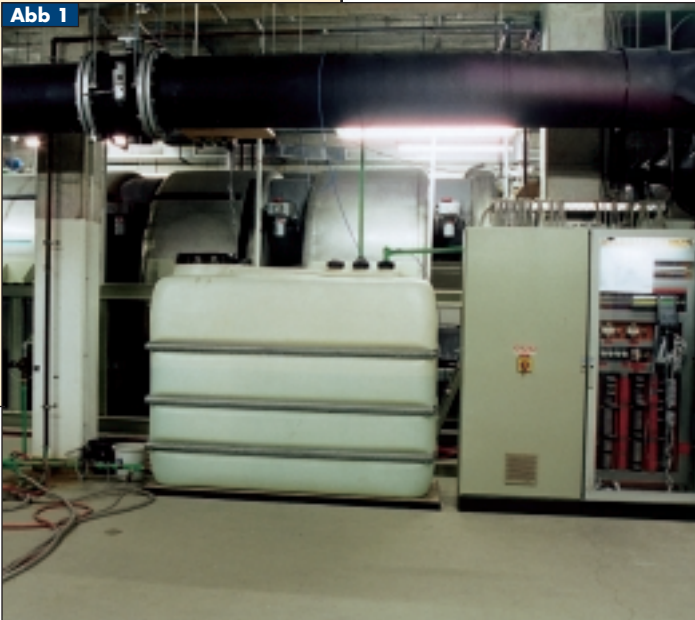


## Thermochemische Speicher

Abb 1



- ▶ **Nahezu verlustfreie Wärmespeicherung bei hohen Energiedichten**
- ▶ **Einsatz im Lastausgleich eines Fernwärmenetzes**
- ▶ **Saisonale Speicherung für die ganzjährige Versorgung mit solarer Wärme**
- ▶ **Effizienzsteigerung durch angepasste Sorptionsmaterialien**

*Zeolithspeicher - Teil der Heizungsanlage einer Münchner Schule*

**D**ie ganzjährige Wärmeversorgung von Gebäuden in Deutschland mit Sonnenenergie steht bisher vor einem Problem: Im Sommer ist solare Strahlung überreich vorhanden, der Heizwärmebedarf ist jedoch im Winter am größten, also dann, wenn die solare Strahlung am geringsten ist.

Das Dilemma der zeitlichen Verschiebung von solarem Angebot und Bedarf an Heizwärme wurde bislang nur in Siedlungen mit solarer Nahwärmeversorgung zur Heizungsunterstützung hinreichend gelöst. Bei solaren Nahwärmesystemen wird im Sommer solare Energie in Form von Wärme zumeist in große, gut gedämmte unterirdische Wasserspeicher oder Erdsonden und Aquiferspeicher eingespeist, die später für die winterliche Beheizung zur Verfügung steht. Wirtschaftlich tragfähig ist diese Form saisonaler Speicherung nur für Wohnsiedlungen mit zentraler Wärmeversorgung, nicht jedoch für einzelne Ein- oder Mehrfamilienhäuser.

Höhere Energiespeicherdichten als bei der herkömmlichen Speicherung sensibler Wärme erreicht man mit Latentwärmespeichern. Noch höhere Energiedichten lassen sich allerdings mit thermochemischen Speichern erzielen. Sie basieren auf einem grundsätzlich an-

deren Prinzip, denn man nutzt in diesem Fall reversible chemische Reaktionen für die Wärmespeicherung.

Die entscheidenden Vorteile thermochemischer Speicher liegen in der nahezu verlustfreien Wärmespeicherung auch über große Zeiträume hinweg sowie in den hohen erreichbaren Energiedichten. Thermochemische Systeme kann man im Vergleich zu üblichen Heißwasserspeichern mit einer bis zu vier- bis fünfmal höheren volumenbezogenen Wärmemenge beladen.

Nicht nur zur saisonalen Speicherung solarer Wärme sondern auch in der rationellen Energienutzung können thermochemische Speicher von Nutzen sein. So hat das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) zeigen können, dass thermochemische Speicher für den Lastausgleich in einem Fernwärmenetz genutzt werden können. In einem Pilotprojekt wurde ein thermochemischer Speicher erfolgreich in das Heizsystem einer Münchner Schule integriert. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert in verschiedenen Projekten Untersuchungen zu neuen Speichermaterialien und die Anwendungsforschung dieser innovativen Speichertechnik.

