

Autoklimaanlagen der Zukunft

Technologische und ökologische Aspekte

ZEO-TECH GMBH
UNTERSCHLEIBHEIM (MÜNCHEN)

Autoklimaanlagen führten in gemäßigten Breiten lange Zeit ein Schattendasein – gibt es doch dort viel Schatten, der Klimaanlagen eigentlich nicht erforderlich macht. Doch im Zuge eines gestiegenen Komfortbedürfnisses hat sich das in letzter Zeit stark geändert, so daß nicht nur in sonnigen Regionen Autoklimaanlagen mehr und mehr zum Serienlieferumfang eines Fahrzeugs gehören. So werden zur Zeit (mit weiterhin steigender Tendenz) jährlich ca. 24 Mio. Fahrzeugklimaanlagen hergestellt und in Betrieb gebracht.

Dem Komfort auf seiten des Betreibers steht jedoch eine nicht unerhebliche Umweltbelastung gegenüber. Das bisher vorhandene Ozonzerstörungspotential durch emittierte Kältemittel aus Kfz-Klimaanlagen wird zwar mit dem Übergang auf das Ersatzkältemittel R 134 a gelöst sein, doch tragen die Klimaanlagen aufgrund des Kraftstoff-Mehrverbrauches und der prinzipbedingten Kältemittlemissionen weiterhin direkt und indirekt zum Treibhauseffekt bei.

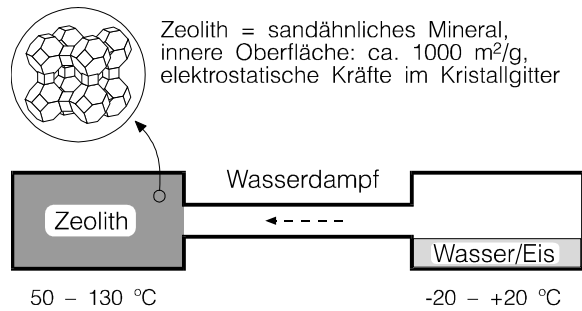
Im folgenden werden zwei Varianten umweltverträglicher Autoklimaanlagen der Zukunft vorgestellt, die Kälte nur mit natürlichen Stoffen erzeugen. Die erste wird hauptsächlich mit den heißen Abgasen des Verbrennungsmotors angetrieben und weist dadurch einen reduzierten Beitrag zum Treibhauseffekt auf, und die zweite ist ein Wärme/Kälte-Speicher, der wahlweise als Heizungs- oder Klimatisierungs-System für Elektroautos eingesetzt werden kann. Beide Varianten werden hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit untersucht und mit herkömmlichen Kompressorklimaanlagen verglichen.

1. Sorptionstechnik mit Wasser/Zeolith	5
Der Stoff Zeolith	6
Namensgebung und Eigenschaften	6
Aufbau	6
Physikalische Effekte	7
Anwendungen	7
Vorkommen und Herstellungsverfahren	7
Stabilität	8
Beladungsfelder des Stoffpaares Wasser/Zeolith	8
Thermodynamik des Adsorptionsprozesses	8
Theoretische Leistungszahlen	10
Anwendungsmöglichkeiten	10
2. Adsorptions-Klimaanlage	11
Funktion	11
Stand-Klimatisierung	11
Wärmetauscher	12
Erprobung	12
Kälteleistungsverlauf	12
Leistungszahlen	13
Prozeßdarstellung im Beladungsfeld	13
Ergebnisse: Erprobung	14
Ökologische Aspekte	15
Beitrag zum Treibhauseffekt	15
Randbedingungen für eine Kompressor-Klimaanlage	15
Randbedingungen für eine Sorptions-Klimaanlage	16
Gesamt-CO ₂ -Äquivalente	16
Ergebnisse: Ökologische Aspekte	17
Adsorptionsklimaanlage: Zusammenfassung und Ausblick	18
3. Heiz- und Klimaanlage für Elektrofahrzeuge	19
Stand der Technik	19
Elektrisch angetriebene Kompressor-Klimaanlage	19
Heizung	20
Zwischenergebnis	21
Sorptionsspeicher-System mit Wasser/Zeolith	21
Prototyp	21
Umweltverträglichkeit	22
Erprobung	22
Zusammenfassung	23
Anhang	24

1. Sorptionstechnik mit Wasser/Zeolith

Mit natürlichen und daher umweltverträglichen Stoffen kann in einem Sorptionsprozeß¹ gleichzeitig Kälte und Wärme erzeugt werden. Es handelt sich dabei um einen sandähnlichen Kristall mit der Bezeichnung *Zeolith* und um Wasser als Kältemittel.

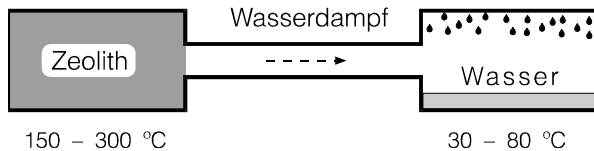
Der Zeolith hat die Eigenschaft, Wasserdampf anzusaugen und unter Wärmeabgabe in seine Kristallstruktur einzubinden. Erfolgt ein solcher Prozeß in luftleeren Behältern, geschieht das Ansaugen des Dampfes von einer Wasseroberfläche mit solcher Heftigkeit, daß aufgrund der hohen Verdampfungskälte der Rest des Wassers zu Eis gefriert. Dieses Eis kann zum Kühlen und Klimatisieren genutzt werden, während gleichzeitig auf der anderen Seite die im Zeolith freiwerdende Wärme (Wärmepumpeneffekt) für Heizzwecke verwendet werden kann. Be-



Kälteerzeugung (1. Teilprozeß = Adsorption):

Der Zeolith zieht den Wasserdampf so heftig an, daß aufgrund der Verdunstungskälte der Rest des verdampfenden Wassers zu Eis gefriert.

findet sich zusätzlich zwischen den beiden Behältern ein Ventil, kann die Kälte- bzw. Wärmeerzeugung für unbegrenzt lange Zeit unterbrochen werden, ohne daß Energie verlorengeht.



Regeneration (2. Teilprozeß = Desorption):

Durch Zufuhr von Wärme hoher Temperatur wird das Wasser dampfförmig aus dem Zeolith »ausgeheizt« und anschließend verflüssigt.

Der erste Teilprozeß dieser diskontinuierlichen Energiewandlung läuft solange, bis der Zeolith mit Wasser gesättigt ist. Anschließend erfolgt in einem zweiten Teilprozeß durch Wärmezufuhr zum Zeolith eine Umkehrung: das Wasser wird dampfförmig aus dem Zeolith ausgeheizt, verflüssigt sich im Wasserbehälter und kann von dort im nächsten Schritt wieder angesaugt werden, dadurch verdampfen und somit Kälte

erzeugen. Die Teilprozesse sind beliebig oft wiederholbar.

In der Sorptionstechnik wird der aufsaugende Stoff als Sorbens und der aufgesaugte Stoff als Sorbat bezeichnet. Wenn es sich bei dem Sorbens um einen festen Stoff handelt, spricht man meist von Adsorption, bei einem flüssigen Stoff von Absorption.

Eine kontinuierliche Kälteerzeugung wird dann erreicht, wenn zwei oder mehrere solcher Sorptionsaggregate phasenversetzt betrieben werden. Die Regeneration kann mit elektrisch erzeugter Wärme oder – was energetisch besonders günstig ist – mit Wärme aus Verbrennungsprozessen erfolgen.

¹ »Sorption« von lat. *sorbere*: einziehen, hinunterschlucken, aufsaugen

Der Stoff Zeolith

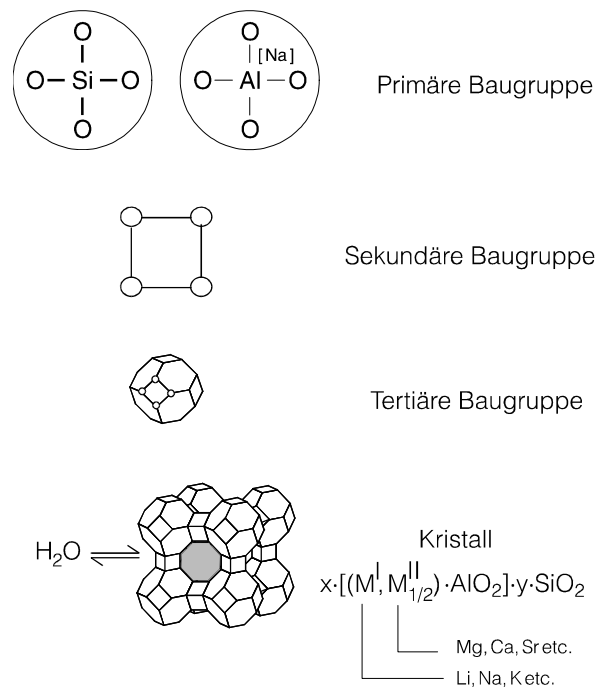
Namensgebung und Eigenschaften

Die Stoffbezeichnung »Zeolith« wurde im Jahre 1756 von dem schwedischen Amateur-Mineralogen Baron von Cronstedt geprägt. Er hatte festgestellt, daß bestimmte Mineralien beim Erhitzen sehr viel Wasser abgaben. Dieser Vorgang sah so aus, als ob die Mineralien siedeten. Er *nannte* sie daher »Siedesteine«, griechisch ζεολιθος »Zeolithe«. Dieser Name wurde inzwischen zu einer Sammelbezeichnung für kristalline Metall-Alumosilikate mit großer innerer Oberfläche von bis zu 1000 m²/g, starken elektrostatischen Feldern im Kristallgitter und einem spezifischen Schüttgewicht von ca. 0,8 kg/dm³. 1925 wurde erstmals an einem Zeolith die Trennung von Wasser- und Methanol-Molekülen beobachtet. Wegen dieses Trenn-Effektes (Siebwirkung) wurde später der Name »Molekularsieb« für die Zeolithe geprägt.

