



## CO<sub>2</sub> als Kältemittel für Wärmepumpe und Kältemaschine

Abb 1



- ▶ **CO<sub>2</sub> ist aus ökologischer Sicht ein ideales Kältemittel**
- ▶ **Expansions-Kompressions-Maschine verbessert Effizienz**
- ▶ **CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen für Raumheizung mit hoher Vorlauftemperatur und für die industrielle Warmwasserbereitung**

CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe – Versuchsanlage der TU Dresden

**N**atürliche Kältemittel wie Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser erleben in unterschiedlichen Anwendungsbereichen der Kälte- und Wärmepumpentechnik eine Renaissance. Sie sind als Ersatz für die klima- und ozonschädigenden chlorierten Fluor-Kohlenwasserstoffe sowie der fluorierten Kohlenwasserstoffe eine interessante Alternative.

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist aus ökologischer und sicherheitstechnischer Sicht ein nahezu ideales Kältemittel. Es ist weder giftig noch brennbar, es besitzt kein Ozonabbaupotential, ist chemisch inaktiv und ausgesprochen billig. Daher gibt es keine Notwendigkeit zur Rückgewinnung oder Entsorgung.

Nachteilig für den Einsatz sind die erforderlichen hohen Drücke, die besondere Anforderungen an technische Komponenten wie Verdichter und Wärmeübertrager stellen. Letztlich kann die Anlage aber kompakter mit kleineren Verdichtern und geringeren Rohrquerschnitten gebaut werden. Kohlendioxid zeichnet sich durch eine sehr hohe volumetrische Kälte- bzw. Heizleistung aus und besitzt hohe Wärmeübergangskoeffizienten.

Zukünftig kann Kohlendioxid als Kältemittel in verschiedenen Anwendungsbereichen einen Beitrag bei der Substitution klima-

relevanter Kältemittel leisten – in der Kältetechnik wie auch bei Wärmepumpen.

Derzeit eignen sich auf dem Markt verfügbare Wärmepumpen besonders für Niedertemperatursysteme, wie sie in Niedrigenergiehäusern beispielsweise mit Fußbodenheizung realisiert sind. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des Kohlendioxids ist die CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe geeignet, hohe Vorlauftemperaturen zu liefern, wie sie für Heizsysteme im Altbaubereich typisch sind. Derzeit wird im Rahmen des Vorhabens COHEPS eine CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe als Ersatz für konventionelle Heizkessel entwickelt.

An der TU Dresden wurde - mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie – eine kombinierte Expansions-Kompressionsmaschine entwickelt, die die Druckdifferenz bei der Entspannung des Arbeitsgases nutzt, um die Verdichterarbeitsleistung zu mindern. Ziel ist es, die Leistungszahl zu erhöhen. Erste Versuchsergebnisse und Betriebserfahrungen liegen vor. Darüber hinaus konnte an der TU Dresden die CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe für die Warmwassererwärmung von 10 auf 60 °C mit einer Heizleistung von 12 bis 27 kW mit guten Ergebnissen getestet werden. Ein Praxistest ist in Vorbereitung.

## ► Natürliche Kältemittel im Überblick

### Wasser

Das Kältemittel Wasser ist für Kühltemperaturen oberhalb des Gefrierpunktes einsetzbar. Da Kältemittel und Kälte Träger nicht getrennt werden müssen, entfallen die üblichen Wärmeübertrager. Die Folge: man erreicht eine höhere energetische Effizienz auch bei kleinen Temperaturdifferenzen zwischen Verdampfungstemperatur und gewünschter Kälte-träger-temperatur. Die geringe volumetrische Kälteleistung erfordert die technisch anspruchsvolle Verdichtung größerer Volumenströme und damit neuartige Verdichter, um Leistungszahlen vergleichbarer Anlagen zu erreichen. Obwohl die Wasser-Kompressionsanlagen eine sehr neue Entwicklung darstellen, sind schon einige Anlagen mit Erfolg im Einsatz.