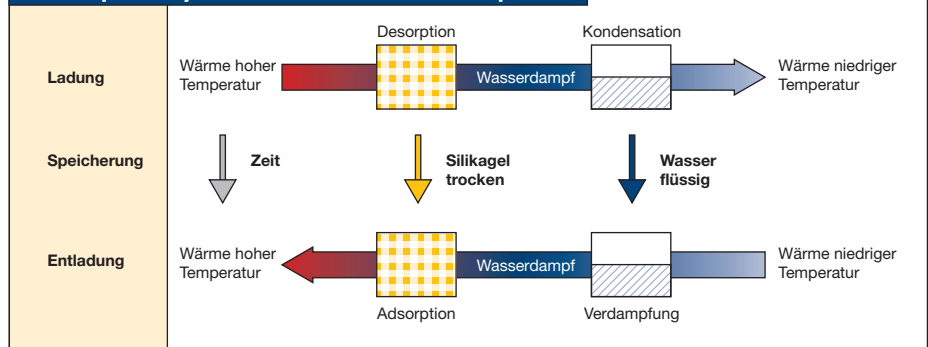
## ► Speicherprinzipien

Herkömmliche Wärmespeicher nutzen Speichermedien wie Wasser, die sich durch eine hohe Wärmekapazität auszeichnen. Gespeichert wird „fühlbare“ Wärme. Höhere Energiedichte erreicht man, wenn das Speichermedium innerhalb der Temperaturspreizung zwischen Ladung und Entladung einen Aggregatwechsel durchläuft (Abb 2). Vorteil dieser Form der Wärmespeicherung: geringe Erhöhung der Speichertemperatur bei gleichzeitig hoher Wärmeaufnahme. In beiden Fällen – sensibler und latenter Wärmespeicherung – ist für eine Langzeitspeicherung eine sehr gute Dämmung des Speichers nötig. Saisonale Wärmespeicherung lässt sich so nur mittels großer Speichervolumina erreichen. Bei thermochemischen Speichern ist die gespeicherte Wärme nicht „fühlbar“. Geeignete reversible Reaktionen im Niedertemperaturbereich sind u. a. Sorptionsprozesse – wie etwa die Adsorption eines Arbeitsmittels an einen Feststoff. Geladen wird ein solcher Sorptionsspeicher indem durch Wärmezufuhr einem Speichermedium beispielsweise Wasser entzogen wird. Bei der Umkehrung dieses Vorgangs, der Anlagerung von Was-

**Abb 2 Speicherarten und erzielbare Energiedichten**

Speicherart	Energiedichte	Speichermedien, z. B.:	Arbeitstemperatur
Sensibel	ca. 60 kWh/m <sup>3</sup>	Wasser	< 100 °C
Latent	bis zu 120 kWh/m <sup>3</sup>	Salzhydrate	ca. 30-80 °C
		Paraffine	ca. 10-60 °C
thermochemisch	bis zu 200-500 kWh/m <sup>3</sup>	Metallhydride	ca. 280-500 °C
		Silikagele	ca. 40-100 °C
		Zeolithe	ca. 100-300 °C

**Abb 3 Speicherzyklus eines thermochemischen Speichers**



serdampf an das Sorptionsmaterial, wird Wärme frei (Abb 3). Daher bezeichnet man den Prozess als „chemische Wärmepumpe“. Die Be- und Entladung eines Sorptionsspei-

chers kann im Prinzip beliebig oft wiederholt werden.

## ► Sorptionsmaterialien

Da Wasser eine hohe Verdampfungsenthalpie besitzt, erlaubt dies hohe Energiedichten. Außerdem findet bei der Adsorption von Wasser an der Oberfläche des Sorptionsmittels ein Phasenübergang zwischen gasförmiger- und flüssiger Phase statt. Infolgedessen setzt sich die nutzbare Wärme aus der Bindungsenergie zwischen Sorptionsmittel und Wasser sowie der Kondensationsenergie des Wassers zusammen. Silikagele wie auch Zeolithe besitzen eine große innere Oberfläche und vermögen große Mengen Wasser adsorptiv zu binden. Silikagele sind stark poröse, glasartige Substanzen. Durch die Variation des Herstellungsverfahrens lässt sich die Struktur dem jeweiligen Verwendungszweck anpassen. Wärmespeicher auf Silikagelbasis sind ins-

besondere für die Beladung mit Solarkollektoren geeignet, da Silikagel adsorbiertes Wasser schon bei niedrigen Temperaturen abgibt.