Zeolithe sind ungiftig, unbrennbar, kommen in großen Mengen in der Natur vor und sind daher a priori umweltverträglich. Es sind mehr als 40 natürliche und 100 synthetische Zeolithe bekannt. Die wichtigste Eigenschaft einiger Zeolithe besteht darin, reversibel dehydratisiert werden zu können. Sie unterliegen dabei selbst bei mehreren Tausend Zyklen keiner wesentlichen Strukturänderung des Gittergerüsts, solange Druck und Temperaturen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten.

Aufbau

Die primären Baugruppen aller Zeolith-Verbindungen sind SiO₄- und AlO₄-Tetraeder, die in nebenstehender Abbildung dargestellt sind. Letztere weisen jeweils eine negative Ladung im Gitter auf, die durch Metall-Kationen ausgeglichen werden muß. Durch Verknüpfen der primären Baugruppen ergeben sich sekundäre Baugruppen. Von diesen gibt es neun verschiedene, wovon die einfachste in der Abbildung dargestellt ist. Dabei entspricht eine Ecke eines Polygons jeweils einem SiO₄- bzw. AlO₄-Tetraeder. Mehrere sekundäre Baugruppen ordnen sich zu tertiären Baugruppen zusammen. In der Abbildung handelt es sich dabei um einen Kubo-Oktaeder. Wiederum mehrere tertiäre Baugruppen bilden, verbunden durch quaderförmig dargestellte Sauerstoffbrücken, einen Kristallkörper. Im Innern einer solchen Achtergruppe entsteht ein Hohlraum mit definiertem Porendurchmesser, der ein wesentlich größeres Volumen als der Kubo-Oktaeder aufweist. Die innere Oberfläche des in der Abbildung dargestellten Zeolith-Kristalls beträgt ca. 800 – 1200 m²/g, der Porendurchmesser ca. 4 Å und das spezifische Porenvolumen ungefähr 0,47 cm³/cm³. Die zum Ladungsausgleich der AlO₄- Tetraeder erforderlichen Kationen, die frei beweg-



Aufbau und Struktur des Zeolith A

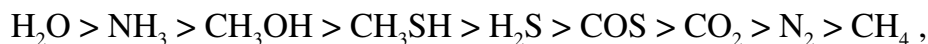
lich und in Lösung austauschbar sind, üben einen entscheidenden Einfluß auf die Zeolith-Eigenschaften aus. Durch Änderung der Kationengröße oder bei Ersatz der einwertigen durch mehrwertige Kationen werden die Querschnitte der Porenöffnungen verändert. Wird die Kationenbesetzung geändert, verschiebt sich die Ladungsverteilung innerhalb der zeolithischen Hohlräume. Dadurch bewirken Art und Lage der Kationen eine Veränderung der elektrostatischen Kräfte im Kristallgitter, wodurch das Adsorptionsverhalten des Zeoliths beeinflußt wird.

Physikalische Effekte

Wasserfreie Zeolithe sind hochselektive Adsorbentien für Moleküle, deren Querschnitte kleiner sind als die Porenöffnungen zu den Hohlräumen. Das Adsorptionsverhalten läßt sich auf drei wesentliche Eigenschaften der Zeolith-Kristalle zurückführen:

- ◆ große innere Adsorptionsoberflächen,
- ◆ hohe elektrostatische Adsorptionskräfte und
- ◆ den Molekularsiebeffekt, bewirkt durch das Vorhandensein von Zuführungsporen (mit definiertem Durchmesser) zu den Kristall-Hohlräumen.

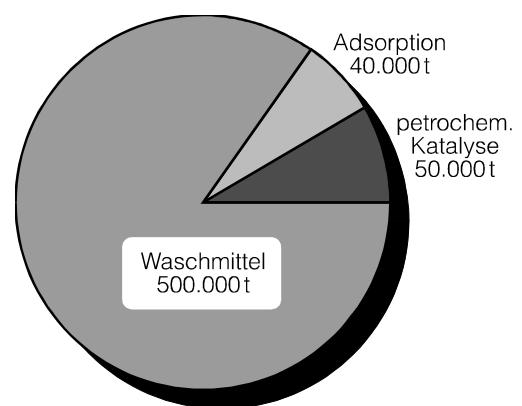
Infolge der hohen elektrostatischen Kräfte in den Zeolith-Hohlräumen werden polarisierbare Moleküle wie z.B. CO_2 und bevorzugt Moleküle mit einem Dipol- bzw. Quadrupolmoment adsorbiert. (Das Dipolmoment beschreibt das Verhalten eines Stoffes im elektrischen Feld, es ist das Produkt aus elektrischer Ladung und Abstand vom Ladungsschwerpunkt.) Folgende Reihe ordnet verschiedene Moleküle hinsichtlich ihrer Adsorptionsfähigkeit an Zeolith A:



worin das Wasser als wirkungsvollstes Sorbat ein Dipolmoment von 1,844 Debye (10^{-18} Coulomb · 1 cm) und das Ammoniak einen Wert von 1,46 Debye haben.

Anwendungen

Sehr groß ist die Anwendungsvielfalt für Zeolithe als Molekularsiebe, als Adsorbentien, als Katalysatoren bei Crackprozessen in der petrochemischen Industrie, als Papierfüllstoff und als Ionentauscher in Waschmitteln, was das größte Anwendungsfeld darstellt. In wäßriger Lösung machen Zeolithe das Wasser nämlich »weich«: sie geben Natrium-Kationen an das Wasser ab und nehmen Kalzium-Kationen aus dem Wasser auf, die die Wasserhärte verursachen. Nebenstehende Abbildung zeigt die weltweite Produktion des Jahres 1990. Sie betrug in der Summe fast 600.000 Tonnen, und es ist davon auszugehen, daß der weltweite Bedarf und damit die Produktion noch weiter zunehmen werden. Die Preise für den Waschmittelzeolith belaufen sich auf ca. 1,00 – 8,00 DM/kg, je nach Lieferzustand.



Zeolith-Weltproduktion 1990

Vorkommen und Herstellungsverfahren

Natürliche Zeolithe treten in den verschiedensten geologischen Schichten auf. Seit Mitte der 50er Jahre sind mehr als 100 verschiedene Zeolithtypen genau untersucht worden. Ihre Syntheseverfahren unterscheiden sich ebenso wie die Konzentration und die Art der

Ausgangsstoffe. So gibt es beispielsweise Verfahren, die über hydrothermale Umwandlungsreaktionen aus natürlichen Zeolithen den jeweils gewünschten Zeolithyp herstellen. Bei einem anderen großtechnischen Verfahren werden für den A-Typ die Ausgangssubstanzen Natriumsilikat, Tonerde und Natronlauge homogen gemischt und unter bestimmten Bedingungen in einem Kristallisationsbottich über mehrere Stunden zur Kristallisation geführt. Das dabei entstehende Kristallpulver wird von der Mutterlauge abfiltriert und gewaschen. Der einzelne Zeolithkristall wächst dabei lediglich zu einer Größe zwischen 0,1 und 25 μm . Dem Pulver werden dann spezielle Bindemittel wie Lehm, Kaolin etc. zugemischt, um es zu handelsüblichen Granulaten weiterverarbeiten zu können. Die Wahl des benutzten Bindemittels hängt dabei primär von der beabsichtigten Anwendung ab. Ihre Menge schwankt zwischen 10 und 25 Massen-Prozent, bezogen auf das Granulat. Daneben gibt es aber auch Granulate ohne Bindemittel. Bei diesen wird das Bindemittel in einem nachfolgenden Verfahren ebenfalls zu Zeolith umgewandelt.

Stabilität

Zeolithe entstehen u.a., wie oben ausgeführt, durch Kristallisation in einer wässrig-alkalischen Lösung bei Temperaturen unter 100 °C. Bereits hieraus ergibt sich, daß sie bei einem Absolutdruck von 1 bar und Temperaturen bis 100 °C stabil bleiben müssen. Bei höheren Temperaturen und Wasserdampfdrücken zeigen Zeolithe jedoch ein instabiles Verhalten. Bei diesen Strukturänderungen verkleinern sich sowohl die Hohlräume als auch die aktiven Oberflächen. Die Folge ist eine geringere Wasseraufnahmefähigkeit. Die Zeiträume, in denen derartige Umwandlungen eintreten, hängen von der jeweiligen Temperatur und dem Wasserdampfdruck ab.

