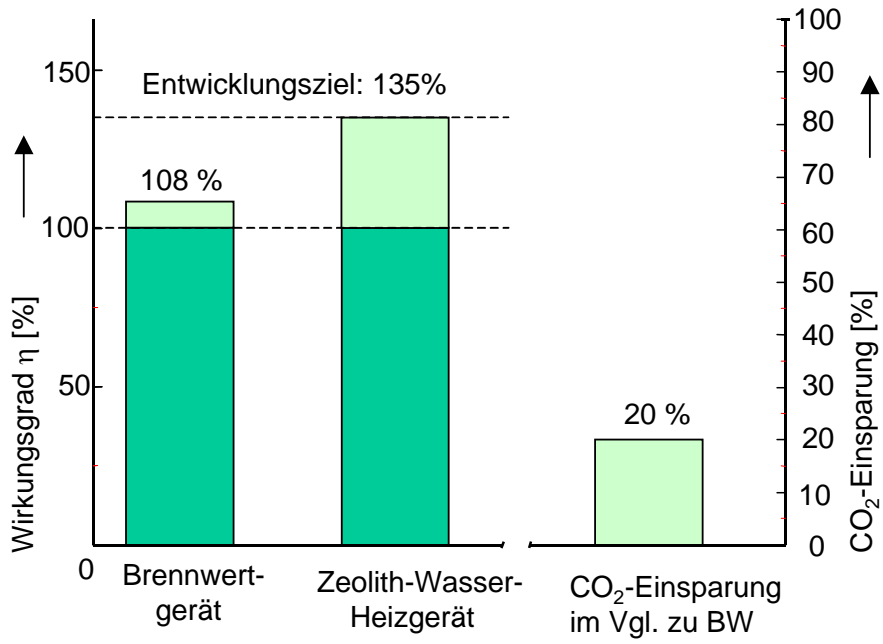


Bild 8: CO₂-Einsparpotenzial im Vergleich zur Brennwerttechnik

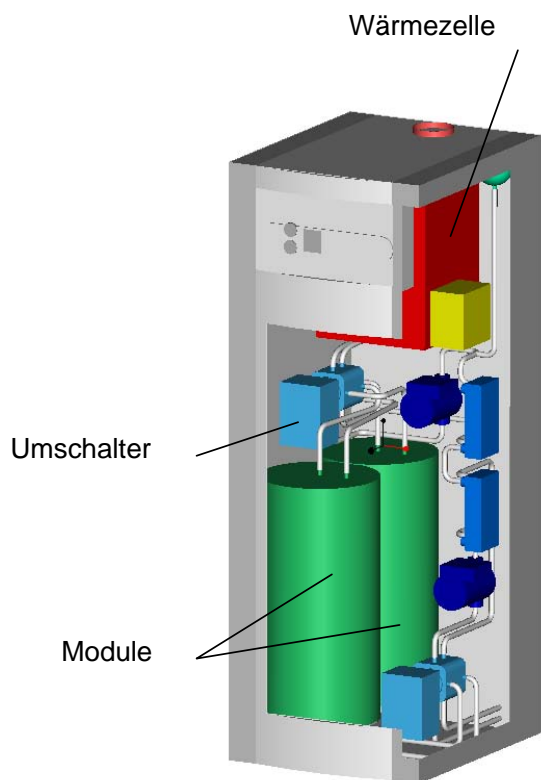


Bild 9: Bauraumstudie eines Zeolith-Heizgerätes

7. Formelzeichen

COP	Coefficient of Performance	[-]
$\bar{c}_{zeo,w}$	über die Beladung gemittelte spezifische Wärmekapazität des Zeoliths	[J/(kg K)]
K_{Verd}	Kennzahl für Verdampferabkühlung	[-]
K_{Ads}	Kennzahl für Stoffeigenschaften des Zeoliths	[-]
K_{Zeo}	Kennzahl für Aufheizung des Zeoliths	[-]
K_{Des}	Kennzahl für Aufheizung des Adsorbers	[-]
$m_{w,max}$	maximale Kältemittelmenge	[kg]
m_{zeo}	Zeolithmenge	[kg]
m_w	Kältemittelmenge	[kg]
$m_{w,Abk}$	während der Abkühlphase verdampfende Kältemittelmenge	[kg]
$(mc)_{Verd}$	Wärmekapazität des Verdampfers	[J/K]
$(mc)_w$	Wärmekapazität des im Verdampfer gespeicherten Kältemittels	[J/K]
$(mc)_{Des}$	Wärmekapazität des Desorbers	[J/K]
Q	Wärme	[J]
Q_{Nutzen}	Nutzwärme	[J]
$Q_{Aufwand}$	Antriebswärme des Prozesses	[J]
Q_{Ads}	Adsorptionswärme	[J]
Q_{Abk}	Abkühlwärme	[J]
Q_{Kond}	Kondensationswärme	[J]
Q_{Des}	Desorptionswärme	[J]
Q_{Auf}	Aufheizwärme	[J]
Q_{Verd}	Verdampfungswärme	[J]
$Q_{Verd,max}$	maximale Verdampfungswärme	[J]
$Q_{Verd,Abk}$	Abkühlwärme des Verdampfers	[J]
\bar{q}_{Ads}	Adsorptionswärme, über der Beladung des Zeoliths ermittelt	[J/kg]
\bar{q}_B	mittlere Benetzungswärme	[J/kg]
r	Verdampfungswärme des Kältemittels	[J / kg]
W_p	elektrische Antriebsenergie für Pumpen	[J]
x	Wasserbeladung des Zeoliths	[kg/kg]
x_0	Wasserbeladung des Zeoliths zu Beginn einer Messung	[kg / kg]
x_∞	Wasserbeladung des Zeoliths am Ende einer Messung	[kg/kg]
x_{Ads}	Wasserbeladung des Zeoliths bei Adsorptionsende	[kg / kg]
x_{Des}	Wasserbeladung des Zeoliths bei Desorptionsende	[kg / kg]

x_{Ads}	Beladungsdifferenz des Zeoliths	[kg / kg]
Δx_{max}	maximale Beladungsdifferenz des Zeoliths	[kg / kg]
Δx_{Abk}	Beladungsdifferenz des Zeoliths während der Abkühlphase	[kg / kg]