Zeolithe nennt man eine Gruppe von wasserhaltigen Metall-Alumosilikaten. Es sind ca. vierzig natürliche und über hundert synthetische Zeolithe bekannt. Sie können durch Ionenaustausch oder durch die Dotierung mit hygroskopischen Salzen modifiziert und somit in ihrer Energiespeichereffizienz verbessert werden. Zeolithe benötigen für die Desorption höhere Arbeitstemperaturen (über 100 °C) als Silikagele, können aber im Entladeprozess höhere Temperaturen liefern – sind also auch in Heizsystemen mit höheren Vorlauftemperaturen anwendbar.

Vom Sorptionsmaterial hängen sowohl die Speicherdichte, die erforderliche Betriebstemperatur, die erreichbare Nutztemperatur als auch dynamische Eigenschaften ab. Daher werden an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft (FHTW) in Berlin in Kooperation mit dem Forschungsunternehmen Zeosys zur Zeit auf einem Prüfstand verschiedene Adsorbensmaterialien geprüft. Dazu zählen kristalline, mikroporöse Zeolithe, mesoporöse Alumosilikat-Molekularsiebe, amorphe mikro- und mesoporöse Alumosilikate sowie Salzhydrate und Kompositadsorbentien, das sind auf Träger gebundene Salzhydrate. Ziel der Untersuchung ist es, optimal angepasste Sorptionsmittel zu bestimmen

## ► Lastausgleich im Fernwärmenetz

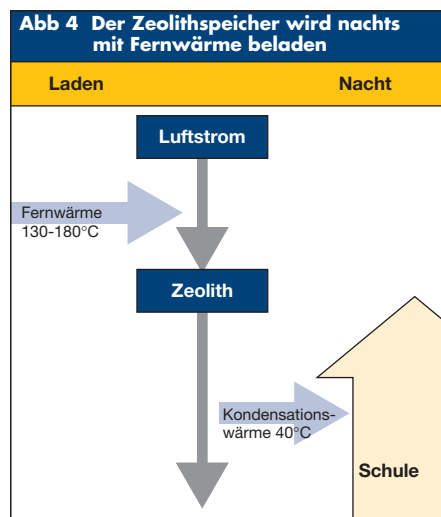
In einem Pilotprojekt haben die Münchner Gesellschaft für Stadterneuerung (MGS) und das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE) untersucht, wie sich thermochemische Speicher für die Nivellierung der Lastzeiten in einem Fernwärmenetz nutzen lassen. Der Sorptionsspeicher dient als Puffer zwischen dem Fernwärmenetz und dem Heizsystem einer Münchner Schule.

In Niederlastzeiten – also nachts und an Wochenenden – wird der Zeolith-Speicher mit Fernwärme geladen. Tagsüber zu Spitzenlastzeiten kann die Schule vom Fernwärmenetz abgekoppelt werden, die Heizwärme liefert dann alleine der Speicher. Der Speicher ist so ausgelegt, dass – bei einer maximalen Heizlast des Gebäudes von 95 kW – der Heizwärmebedarf der Schule 14 Stunden lang gedeckt werden kann. Der Spei-

cher besteht aus drei, miteinander verbundenen Kammern, die insgesamt 7.000 kg Zeolith 13X enthalten. Zeolith lässt sich mit Temperaturen ab 110 °C effizient trocknen und eignet sich daher für die Ankopplung an das bestehende Fernwärmenetz. Das Heizungssystem ist eine Kombination aus Luft-, Radiator- und Fußbodenheizung. Die Vorlauftemperatur liegt bei 65 °C und die Rücklauftemperatur bei maximal 35 °C.