Beladungsfelder des Stoffpaares Wasser/Zeolith

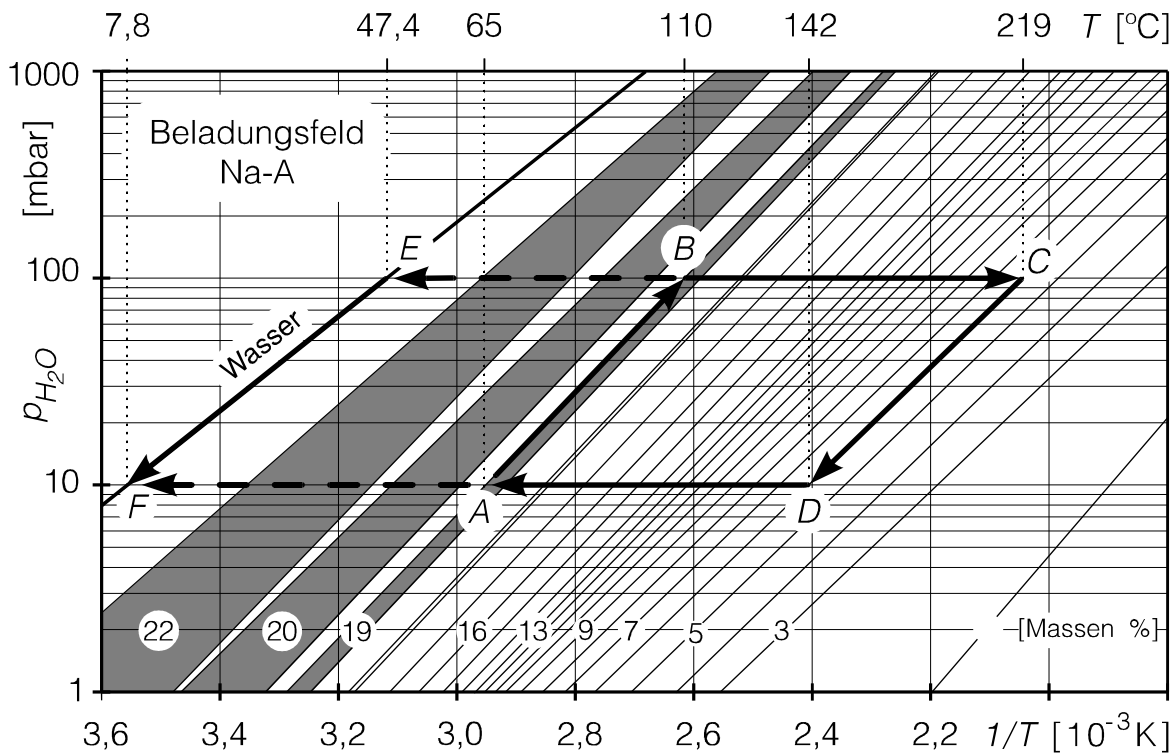
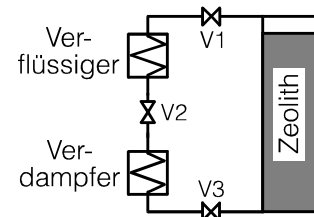
Das reale Verhalten verschiedener Zeolithtypen ist in Druck/Temperatur-Messungen ermittelt worden. Für den Zeolithyp Na-A zeigt die Abbildung auf der nächsten Seite das Ergebnis solcher Messungen. Auf der Abszisse wird der Kehrwert der (absoluten) Temperatur und auf der Ordinate der Wasserdampf-Partialdruck dargestellt. Zustände konstanten Wasseranteils ξ in einer Zeolithschüttung verlaufen bei einer solchen Darstellung auf minimal gekrümmten Linien, die fast Geraden sind. Diese Linien werden als Isosteren bezeichnet. Bei den wichtigsten für die Kälteerzeugung bzw. Wärmetransformation infrage kommenden Zeolithen sind die Krümmungsanteile der Isosteren so gering, daß sie vernachlässigt werden können und die Isosteren mit guter Näherung als einfache Geraden beschrieben werden können. Bemerkenswert sind in einem solchen Diagramm die grau schraffierten Felder. Es handelt sich dabei um Isosteren-Bereiche, in denen das Verhalten von Zeolith und Wasser nicht genau definiert ist. Die jeweils linke begrenzende Gerade beschreibt das Druck/Temperatur-Verhalten des Zeoliths für eine kurze, die rechte Linie für eine unendlich lange Zeit des Einwirkens von Wasser auf den Zeolith. Dieses hysteresische Verhalten spielt in der Praxis allerdings kaum eine Rolle, da die meisten Prozeßschritte »rechts« ablaufen.

Thermodynamik des Adsorptionsprozesses

Im folgenden wird beispielhaft ein idealer Sorptionsprozeß in einem Beladungsfeld dargestellt und schrittweise erläutert. Die Abbildung zeigt ein Schaltschema eines geschlossenen Sorptionsaggregates und ein Beladungsfeld mit dem Sorptionskreisprozeß. Das

Adsorptionsaggregat bestehe aus einem Zeolithbehälter mit integriertem Wärmetauscher, einem Verflüssiger, einem Verdampfer und drei Ventilen. Der Sorptionsprozeß in der betrachteten Anlage verläuft dabei im Unterdruckbereich von 10 bis 100 mbar in folgenden Phasen:

Aufheizphase (A – B): Der Zeolith habe den Ausgangszustand A, d.h. eine Temperatur von etwa 65 °C, einen Wasserdampf-Partialdruck von 10 mbar und eine Beladung von 19 %. Bei geschlossenen Ventilen V1 und V3 wird die Zeolithschüttung durch Wärmezufuhr von außen auf 110 °C erhitzt. Aus dem Zeolithbehälter kann kein Wasserdampf entweichen, die Bela-



Idealer Sorptionsprozeß-Verlauf

dung bleibt damit konstant. Im Isothermendiagramm entspricht dies einer Zustandsänderung vom Punkt A nach Punkt B auf der Isothermen der Beladung von 19 %. Der Dampfdruck im System beträgt nun 100 mbar.

Desorptionsphase (B – C): In dieser Phase des Prozesses wird das Ventil V1 geöffnet und bei konstantem Wasserdampfdruck von 100 mbar die Zeolithtemperatur durch weitere Wärmezufuhr von außen auf 219 °C erhöht. Die Beladung des Zeoliths sinkt dabei auf 6 % ab.

Verflüssigungsphase (E – F): Der Wasserdampf, der aus dem Zeolithbett ausgetrieben wird, strömt in den Verflüssiger und verflüssigt sich dort, beginnend in Punkt E. Bei geöffnetem Ventil V2 strömt das Wasser anschließend in den Verdampfer. Die Ventile V1 und V2 werden anschließend wieder geschlossen.

Abkühlphase (C – D): Durch Abkühlen des Zeoliths auf eine Temperatur von 142 °C entlang der Isothermen der Beladung 6 % sinkt der Druck im Zeolithbehälter wieder auf

10 mbar ab. Da die Ventile $V1$ und $V3$ geschlossen sind, bleibt die Zeolith-Beladung konstant bei 6 %.

Adsorptionsphase ($D - A$): Das Ventil $V3$ wird geöffnet, und die Zeolithschüttung adsorbiert Wasserdampf bei einem konstanten Druck von 10 mbar aus dem Verdampfer (Punkt F). Durch Wärmeentnahme kühlt sich das Zeolithbett entsprechend dem Isostenfeld entlang der Isobaren von D nach A ab. Dabei ändert sich die Beladung des Zeoliths von 6 auf 19 %. Die zur Verdampfung benötigte Phasenänderungswärme wird von außen dem Verdampfer zugeführt.

Damit ist ein Umlauf abgeschlossen, und der Kreisprozeß kann wieder von vorn beginnen. Wie gezeigt wurde, fallen drei theoretisch nutzbare Wärmeströme bei verschiedenen Temperaturniveaus an:

- ◆ Wärme am Verflüssiger in der Desorptionsphase,
- ◆ Wärme im Adsorber in der Adsorptionsphase und
- ◆ Kälte am Verdampfer in der Adsorptionsphase.

Der erforderliche Desorptions-Temperaturbereich liegt zwischen 150 °C und 300 °C; je höher die Desorptions-Endtemperatur ist, desto geringer ist die Restbeladung des Zeoliths und umso größer die bei der anschließenden Adsorption mögliche Wasseraufnahme.

Theoretische Leistungszahlen

Eine Berechnung für diesen theoretischen Ideal-Prozeß ergibt eine Kälteleistungszahl von $\zeta_K \geq 0,55$ und eine Heizleistungszahl von $\zeta_H \geq 1,5$. Diese Werte sind als theoretische Höchstgrenzen zu verstehen. Bei ausgeführten Aggregaten muß zusätzlich noch die Wärmekapazität der Wärmetauscher berücksichtigt werden. Außerdem treten Drosselverluste in den Wasserdampfleitungen und thermische Verluste aufgrund der Wärmeabstrahlung bei der Desorption auf, die auch noch einen reduzierenden Einfluß auf die Leistungsziffern haben.

Anwendungsmöglichkeiten

Der oben dargestellte Sorptionsprozeß mit dem Stoffpaar Wasser/Zeolith eignet sich besonders für Kühl- und Klimatisierungsaufgaben im Bereich des Nullpunktes und für Heizaufgaben im Temperaturbereich oberhalb von 50 °C. Als Anwendungsmöglichkeiten bieten sich an:

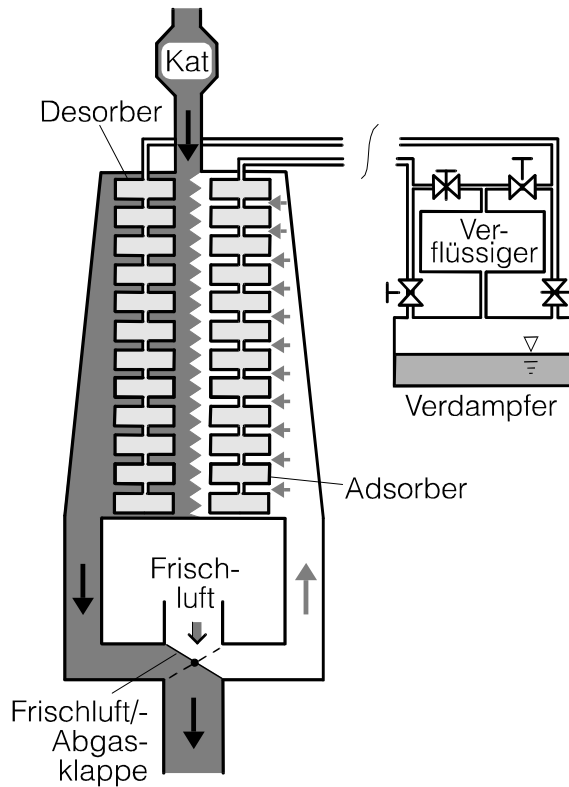
- ◆ Klimatisierung (Fahrzeuge, Wohnräume),
- ◆ Kühlung (Kühlschrank, Transportbehälter, etc.),
- ◆ Heizung (Warmwasser, Raumheizung, Prozeßwasser, etc.).

Im folgenden werden zuerst das technische Konzept einer abgasgetriebenen PKW-Klimaanlage und anschließend sich daraus ergebende ökologische Aspekte beschrieben.

2. Adsorptions-Klimaanlage

Die Wasser/Zeolith-Klimaanlage für PKW ist Gegenstand eines vom BMFT geförderten Forschungsprojekts.

Funktion



Prinzipskizze der Autoklimaanlage

Nebenstehende Abbildung zeigt die Prinzipskizze der Sorptions-Autoklimaanlage. Zwei in einem modifizierten Nachschalldämpfer untergebrachte Sorptionsaggregate mit 5,4 kg Zeolith arbeiten abwechselnd als Adsorber und Desorber. Dieser kombinierte Nachschalldämpfer ist im Abgasstrang eines PKWs stromabwärts vom Katalysator untergebracht.