### Ammoniak

Ammoniak ist seit Jahrzehnten ein häufig verwendetes Kältemittel, vor allem in der Industrie und für große Leistungen. Es ist nicht ozon-schichtschädigend und hat kein Treibhauspotential. Aber es ist toxisch und brennbar. Bisher mussten aus Korrosionsschutzgründen Anlagenkomponenten in Stahl ausgeführt sein. Neuere Untersuchungen zeigen, dass unter bestimmten Randbedingungen auch Cu- und Alu-Werkstoffe einsetzbar sind. Die thermodynamischen Eigenschaften machen eine Reihe technisch anspruchsvoller Komponentenentwicklungen erforderlich, die insbesondere der breiteren Anwendung im Gewerbebereich noch entgegensteht. Und auch die Sicherheit erfordert besondere Maßnahmen. Um Menschen und Kühlgut nicht zu gefährden, kann der Verdampfer häufig nicht direkt an das Kühlgut geführt werden. Der Wärmetransport erfolgt dann über einen Sekundärkreislauf.

### Propan

In industriellen Kälteanlagen ist Propan ein seit Jahren eingesetztes Kältemittel. Als Ersatz für R502 und auch für das seit 1.1.2000 in Neuanlagen verbotene R22 findet Propan in der Wärmepumpentechnik breite Anwendung. Propan schädigt nicht die Ozonschicht und besitzt ein sehr geringes Treibhauspotential. Drucklagen und Kälteleistung liegen ähnlich wie bei R502 und R22. Da keine korrosive Wirkung gegen Kupfer besteht, sind Kupferwerkstoffe einsetzbar, die auch halbermetische und hermetische Verdichter ermöglichen. Die leichte Entflammbarkeit des Propan macht allerdings zusätzliche sicherheitstechnische Vorkehrungen erforderlich.

### Kohlendioxid

Die ökologischen Vorteile des Kohlendioxids sprechen für sich. Wesentlicher Grund für das Verschwinden vom Kältemittelmarkt sind die verglichen mit „Sicherheitskältemitteln“ ungünstigeren thermodynamischen Eigenschaften. So erfordert die hohe Drucklage des Kohlendioxids in Systemen bei transkritischer Betriebsweise Drücke von mehr als 80 bar. Die hohe Drucklage macht speziell ausgelegte Anlagenkomponenten – Verdichter und Wärmetauscher – nötig. Andererseits erlaubt die sehr hohe volumetrische Kälteleistung einen sehr geringen Volumenstrom, der kleine Rohrquerschnitte und eine kompakte Bauweise ermöglicht. Kohlendioxid wird in industriellen Kaskadenkälteanlagen für den Anwendungsbereich von -10 bis -50 °C in der unteren Stufe eingesetzt, z. B. in Verfahren zur Schockgefrierung. Die Prozessführung ist unterkritisch, günstig aus energetischer Sicht und erfolgt bei Drücken, bei denen man auf verfügbare Komponenten zurückgreifen kann.

## ► Natürliche Kältemittel

Kohlendioxid war bis Ende der 30er Jahre ein häufig verwendetes Arbeitsmittel; in Kühlanlagen von Schiffen und in der Gebäudede-klimatisierung. Seither traten die vollhalogenierten FCKWs ihren Siegeszug in der Kältetechnik an. Sie wurden wegen ihrer sehr guten technischen Eignung und ihrer

Ungiftigkeit und Nichtbrennbarkeit als „Sicherheitskältemittel“ vermarktet. Seit den 80er Jahren wurde die schädigende Wirkung der FCKW auf die Ozonschicht immer deutlicher, eine Rückbesinnung auf die „natürlichen“ Kältemittel setzte ein.