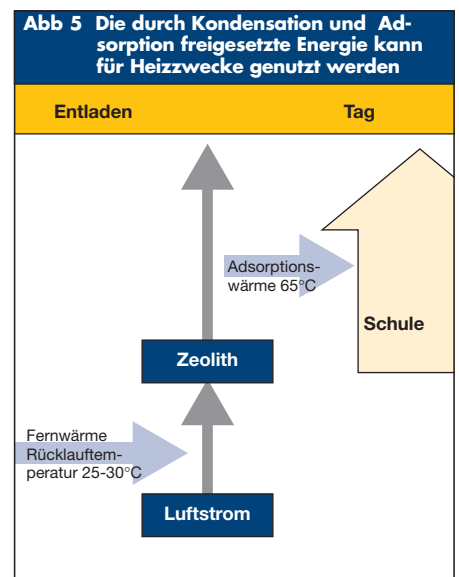
Die nächtliche Speicherung erfolgt mit durch Fernwärme auf 130 °C erhitzter Luft, die in den Speicher geleitet wird (Abb 4). Der heiße, trockene Luftstrom nimmt das an Zeolith gebundene Wasser auf und verlässt abgekühlt den Speicher. Die mit Wasserdampf angereicherte Luft wird durch einen Kondensator geleitet und die bei der Kondensation freiwerdende Energie für Heizzwecke genutzt (Abb 5). Für die Entladung wird das Kondensat bei niedrigen Temperaturen wieder verdampft. Genutzt wird hierfür die Wärme des Rücklaufs der Fernwärme. Die kalte, feuchte Luft wird in den Speicher geleitet und die freiwerdende Adsorptionsenergie für Heizzwecke genutzt.

Der Sorptionspeicher ist seit Ende 1996 in Betrieb und wurde seither umfangreich vermessen. Als Speicherwirkungsgrad konnten 86% des theoretischen Wertes ermittelt werden. Das Handicap des Zeoliths ist sein hoher Preis. Wirtschaftlich kann der Speicher, der zur Zeit mit Investitionskosten von 85.000 bis 115.000 DM/MWh veranschlagt werden muss, nur betrieben werden, wenn 100 und mehr Zyklen pro Jahr gefahren werden können. In kleiner Serie hergestellt scheint ein Preis für den Speicher



von 50.000 DM/MWh möglich. Bei günstigen Fernwärmepreisen kann man dann mit einer Amortisationszeit zwischen 10 und 15 Jahren rechnen.

Entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage ist eine hohe Zyklenzahl pro Jahr und eine gute hydrothermale Stabilität des Zeoliths. Dazu wurde Zeolith 13X über 400 Lade-/Entladezyklen unter wesentlich schärferen Adsorptions- und Desorptionsbedingungen als in der Pilotanla-



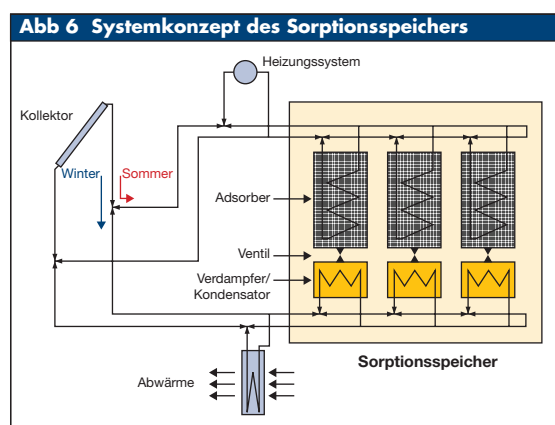
ge untersucht. Es zeigte sich, dass sich die Adsorptionenthalpie nach etwa 100 Zyklen um 15% verringerte, aber in den folgenden 300 Zyklen keine weitere Minderung eintrat und auch nicht erwartet wird. Im Dauerbetrieb ist eine Überprüfung des Zeoliths im Abstand von 4 bis 5 Jahren ausreichend.

## ► Saisonale Wärmespeicherung

Für Häuser in Niedrigenergiebauweise entwickeln der Kollektorhersteller UFE SOLAR und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gemeinsam einen Sorptionspeicher, der die ganzjährige Beheizung mit solarer Wärme erlaubt. Im Sommer wird der Speicher mittels einer Solaranlage geladen; im Winter wird die Wärmeversorgung durch den Sorptionspeicher geleistet, für Engpässe steht eine Zusatzheizung zur Verfügung.