Die Anlage wird motorseitig mit heißen Abgasen und auslaßseitig mittels eines Gebläses mit Frischluft beaufschlagt. Bei der im Bild dargestellten Klappenstellung wird die kalte Gebläseluft durch die in dieser Phase als Adsorber wirkende Anlagenkomponente gefördert, wobei der Adsorber abgekühlt wird. Zusammen mit den Abgasen strömt die vorgewärmte Luft durch den Desorber und nach Abgabe der Desorptionswärme ins Freie. Bei Erreichen einer Desorptions-Endtemperatur von ca. 200 °C wird die Frischluft/Abgas-Klappe (pneumatisch) umgeschaltet, wodurch die beiden Einheiten ihre Funktionen vertauschen. Die

Frischlucht kühlt nun das noch heiße Aggregat, das dadurch schneller das Adsorptions-Temperaturniveau erreicht, und vermischt sich dann mit den heißen Abgasen und so weiter. Die für die Klimatisierung benötigte Verdampfungsenthalpie wird dem Wasser im Verdampfer entzogen, dieser kühlt sich ab und kühlt über einen Wärmetauscherkreislauf das Fahrzeuginnere des PKWs. Die Ventile in der Kälteeinheit werden pneumatisch im Takt des Umschaltens der beiden Aggregate betätigt.

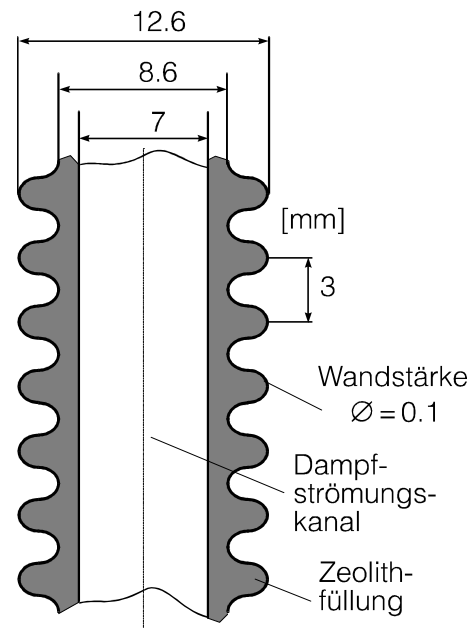
Stand-Klimatisierung

Im realen Betrieb wird die Klimaanlage im Normalfall mit dem Motor abgestellt und die Ventile geschlossen, so daß kein Wasserdampf vom Zeolith adsorbiert werden kann, die Kälteenergie also gespeichert ist. So kann auch zu Betriebsbeginn Kälte lediglich durch das Öffnen der Ventile »erzeugt« und das Fahrzeug ohne laufenden Verbrennungsmotor gekühlt werden. Nur wenn die Klimaanlage nach Abstellen des Motors solange betrieben wird, bis beide Zeolithbetten vollkommen gesättigt sind, muß eine gewisse Anlaufzeit vor dem nächsten Kühlprozeß in Kauf genommen werden.

Wärmetauscher

Zeolithe haben eine so geringe Wärmeleitfähigkeit, daß sie sogar als Isolierstoff eingesetzt werden könnten. Bei schnellen Adsorptions/Desorptions-Prozessen sollten die Zeolith-Bereiche eine Desorptions-Endtemperatur von ungefähr 200 °C innerhalb von möglichst kurzer Zeit erreichen. Die geringe Wärmeleitfähigkeit setzt daher einer möglichen Zeolithschicht-Dicke enge Grenzen. Versuche mit unterschiedlichen Adsorbentien haben ergeben, daß für Zyklen-Zeiten von ca. 10 Minuten die Zeolithschicht nicht stärker als 2 – 3 mm sein sollte. Hinzu kommt, daß die Wasserdampf-Strömungsgeschwindigkeit nach Erfahrungswerten ungefähr 100 m/s nicht übersteigen sollte. Es müssen also Wärmetauscher mit ausreichend großen Querschnitten für den hin- und herströmenden Wasserdampf vorgesehen werden. Bei den Randbedingungen müssen die in den Sorptionsaggregaten installierten Wärmetauscher genügen.

In der Abbildung ist ein Längsschnitt durch einen als Wärmetauscher eingesetzten Metallwellschlauch wiedergegeben. Seine Innenwände sind so mit Zeolith ausgekleidet, daß der Dampfströmungskanal einen Durchmesser von ungefähr 7 mm aufweist. Aufgrund der geringen Wandstärke von 0,1 mm des Wellschlauches und seiner daraus resultierenden geringen Wärmekapazität ist ein relativ schneller Wärmetransport in der Zeolith-Schüttung möglich und die Bewegung des Wasserdampfes von und zu den großen inneren Oberflächen unbehindert. Derartige Wärmetauscher werden bei der Pkw-Klimaanlage verwendet.



Wellschlauch-Wärmetauscher

Erprobung

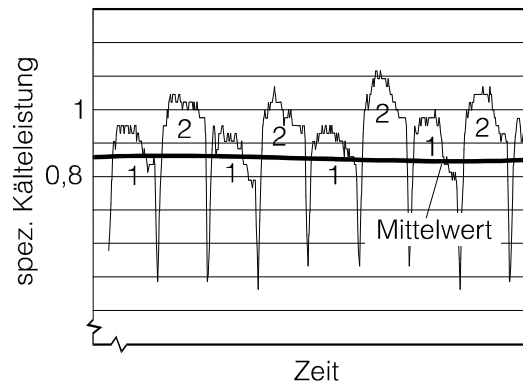
Auf einem Prüfstand wurden die heißen Verbrennungsabgase durch ein Gebläse und einen elektrischen Luftherhitzer ersetzt. Die zum Erhitzen der Umgebungsluft benötigte Leistungsaufnahme konnte gemessen und damit die zum Betrieb der Anlage nötige Wärmemenge im Abgas ermittelt werden. Während der Versuche wurden Verdampfer-temperatur, Zykluszeit, Temperaturen und Volumina von Heiß- und Frischluft sowie die Ventilstellzeiten variiert.

Kälteleistungsverlauf

Die Kälteleistung wird – wie oben ausgeführt – abwechselnd von den beiden Aggregaten »erzeugt«. Während des Umschaltprozesses sind kurzzeitig beide Ventile geschlossen, das vorherige Adsorber-Aggregat adsorbiert nicht mehr, und das vorherige Desorber-Aggregat adsorbiert noch nicht. Während dieser Zeit, die ca. 15 Sekunden dauert, erfolgt keine Verdampfung, wird also auch keine Kälte »erzeugt«. Es findet ein geringer Kälteleistungseinbruch statt, der im Normalfall vom Eispeicher, der sich im Verdampfer aufgebaut hat, kompensiert wird.

Nebenstehende Abbildung zeigt das im System enthaltene Potential. Dargestellt ist ein typischer Verlauf der Kälteleistung über der Zeit. Beim Umschalten erfolgt kurzzeitig ein Einbruch der Leistung, der den zeitlichen Mittelwert auf ca. 85 % des Maximalwertes begrenzt. Weiter zeigt sich, daß die beiden Adsorber – deren Kurven hier mit »1« und »2« bezeichnet sind – geringfügig in der »erzeugten« Kälteleistung differieren.

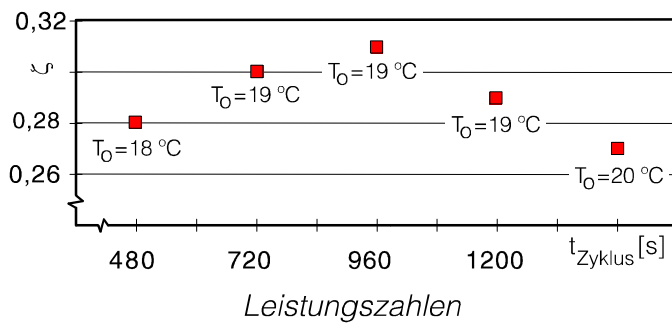
Die insgesamt erzielte Kälteleistung könnte höher sein, wenn die Einbrüche während der Umschaltphasen verringert und wenn beide Adsorber gleich gut arbeiten würden.



Kälteleistungsverlauf

Leistungszahlen

Bei dem ersten Prototyp zeigte sich, wie in der Abbildung dargestellt, bei hohen Verdampfungstemperaturen eine mäßige Abhängigkeit der »erzeugten« Kälteleistung von



Verdampfer- und Zykluszeit. Durch eine Einschränkung des Heißluftvolumenstroms zu Beginn des Halbzyklus' und eine ebensolche des Frischluftvolumenstroms gegen Ende des Halbzyklus' stellte sich eine maximale Leistungszahl von 0,31 bei einer Zykluszeit von 960 s ein. Dieses erste Optimum ist natürlich von sehr vielen weiteren hier nicht unter-

suchten Parametern wie Konstruktion, Material, Zeolithart, Temperaturniveaus etc. abhängig und stellt nur einen Ausgangswert dar, der in Zukunft noch gesteigert werden wird.