Δg_{KV}	Temperaturdifferenz bei Abkühlung von Kondensator- auf Verdampfer- temperatur	[K]
Δg_{D-A}	Temperaturdifferenz von Beginn bis zum Ende der Desorptionsphase	[K]
χ	bezogene Beladung	[-]

8. Literatur

Zeitschriftenhinweis:

- [1] Meckel, M.: The AWT- Gas Absorption Heat Pump (Westfälische Ferngas AG). Absorption Heat Pump Congress, Paris, 1985.
- [2] Sterlepper, J. : DAWP-Wärmepumpe. Gasfachliche Aussprachetagung, München 1998
- [3] Meunier, F., Boubakri, A., Pons, M., Guilleminot, J.J. : In Situ, Experimental Study of Three Adsorptive Ice Makers. Proc. of the Symposium: Solid Sorption Refrigeration, Paris, 1992.
- [4] Yanagi, H., Komatu, F., Ino, N., Yokamoto, Y. : Prototype Test of Adsorption Refrigerator Using Silicagel-Water Pairs. Proc. of the Symposium: Solid Sorption Refrigeration, Paris, 1992.
- [5] Eichengrün, S., Winter, E.R.F. : Zeolith / Wasser-Adsorptionskälteaggregate. Ki Luft- und Kälte-technik, 3/1994.
- [6] Fischer, S., Hauer, A., Schölkopf, W., Heinemann, U., Schreiner, M.: Thermochemische Speicherung und Wärmetransformation von Fernwärme zum Lastausgleich in einem Fernwärmenetz, Abschlußbericht BMBF-Forschungsvorhaben 0329662A, 1999
- [8] Völkl, J. : Heat Conduction in Zeolite Beds. Proc. 7. Int. Heat Transfer Conference, München, 1982.
- [9] Lang, R., Westerfeld, T., Knoche, K.F., Faust, H.J. : Entwicklung einer modularen Adsorptionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Zeolith-Wasser. BMBF Abschlußbericht, Förderkennzeichen 0326968, 1996.
- [10] Härkönen, M., Aittomäki, A. : Analytical Model for the Thermal Wave Adsorption Heat Pump Cycle. Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 12, Nr.1, 1992.

Dissertationen:

- [7] Rothmeyer, M. : Wärmetransformation mit dem Stoffpaar Zeolith-Wasser. Thesis, TU München, 1985
- [11] Westerfeld, T. : Numerische Untersuchung einer periodisch arbeitenden Adsorptionswärmepumpe. Thesis, RWTH Aachen, 1996.