Als Sorptionsmaterial wird Silikagel verwendet. Der Sorptionspeicher ist als geschlossenes System konzipiert, d. h. um Hilfsenergie für den Wasserdampftransport einzusparen ist der Speicherbehälter evakuiert. Das Speichersystem besteht aus industriell vorgefertigten Speichermodulen, die in den Solar- und Heizungskreis integriert werden. In jedem Modul stecken alle Komponenten des Systems: das Sorptionsmaterial mit innenliegenden Wärmetauschern, ein Vorratsbereich für das Kondensat und der Wärmetauscher für die Verdampfung und Kondensation. Das modulare Konzept erlaubt hohe Variabilität des Systems bei Verwendung standardisierter Komponenten (Abb 6).

Um den Heizbedarf eines Niedrigenergiehauses von etwa 4.000 kWh/a ausschließlich solar zu decken, benötigt man nach Simu-



lationsrechnungen einen ca. 10-12 m<sup>3</sup> großen Sorptionspeicher. Für den Solarkollektor sind 30-35 m<sup>2</sup> Dachfläche einzuplanen. Mit einem Speichervolumen von 6-8 m<sup>3</sup> ist schon ein Deckungsanteil von 90% zu erwarten, weshalb eine Auslegung auf 80-90% mit einer Notheizung sinnvoll erscheint. Die Wärmeabgabe sollte über ein Niedertemperatursystem erfolgen, einer Wand- oder Fußbodenheizung, da die erreichbare Energiedichte des Speichers umso höher ist je geringer die Heiztemperatur liegt.

Derzeit geht der Sorptionspeicher in die praktische Erprobung. Nach umfangreichen Labortests und Untersuchungen im Technikummaßstab wird der Sorptionspeicher in einem ökologischen Musterhaus im brandenburgischen Bruchhagen in das solare Heizsystem integriert (Abb 7). Darüber hinaus werden weitere Feldtests durchgeführt, um unter verschiedenen Randbedingungen und über mehrere Heizperioden das Systemverhalten zu optimieren.

## ► Ausblick

Das Spektrum möglicher Einsatzgebiete für Sorptionsspeicher ist breit. So hat die Universität Hohenheim einen Sorptionsspeicher für solare Trocknungsanlagen für den Einsatz zur Entfeuchtung von Hallenbädern weiterentwickelt. Ein Teil der feuchten Hallenabluft wird in einem Sorptionspeicher auf Basis einer Calciumchlorid-Sole entfeuchtet und gleichzeitig durch die freiwerdende Absorptionsenergie erwärmt. Die thermische Regeneration des Speichers kann beispielsweise durch die Abwärme eines BHKWs erfolgen. Wenn die Regeneration des Sorptionsmittels weiter optimiert werden kann, sind Sorptionsspeicher künftig eine wirtschaftliche Alternative für die Luftentfeuchtung von Hallenbädern.

Thermochemische Speicher werden in Zukunft auf verschiedenen Anwendungsgebieten die rationelle Nutzung von Energie unterstützen können. Voraussetzung für die ganzjährige Beheizung und Warmwasserbereitung mit thermischer Solarenergie sind Speichersysteme, die den sommerlichen Wärmeüberfluss für die winterliche Wärmebereitstellung sichern. Derartige autarke solare Heizsysteme werden sich aber nur dann am Markt etablieren können, wenn saisonale Langzeitspeicher auch kostengünstig sind und ohne Komforteinbußen betrieben werden können. Das gilt selbstverständlich auch für Speichersysteme, die als integraler Bestandteil der Fernwärmeversorgung die Effizienz von Fernwärmenetzen steigern können. Offene Speichersysteme sind darüber hinaus in der Lage, Kälte für die Raumklimatisierung bereitzustellen.