Prozeßdarstellung im Beladungsfeld

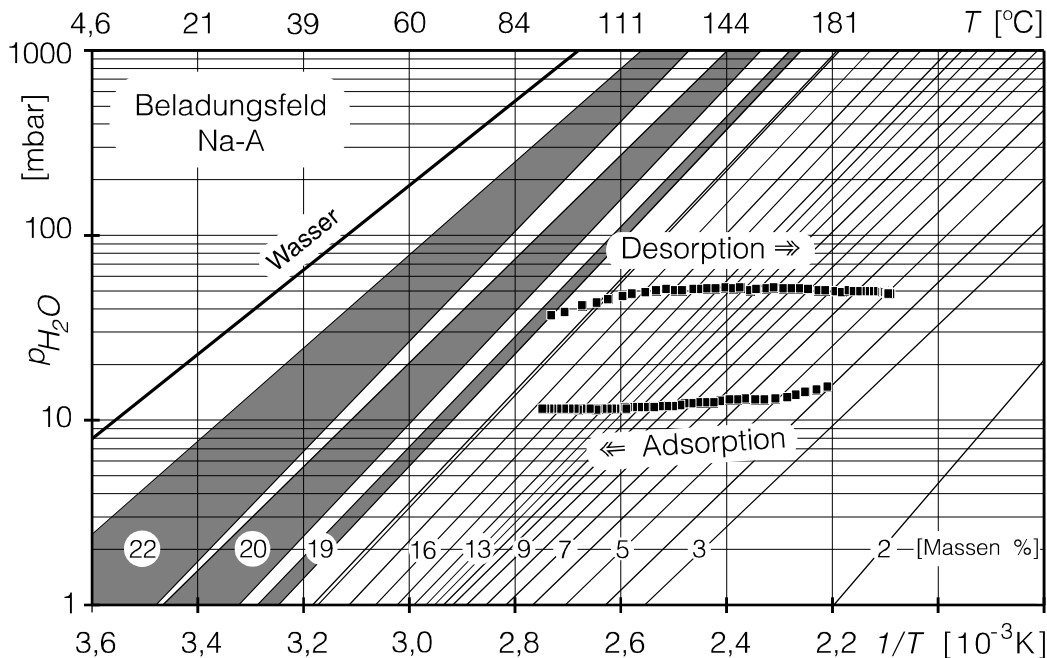
Von entscheidender Bedeutung für die Leistungszahl eines Adsorptions-Prozesses ist die durchgeführte Beladungsdifferenz zwischen Adsorption und Desorption, die sogenannte *Beladungsbreite*. Diese könnte anhand des Beladungsfeldes durch eine Druckmessung innerhalb der Zeolithschüttung bestimmt werden. Allerdings ist der dazu erforderliche meßtechnische Aufwand sehr groß und die erzielbare Genauigkeit nicht ausreichend, so daß es nicht sinnvoll ist, die Beladungsbreite durch eine Druckmessung zu ermitteln.

Ausgehend von der Vorstellung, daß während der Adsorption im Verdampfer und in der Zeolithschüttung und während der Desorption im Verflüssiger und in der Zeolithschüttung gleiche Drücke herrschen und unter der Voraussetzung, daß bei einem geschlossenen, evakuierten Aggregat das enthaltene Wasser immer in zwei Phasen vorliegt, können die Drücke aus der Kenntnis der jeweiligen Temperaturen berechnet werden. Den Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Dampfdruck liefert die sogenannte Antoine-Gleichung.

Folgende Abbildung zeigt – im Vergleich zu dem oben abgebildeten idealen Verlauf – das Ergebnis einer solchen Berechnung, nämlich den realen Prozeßverlauf eines Ad-

sorptions/Desorptions-Zyklus'. Die Darstellung entspricht den Zuständen am gewählten Meßpunkt. Von Meßpunkt zu Meßpunkt stellen sich verschiedene Verläufe ein.

Während des Wechsels von Adsorption zu Desorption in einem Zeolithbett sind die Ventile zu Verflüssiger und Verdampfer geschlossen. Innerhalb dieser Zeitspanne von ca. 15 s können die Druckverhältnisse am Meßpunkt nicht berechnet werden. Deshalb wird der reale Zyklus nicht geschlossen dargestellt.



Realer Sorptionsprozeß-Verlauf

Das Diagramm zeigt zwei Punktscharen zwischen ca. 10 und 50 mbar. Die Punkte, die fast einen geschlossenen Linienverlauf ergeben, stellen den Druckverlauf während der Adsorption und der Desorption dar, wobei die Abstände zwischen zwei Punkten ein Maß für die Geschwindigkeit der Zustandsänderung sind. Die diesen Punkten zugrundeliegenden Meßwerte wurden mit konstanter Abtastrate erfaßt.

Es zeigt sich, daß der Prozeß mit einer hohen Beladungsbreite von ca. 15 % gefahren wurde, die bei einer Erhöhung der Desorptions-Endtemperatur noch gesteigert werden könnte. Des weiteren zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung der Adsorptions- und Desorptionsverläufe zwischen idealem und realem Prozeß. Auslegungsrechnungen, die der Konstruktion vorangingen, und die Meßergebnisse hinsichtlich der Leistungszahl und der Beladungsbreite stimmen sehr gut miteinander überein.

Ergebnisse: Erprobung

Die Adsorptionsklimaanlage mit dem Stoffpaar Wasser/Zeolith hat in ersten Versuchen ihre prinzipielle Funktionsfähigkeit gezeigt. Die angestrebte Leistungszahl von 0,3 konnte erreicht werden. Das erste untersuchte Aggregat baut in der vorhandenen Ausführung selbstverständlich noch zu groß; das Potential für eine erhebliche Reduzierung von Masse und Volumen ist gegeben.

Ökologische Aspekte

Die technische Funktionsfähigkeit ist jedoch nicht das einzige Kriterium für eine Autoklimaanlage. Ein im Anschluß daran sehr bedeutendes Beurteilungskriterium ist die Umweltverträglichkeit, und zwar bei der Rohstoffgewinnung, der Herstellung, der Anwendung und der Entsorgung. Der wohl wichtigste Aspekt daraus ist der Energieverbrauch zukünftiger Autoklimaanlagen und aufgrund der damit verbundenen CO₂-Emission der bewirkte Beitrag zum Treibhauseffekt.

Beitrag zum Treibhauseffekt

Die zum Antrieb der Wasser/Zeolith-Autoklimaanlage benötigte Energie wird im Normalfall durch die im Abgas des Verbrennungsmotors enthaltene Rest-Energie zur Verfügung gestellt. Lediglich eine elektrische Leistung von ca. 125 W zum Betrieb eines Umluftgebläses muß zusätzlich aufgebracht werden. Es gibt allerdings Betriebszustände eines Fahrzeuges, in denen die im Abgas enthaltene Energie nicht ausreicht, den Sorptionsprozeß anzutreiben. Das ist zum Beispiel im städtischen Stop-and-Go-Verkehr der Fall oder bei extrem langsamer Fahrt in einem Stau. Für einen solchen Fall ist vorgesehen, die fehlende Antriebsenergie für das Sorptionsaggregat über die heißen Abgase einer kleinen, handelsüblichen PKW-Standheizung zuzuführen. Der sich für diese Betriebszustände dann doch einstellende Kraftstoff-Mehrverbrauch ist gegenüber dem einer konventionellen Klimaanlage gering.

Herkömmliche Autoklimaanlagen verursachen aufgrund des Kraftstoffmehrverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emission einen *indirekten* Beitrag zum Treibhauseffekt. Da Kompressions-Klimaanlagen konstruktionsbedingt nicht leakagefrei sind und das zukünftig verwendete Alternativ-Kältemittel R 134a treibhauswirksam ist, ergibt sich zusätzlich zum indirekten ein *direkter* Treibhauseffekt, der als CO₂-Äquivalent angegeben werden kann.

Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Autoklimaanlagen werden im folgenden CO₂-Äquivalente einer herkömmlichen R134a- und einer Wasser/Zeolith-Autoklimaanlage bestimmt und miteinander verglichen. Zusätzlich wird noch die gleiche Betrachtung für eine mit R 12 betriebene Kompressor-Klimaanlage vorgenommen, jedoch nicht weiter kommentiert.

Randbedingungen für eine Kompressor-Klimaanlage

Bei einer zehnjährigen Betrachtungszeit ist erfahrungsgemäß unter *günstigsten* Bedingungen mit mindestens 2 erforderlichen Neubefüllungen der Anlage zu rechnen¹. Dabei wird zusätzlich vorausgesetzt, daß bei Stilllegung des Fahrzeugs eine nahezu vollständige Entsorgung des Kältemittels und des Kältemaschinenöls erfolgt. Die mechanische Leistungsaufnahme einer Klimaanlage beträgt durchschnittlich 3 kW. Bei einem ebenfalls *günstig* angenommenen Motorwirkungsgrad von 25 % beträgt damit die primäre Leistungsaufnahme 12 kW und die spezifische CO₂-Emission bei motorischer Verbrennung 0,29 kg/kWh. Erfahrungsgemäß werden Autoklimaanlagen im weltweiten Durchschnitt jährlich ca. 200 Stunden betrieben, in Europa sehr viel weniger. Bei der Bestimmung des direkten Beitrags einer Kompressor-Anlage zum Treibhauseffekt wird für einen Zeithori-

¹ Kruse, H., »Der Kaltgasprozeß als Alternativtechnologie«, Internationale Konferenz Berlin 1992: Alternativen zu FCKW und Halonen – Technologien und Ersatzstoffe

zont von 20 Jahren¹ von einem relativen Treibhauspotential des R 134a von 3200 und für das R 12 von 7100 bezogen auf CO₂ ausgegangen².

Randbedingungen für eine Sorptions-Klimaanlage

Betrachtungsdauer und Betriebszeit entsprechen den oben genannten Werten der mit R134a betriebenen Klimaanlage. Auch Anlagengewicht und bereitgestellte Kälteleistung der beiden Aggregate seien gleich. Das Wasser/Zeolith-Klimaaggregat hat einen mittleren thermischen Leistungsbedarf von 10 kW. Es sei davon ausgegangen, daß während 30 % der Betriebszeit die Abgasleistung des Verbrennungsmotors nicht ausreicht, so daß über den Standheizungs Brenner nachgeheizt werden muß. Für ein Umluftgebläse werden 125 W elektrische Antriebsleistung benötigt. Bei einem Motor-Wirkungsgrad von 25 % ergibt sich damit eine aufzubringende Primärleistung von 500 W.

Gesamt-CO₂-Äquivalente

Für eine R134a-Klimaanlage ergibt sich – wie im folgenden Bild dargestellt – ein CO₂-Äquivalent von 16560 kg. Davon sind 58 % auf den direkten Treibhauseffekt durch Kältemittelleckagen zurückzuführen. Die verbleibenden 42 % ergeben sich aus dem Energieverbrauch während der Gebrauchsphase. Energieverbrauch für Herstellung und Entsorgung der Anlage sowie bei der Demontage der Anlage freiwerdendes Kältemittel wurden bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Bei einer Wasser/Zeolith-Anlage bewirken Betriebsstoffemissionen keinen Treibhauseffekt. Das Gesamt-CO₂-Äquivalent ergibt sich somit nur aus dem Energieverbrauch während des Betriebs der Anlage. Für den ungünstigsten Betriebsfall, in dem die Anlage nicht mit Abgasen, sondern nur durch den Zusatzbrenner betrieben würde, beträgt das CO₂-Äquivalent nur 36 % dessen für die R134a-Anlage. Realistisch ist eine relative Nutzungsdauer des Brenners von 30 %. In diesem Fall liegt das CO₂-Äquivalent der Wasser/Zeolith-Anlage bei 11 % des errechneten Wertes für eine R134a-Anlage. Wird die Wasser/Zeolith-Klimaanlage allerdings vollständig durch Abgase betrieben, ist das CO₂-Äquivalent nahezu Null.

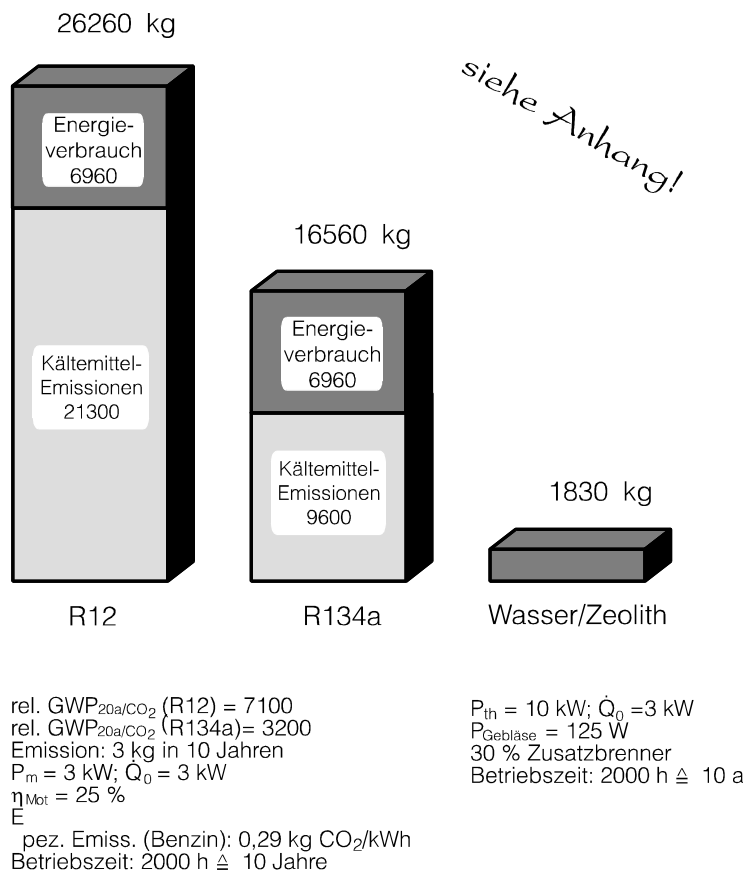
Anmerkung: Die hier zugrundegelegten Leistungszahlen basieren auf den ersten im Rahmen des BMFT-Projektes gewonnenen Ergebnissen. Nach einer ähnlich intensiven Entwicklungsgeschichte, wie sie die Kaltdampfkompresseionsmaschine mit allen ihren Komponenten durchlaufen hat (ca. 60 Jahre), kann für die Sorptions-Technologie ebenfalls eine bessere Effizienz erreicht werden.

¹ Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein, DKV-aktuell, 1991: Ausgehend von einer bis 1991 üblichen Betrachtungsweise eines Zeithorizonts von 500 Jahren in bezug auf die Treibhauswirksamkeit von FCKW-Ersatzstoffen veröffentlicht der DKV: *Das Umweltbundesamt stützt sich nun – in Übereinstimmung mit einer mittlerweile weltweit dominierenden Meinung – auf einen kürzeren Horizont von etwa 20 Jahren. Hintergrund dieser veränderten Wertung ist die plausible Überlegung, daß die über die ersten Jahrzehnte wirksamen Folgen das Erdklima in naher Zukunft einschneidend beeinflussen, hingegen die über mehrere Jahrhunderte wirksamen Folgen in ihrer Auswirkung von so vielen Unwägbarkeiten beeinflußt werden, daß ihre Wirkung nachrangig wird.*

² Die betrachteten Zeithorizonte bei der Beurteilung der relativen Treibhauswirksamkeit von R 134 a sind Gegenstand vielfacher Diskussionen. Am 3. – 4.12.1992 fand in Bonn vor der Bundestags-Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt« eine Sachverständigen-Anhörung zum Thema »Ökobilanz/Produktlinienanalyse am Beispiel des FCKW-Ersatzstoffes R 134 a und anderer Ersatzstoffe bzw. -technologien statt. Dabei wurde vom Mainzer Max-Planck-Institut für Chemie, Abteilung »Chemie der Atmosphäre« (Dr. Chr. Brühl) gefordert, daß *man bei der Beurteilung von R 134 a Integrationszeiten von 10 und 20 Jahren heranziehen sollte.*

Ergebnisse: Ökologische Aspekte

Hinsichtlich des Gesamt-CO₂- Äquivalents für eine zehnjährige Betriebszeit einer Sorptions-Klimaanlage ergeben sich deutliche Vorteile im Vergleich zu einer herkömmlichen mit R 134 a betriebenen Kompressor-Klimaanlage.



Gesamt-CO₂-Äquivalent von PKW-Klimaanlagen

Ähnliche Vorteile ergeben sich auch bei der Rohstoffgewinnung, der Herstellung und der Entsorgung nach Ablauf der Lebensdauer:

- Die Herstellung von Zeolith A ist ein Kreislaufverfahren, das keinerlei Nebenprodukte hervorbringt und für das nur die drei Rohstoffe Sand, Natronlauge und Aluminiumhydroxid benötigt werden. Hilfs- und Betriebsstoffe sind lediglich Wasser und Heizdampf in einem Niedrigenergieprozeß.
- Der Gesamt-Energieaufwand für die Herstellung des Materials und die Fertigung des Aggregates ergibt sich zu ca. 100 kWh. Das entspricht bei Verwendung elektrischer Energie einem CO₂-Äquivalent¹ von ca. 46 kg. Dieses Herstellungs-Äquivalent ist im Vergleich zum Verbrauchs-Äquivalent vernachlässigbar gering².

- Über die Einbringung von Zeolith in die Umwelt haben sich im Vorfeld des Einsatzes als Phosphatersatz in Waschmitteln bereits das Umweltbundesamt und das Bundes-Umweltministerium positiv geäußert³.

Adsorptionsklimaanlage: Zusammenfassung und Ausblick

¹ Das mittlere CO₂-Äquivalent der europäischen Kraftwerke beträgt 0,46 kg CO₂/kWh(el), Quelle: Degussa, »Vakuum-Isolations-Panels – Versuch einer Ökobilanz, Auswirkungen auf Ökologie und Ökonomie von Kältegeräten«, 1992

² DEUTSCHER BUNDESTAG, Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt«, 3.-4.12.92, Bonn, Kommissionsdrucksache 12/6b, Zeo-Tech GmbH

³ »Die Prüfung des Umweltverhaltens von Natrium-Aluminium-Silikat Zeolith A als Phosphatersatz in Wasch- und Reinigungsmitteln«, Hrsg. Umweltbundesamt, E. Schmidt Verlag, Berlin 1979; »Stellungnahme zur Verwendung phosphatfreier Waschmittel«, Information des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, März 1992. Zitiert nach DEUTSCHER BUNDESTAG, Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt«, Kommissionsdrucksache 12/6b, Degussa AG

Im bisherigen Verlauf des BMFT-Forschungsprojektes hat die Wasser/Zeolith-Autoklimaanlage ihre prinzipielle Funktionsfähigkeit und ein hohes Maß an Umweltverträglichkeit unter Beweis gestellt. Aufgrund der relativ geringen Entwicklungszeit von noch nicht einmal zwei Jahren stellt sie noch keine Lösung für morgen, sondern erst eine für übermorgen dar.

Durch Verwendung verbesserter Wärmetauscher, durch den Einsatz neuer, speziell entwickelter Zeolithtypen und durch eine optimierte Prozeßführung kann die spezifische Leistung der Sorptionsaggregate in nennenswertem Umfang gesteigert werden. Bei Verwendung eines rotierenden Systems, das aus vielen einzelnen Klein-Sorptionsaggregaten besteht, ist es sogar möglich, auf die bisherige Kälteeinheit mit Verdampfer, Leitungssystem und Ventilen zu verzichten.

3. Heiz- und Klimaanlage für Elektrofahrzeuge

Die Belastung der Luft mit Schadstoffen aus Verbrennungsprozessen führt in Verkehrsbaukonzentrationen in Verbindung mit klimatischen und photochemischen Prozessen u. a. zu Smog- und Ozonbildung. Smog und Ozon bewirken erhebliche Belastungen der menschlichen Gesundheit. Diese Probleme sind im letzten Jahrzehnt in besonderem Umfang in Amerika im Großraum Los Angeles aufgetreten. In einer 1990 durchgeführten Novellierung des »US Clean Air Acts« (Gesetz zur Reinhaltung der Luft) wird versucht, durch Begrenzung der Schadstoffemissionen die Luftqualität zu verbessern. In Kalifornien ist mit der stufenweisen Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Automobile die Einführung emissionsloser Fahrzeuge, sogenannter »Zero Emission Vehicles« (ZEV), in der Zeitspanne von 1993 bis 2003 verbunden. So müssen dort 1998 schon 2 % und im Jahre 2003 bereits 10 % der verkauften Neuwagen emissionsfrei sein. Zur Erfüllung dieser Forderung eignen sich nach heutigem Stand der Technik nur Elektrofahrzeuge.

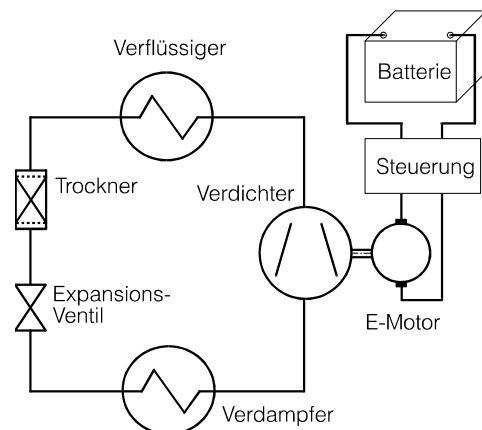
In absehbarer Zeit wird es also einen wirtschaftlich bedeutenden Markt an Elektrofahrzeugen geben, ungeachtet der mäßigen Gesamt-Energiebilanz und der weiterhin – allerdings an einem anderen Ort – anfallenden Schadstoff-Emissionen bei der »Energieerzeugung«. Aller Voraussicht nach wird sich diese politisch initiierte Entwicklung nicht nur auf Amerika beschränken, sondern im Laufe der nächsten Jahrzehnte weltweit in allen großen Ballungsräumen zum Tragen kommen.