Ansatzpunkte für Effizienzsteigerungen in der Speichertechnologie sind optimierte Sorptionsmaterialien mit hohen Energiedichten, verbesserte Betriebsführungsstrategien und an die Bedingungen der Beladung im Niedertemperaturbereich angepasste Speicherkonzepte. In einem Verbundprojekt von UFE Solar GmbH und Grace GmbH, wird seit Herbst 2000 an der Speicherentwicklung mit neuen Sorptionsmaterialien für die Nutzung solarer Wärme gearbeitet. Nach Abschluss der labortechnischen Arbeiten soll die Produktentwicklung einem Feldtest unterzogen werden.

## ► PROJEKTADRESSEN

- Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.  
Andreas Hauer  
Domagkstr. 11  
80807 München
- Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (FHTW)  
Prof. Wolfgang Brösicke  
Marktstraße 9  
10317 Berlin
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Dr. Hans-Martin Henning  
Oltmannsstraße 5  
79100 Freiburg
- UFE SOLAR GmbH  
Walter Mittelbach  
Alfred-Nobel-Straße 1  
16225 Eberswalde
- Universität Hohenheim  
Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen  
Prof. Dr.-Ing. Werner Mühlbauer  
Grabenstraße 9  
70599 Stuttgart

## ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

### Literatur

- Hauer, A.: Thermochemical energy storage in open systems. Temperature lift, coefficient of performance and energy density. In: Terrastock 2000. Proceedings, Vol. 1. Universität Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. 2000. S. 391-396. ISBN 3-9805274-1-7.
- Mittelbach, W.; Núñez, T.; Luginland, F. u.a.: Solid sorption thermal energy storage for solar heating systems. In: Terrastock 2000. Proceedings, Vol. 1. Universität Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik 2000. S. 415-420. ISBN 3-9805274-1-7.
- Stach, H.; Jänchen, J.: Untersuchungen zur thermochemischen Wärmespeicherung. In: Chemische Technik. Jg. 52 (2000), H.1. S. 15-18.
- Waldenmaier, T.; Mühlbauer, W.: Modelling of a sorption heat storage system based on calcium chloride for air dehumidification and heat recovery in indoor swimming pools.. In: Terrastock 2000. Proceedings, Vol. 2. Universität Stuttgart. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. 2000. S. 659-664. ISBN 3-9805274-1-7.

### Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur, Adressen, Ansprechpartner und Internet-Links sind unter <http://bine.fiz-karlsruhe.de>, "Service/Infoplus" abrufbar.

## PROJEKTORGANISATION

- **Förderung des Vorhabens**  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  
Willemombler Straße 76, 53123 Bonn
- **Projektbegleitung im Auftrag des BMWi**  
Projektträger Biologie, Energie, Umwelt (BEO)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Volkmar Lottner  
52425 Jülich
- **Förderkennzeichen**  
0329525C, 0329662B, 0329616A,  
0327278A/B

## IMPRESSUM

- **ISSN**  
0937 – 8367
- **Herausgeber**  
Fachinformationszentrum Karlsruhe,  
Gesellschaft für wissenschaftlich-technische  
Information mbH  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
- **Nachdruck**  
Nachdruck des Textes nur zulässig bei  
vollständiger Quellenangabe und gegen  
Zusendung eines Belegexemplares;  
Nachdruck der Abbildungen nur mit  
Zustimmung der jeweils Berechtigten.
- **Redaktion**  
Paul Feddeck

## BINE – INFORMATIONEN UND IDEEN ZU ENERGIE & UMWELT

BINE ist ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderter Informationsdienst.

BINE informiert über neue Energietechniken und deren Anwendung in Wohnungsbau, Industrie, Gewerbe und Kommunen.

BINE bietet Ihnen folgende kostenfreie Informationsreihen

- Projekt-Infos
- Profi-Infos
- basisEnergie

**Nehmen Sie mit uns Kontakt auf**, wenn Sie vertiefende Informationen, spezielle Auskünfte, Adressen etc. benötigen, oder wenn Sie allgemeine Informationen über neue Energietechniken wünschen



Fachinformationszentrum Karlsruhe  
Büro Bonn  
Mechenstr. 57  
53129 Bonn

Fon: 0228 / 9 23 79-0  
Fax: 0228 / 9 23 79-29

eMail: [bine@fiz-karlsruhe.de](mailto:bine@fiz-karlsruhe.de)  
Internet: <http://www.bine.info>