Die meiste der nächsten Jahrzehnte weltweit in allen großen Ballungsräumen zum Tragen kommen. Die Automobilhersteller entwickeln daher – oft schon seit einigen Jahren – komplette Elektrofahrzeuge, Batterie- und Antriebssysteme. Geringe Beachtung fanden dabei bisher Heiz- und Klimaanlage, bei denen die Energieversorgung ein besonderes Problem darstellt. Im folgenden wird daher der Stand der Heiz- und Klimatechnik von Elektrofahrzeugen sowie der dazugehörige Stand der Probleme dargestellt, und im Anschluß daran wird eine kombinierte Heiz- und Klima-Sorptionsanlage mit dem Stoffpaar Wasser/Zeolith vorgestellt.

Stand der Technik

Elektrisch angetriebene Kompressor-Klimaanlage

Aufbauend auf den Erfahrungen mit der Kompressionstechnik, bietet es sich an, Elektroauto-Klimaanlagen in hermetisierter Bauweise auszuführen und diese elektrisch anzutreiben. Die benötigte Antriebsenergie wird der Fahrbatterie entnommen, wodurch sich allerdings die Reichweite des Elektroautos bei Betrieb der Klimaanlage merklich reduziert – sofern die Batteriekapazität nicht vergrößert wird. Das Kältemittel der Wahl ist dabei R 134 a. Nebenstehende Abbildung zeigt das Schaltschema einer solchen Klimaanlage.

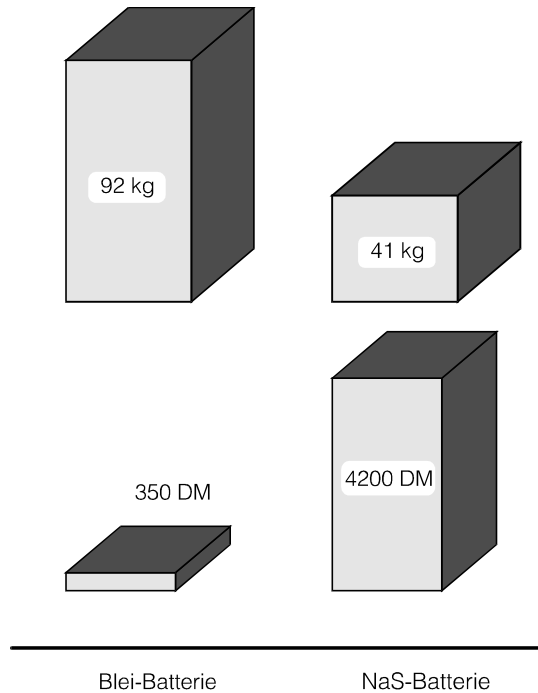


Elektrofahrzeug-Klimaanlage

Die Kosten für eine solche Klimaanlage liegen mit Sicherheit über denen einer via Keilriemen angetriebenen herkömmlichen Anlage. Das hat seine Gründe darin, daß Elektromo-

tor und Steuerung zusätzlich benötigt werden und sich außerdem die Entwicklungskosten für ein solches System bei den relativ geringen zu erwartenden Stückzahlen überproportional im Preis niederschlagen müssen.

Die zur Zeit mögliche Reichweite von Elektroautos liegt bei Hochenergiebatterien zwischen 100 und 150 km und bei herkömmlichen Bleibatterien wesentlich unter 100 km. Da dem Kunden eine Reduzierung dieser geringen Reichweite nicht zugemutet werden kann, ist es erforderlich, für den Klimaanlagen-Betrieb zusätzliche Batteriekapazität vorzusehen. Im folgenden soll daher den Fragen nachgegangen werden, welche zusätzlichen Kosten dabei entstehen und in welchem Umfang sich das Batterie- und damit auch das Fahrzeuggewicht erhöht¹.



Kosten und Massen von Batteriesystemen für die Elektroautoklimatisierung

Die Abbildung zeigt das Ergebnis der aufgrund der Randbedingungen vorgenommenen Berechnung. Bei Verwendung einer Bleibatterie fallen bei einem Mehrgewicht von 92 kg Kosten in Höhe von DM 350,- an; der Klimaanlagenbetrieb mit dieser Batterie ist also bei einem hohen Mehrgewicht mit moderaten Kosten verbunden. Dieses Mehrgewicht muß im Fahrbetrieb beschleunigt und verzögert werden und erfordert damit einen höheren energetischen Aufwand, reduziert also Fahrleistungen und Reichweite. Bei der NaS-Batterie stellen sich die Verhältnisse ganz anders dar. Drastische Mehrkosten von 4200,- DM stehen einem mäßigen Mehrgewicht von 41 kg gegenüber.

Einer geringen Beeinträchtigung der Fahrleistungen stehen in diesem Fall nahezu unverträglich hohe Kosten gegenüber.

Heizung

Das Beheizen von Elektrofahrzeugen stellt ein großes Problem dar. Eine elektrische Heizung verbietet sich wegen des hohen Leistungsbedarfs und damit reduzierter Fahrleistungen und Reichweite von selbst. Die zur Zeit einzige Alternative ist eine handelsübliche PKW-Standheizung – die natürlich mit Benzin, Diesel oder Gas betrieben werden muß. Eine solche Anlage erhitzt kalte Luft und bläst diese durch die Fahrgastzelle. Dazu muß ein erheblicher Aufwand getrieben werden. Zusätzlich zum Brenner sind erforderlich ein Kraftstofftank mit Leitungen und eine Pumpe. Beim Betrieb fallen Emissionen an. Und das widerspricht der Idee des »Zero Emission Vehicles«, des abgasfreien Autos. Eine

¹ Die Berechnung geht von folgenden Randbedingungen aus: Es sei eine Kälteleistung von 2,5 kW für einen kontinuierlichen Betrieb von 1 Stunde benötigt. Der Elektromotor habe einen Wirkungsgrad von 85 % und die Steuerung von 90 %. Die Kälteleistungszahl des hermetischen Aggregates betrage 1,6 und die Masse ca. 15 kg. Bei der Wahl der Batterie seien zwei mögliche Varianten untersucht: eine normale Blei-Traktionsbatterie und eine Natrium/Schwefel Hochenergiebatterie. Die Bleibatterie habe eine mittlere Energiedichte von 26,5 Wh/kg bei spezifischen Kosten von 174 DM/kWh; die NaS-Batterie eine mittlere Energiedichte von 80 Wh/kg bei spezifischen Kosten von 2043 DM/kWh.

solche Lösung kann daher höchstens für eine Übergangszeit eingesetzt werden. Langfristig muß nach wirklich emissionsfreien Systemen gesucht werden.

Zwischenergebnis

Weder eine elektrisch angetriebene Kompressor-Klimaanlage noch eine Standheizung scheinen geeignet, das Problem des Klimatisierens und Heizens von Elektrofahrzeugen lösen zu können. Hohe Kosten bzw. hohes Mehrgewicht einerseits und unerwünschte Emissionen andererseits stehen dem entgegen.

Sorptionsspeicher-System mit Wasser/Zeolith

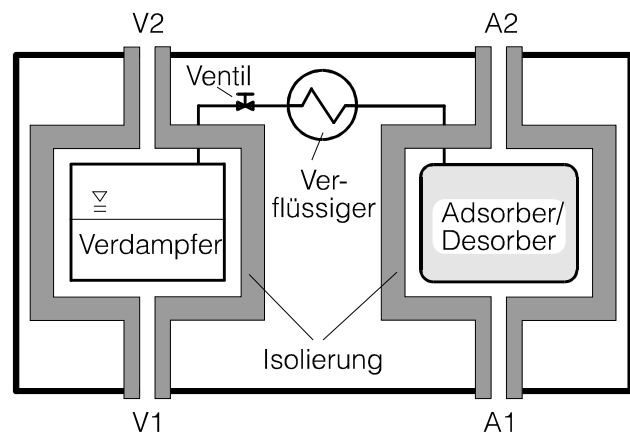
Ein Sorptionsaggregat mit dem Stoffpaar Wasser/Zeolith bietet sich als kombiniertes Heiz- und Klimagerät für Elektrofahrzeuge an. Die Adsorptionswärme kann im Winter genutzt werden, um die Fahrgastzelle zu beheizen, und die vom Verdampfer aufgenommene Wärme kann im Sommer der warmen Luft aus der Fahrgastzelle oder der Außenluft entzogen werden.

Die Abbildung zeigt die Verschaltung der einzelnen Komponenten des Aggregates. Verdampfer und Adsorber/Desorber sind thermisch isoliert. Zwischen ihnen befindet sich ein elektromagnetisch betätigtes Ventil, das zum Starten des Prozesses nur geöffnet werden muß, und der Verflüssiger. Im Kühlbetrieb wird Frischluft mittels eines Gebläses am Verdampfer vorbeigeleitet, kühlt sich dabei ab und gelangt dann in die Fahrgastzelle. Die gleichzeitig im Adsorber entstehende Adsorptionswärme wird ins Freie geleitet. Im Heizbetrieb wird jene Wärme genutzt, um die ebenfalls mittels Gebläse vorbeistreichende Luft zu erwärmen, die dann in die Fahrgastzelle geleitet wird. Der Verdampfer kann dabei einfrieren. Eine kritische Volumenänderung während der Eisbildung ist nicht zu befürchten, da die Abdampftrate selbst bei durchgefrorener Oberfläche (Sublimation) so groß ist, daß dadurch die Volumenänderung sogar überkompensiert wird.

Die Desorption – die Speicherung der Energie – erfolgt elektrisch, und zwar parallel zum Laden der Fahrbatterie. Nach Erreichen der Desorptionsendtemperatur wird die elektrische Heizung ausgeschaltet und das Ventil zwischen Verdampfer und Adsorber geschlossen. Solange es geschlossen bleibt, kann keine Adsorption erfolgen, die Energie ist verlustlos gespeichert. Nach erfolgter Desorption befindet sich die Zeolithfüllung noch auf hohem Temperaturniveau; die dabei im Zeolith gespeicherte, fühlbare Wärme kann für den Heizbetrieb verwendet werden. Die systemspezifische Heizkapazität beläuft sich damit auf mehr als 150 Wh/kg und die Kältekapazität auf mehr als 60 Wh/kg.

Prototyp

Im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes »FCKW-freie Autoklimaanlage« wird auch diese Speichervariante eines Sorptionsaggregates untersucht. Die Konstruktion unter-



Prinzipskizze einer kombinierten Heiz-/Klimaanlage

scheidet sich erheblich von der abgasgetriebenen Ausführung. Da in diesem Fall die Energie gespeichert werden muß, ist sehr viel mehr Zeolith erforderlich. Die Energiezufuhr für die Desorption erfolgt elektrisch über Heizstäbe. Die folgenden Abbildungen zeigen den Adsorber/Desorber und den Verdampfer eines der ersten Prototypen, die gefertigt und vermessen wurden.

Das komplette System – bestehend aus Adsorber/Desorber, Verdampfer, Verflüssiger, Ventil, Leitungen und thermischer Isolierung – hat ein Gewicht von ca. 35 kg und ein Gesamt-Volumen von weniger als 70 dm³. Der kalkulierte Preis beläuft sich auf ca. DM 700 und liegt damit erheblich unter dem für eine Kompressorklimaanlage mit Blei- bzw. NaS-Batterie ermittelten Wert.

Umweltverträglichkeit

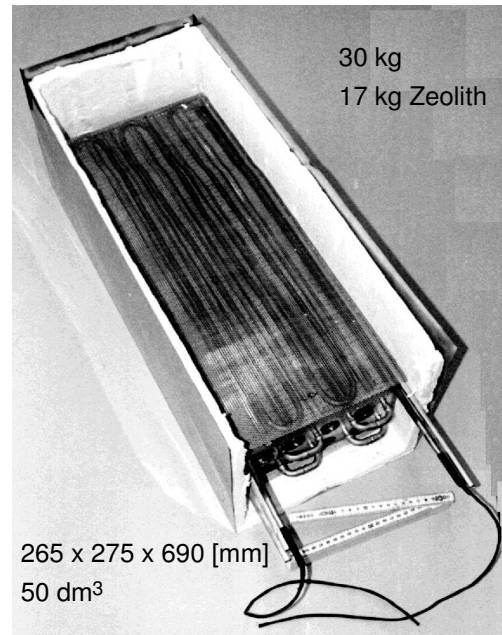
Auch die Umweltverträglichkeit eines Sorptionsaggregates mit Wasser/Zeolith ist günstiger als diejenige von Kompressor-Systemen mit Blei- bzw. NaS-Batterie, da bei den Batteriesystemen Probleme bei der Herstellung und der Entsorgung nach Abschluß der Lebensdauer auftreten.

Außerdem muß bei Verwendung von R 134 a als Kältemittel eine gesicherte Entsorgung durch Recycling sichergestellt werden. Recyclingexperten¹ gehen davon aus, daß in einigen Jahren ca. 200.000 t R 134 a produziert werden und daß es möglich sein wird, mit Recyclinganlagen gebrauchtes und entsorgtes Kältemittel dem Kreislauf wieder zu-

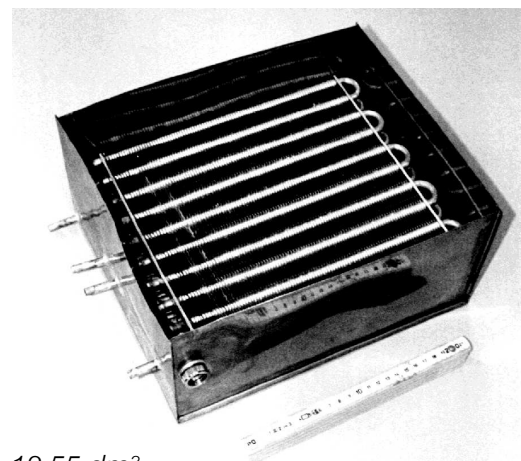
zuführen. Allerdings sei bei globaler Betrachtung davon auszugehen, daß weltweit höchstens 10 % der eingesetzten Kältemittelmengen recycelt werden kann (bei Kosten von ca. 60.000 DM/t). Das bedeutet, daß auch weiterhin die produzierten Kältemittelmengen nach einer Nutzungszeit von wenigen Jahren fast vollständig in die Atmosphäre gelangen und damit die Recycling-Anstrengungen relativ wirkungslos sein werden.

Erprobung

Die Abbildung zeigt den Kälteleistungsverlauf während einer kompletten Entladung des ersten Prototyps. Kurz nach dem Start der Kälteerzeugung stehen mehr als 3,5 kW Kälte



Adsorber/Desorber



Verdampfer

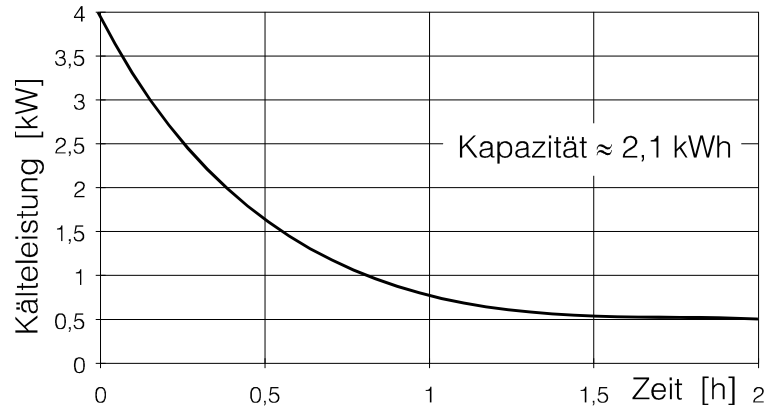
¹ DEUTSCHER BUNDESTAG, Enquete-Kommission »Schutz des Menschen und der Umwelt«, 3.- 4.12.92, Bonn,

zur Verfügung, nach einer halben Stunde immer noch mehr als 1,5 und nach einer Stunde nur noch 0,8 kW. Der starke Abfall ist – wie die Messungen ergeben haben – auf eine noch nicht ausreichende Wärmeabfuhr auf der Adsorberseite zurückzuführen. Durch geringe konstruktive Veränderungen ist diesem anfänglichen Mangel abzuhelpfen. Die erzielte Kapazität von 2,1 kWh kommt dem Zielwert von 2,5 kWh schon recht nahe.

Zusammenfassung

Sorptionsaggregate mit dem Stoffpaar Wasser/Zeolith bieten eine umweltverträgliche Möglichkeit der Autoklimatisierung. Eine abgasgetriebene, kontinuierlich arbeitende Variante und eine elektrisch angetriebene Speicher-Variante sind Gegenstand des BMFT-Verbundforschungsprojektes »FCKW-freie Autoklimaanlage«. Erste Prototypen haben ihre prinzipielle Funktionsfähigkeit und ein

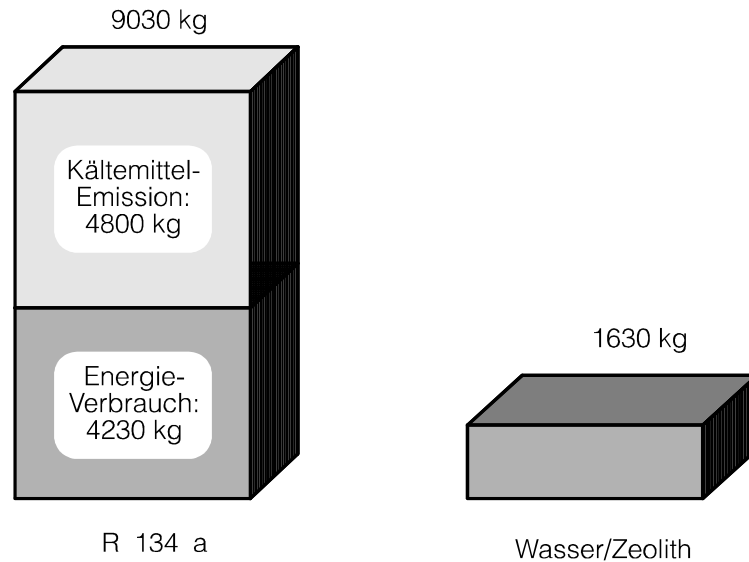
nennenswertes Optimierungspotential unter Beweis gestellt. Die Entwicklung, die bisher lediglich einen Anfang darstellt, wird weitergehen, und in absehbarer Zeit könnten bisherige Kompressions-Autoklimaanlagen, die mit dem treibhauswirksamen Kältemittel R 134 a arbeiten, von Sorptions-Klimaanlagen abgelöst werden.



Kälteleistung des Speichersystems

Anhang

Nach Abschluß der Abfassung des vorliegenden Manuskriptes wurden die bei der Berechnung der CO₂-Äquivalente verwendeten Randbedingungen auf die zukünftig zu erwartenden Werte sowohl für eine R134a- als auch für eine Wasser/Zeolith-Anlage hochgerechnet. Das Ergebnis ist in folgender Abbildung dargestellt.



rel. GWP _{20a/CO₂} (R134a)= 3200,	$\zeta = 0,4$; $\dot{Q}_0 = 3,5 \text{ kW}$
Emission in 10 Jahren: 1,5 kg,	$P_{\text{Gebläse}} = 125 \text{ W}$
$\varepsilon = 1,8$; $\dot{Q}_0 = 3,5 \text{ kW}$, $\eta_{\text{Mot}} = 20 \%$,	40 % Zusatzbrenner
Entsorgg. nach 10 Jahren: 100 %,	Betriebszeit: 1500 h $\hat{=} 10 \text{ a}$
spez. Emiss: 0,29 kg CO ₂ /kWh,	
Betriebszeit: 1500 h $\hat{=} 10 \text{ a}$	

*Gesamt-CO₂-Äquivalent zukünftiger PKW-Klimaanlagen
(Stand 8.2.93)*