Abb 2 Alternative Kältemittel

Kältemittel	Kürzel	Formel	ODP <sup>1</sup>	GWP <sub>100</sub> <sup>2</sup>	Ersatz für	Brennbarkeit	Toxizität
Kohlendioxid	R744	CO <sub>2</sub>	0	1	Diverse	nein	nein
Ammoniak	R717	NH <sub>3</sub>	0	0	R22, R502	ja	ja
Wasser	R718	H <sub>2</sub> O	0	0		nein	nein
Propan	R290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	3	R22, R502	ja	nein
Propen	R1270	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0	3		ja	nein

1= Ozon Depletion Potential; 2= Global Warming Potential

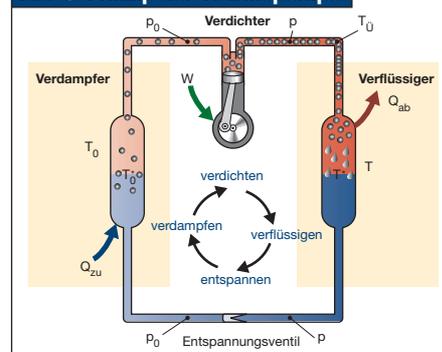
## ► Prinzip der Kompressions-Wärmepumpe / -Kältemaschine

Wärmepumpe wie Kältemaschine basieren auf dem gleichen technischen Prinzip jedoch mit unterschiedlicher Zielrichtung. Mit der Wärmepumpe wird Umgebungswärme auf ein für Heizzwecke nutzbares Temperaturniveau angehoben. Bei der Kältemaschine wird der gleiche Prozess genutzt, um durch Wärmeentzug Kühlung zu erzeugen. Die Wärmeaufnahme geschieht am Verdampfer mit einem Kältemittel, das bei niedriger Temperatur verdampft. Die die Wär-

metransformation von einem niedrigen auf ein höheres Temperaturniveau ermöglichende Arbeit leistet ein Verdichter, der den Kältemitteldampf ansaugt und komprimiert. Die Kompression „hebt“ das Kältemittel auf ein höheres nutzbares Temperaturniveau. Das verdichtete Kältemittel gibt an einen zweiten Wärmetauscher die aufgenommene Wärme ab und kondensiert dabei, wenn die Wärmeabgabe unterhalb der kritischen Temperatur des Kältemittels stattfindet. Liegt die Arbeitstemperatur des Kältemittels oberhalb der kritischen Temperatur, wie dies u. a. bei transkritischer Prozessführung des Kohlendioxids möglich ist, so lässt sich das Kältemittel nicht mehr verflüssigen.

Das unter Hochdruck stehende Kältemittel wird über ein Drosselventil entspannt – ohne dass die Entspannung in herkömmlichen Anlagen energetisch genutzt wird. Schließlich wird das Kältemittel dem Verdampfer zugeführt und der Kreisprozess ist geschlossen.

Abb 3 Prinzip der Wärmepumpe



## ► Thermodynamik des Kohlendioxids

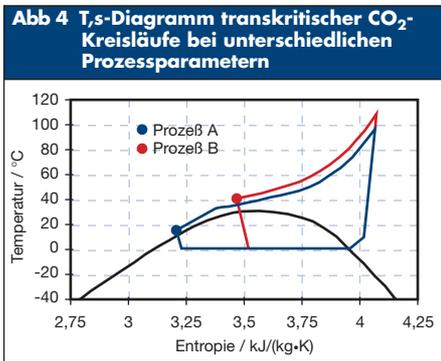
Ein Weg, um die Effizienz des transkritischen CO<sub>2</sub>-Kreisprozesses zu verbessern, ist der Ersatz der üblichen Drosselentspannung durch eine Arbeit leistende Entspannung. Die dabei gewonnene mechanische Arbeit kann dann für einen Teil der Verdichterarbeit eingesetzt werden.

Setzt man Kohlendioxid als Kältemittel in der Kältetechnik oder in Wärmepumpen ein, so ist mit Blick auf die Prozessführung die kritische Temperatur entscheidend. Sie liegt für Kohlendioxid bei 31 °C. Oberhalb dieser Temperatur ist Kohlendioxid auch unter Anwendung stärkster Drücke nicht mehr zu

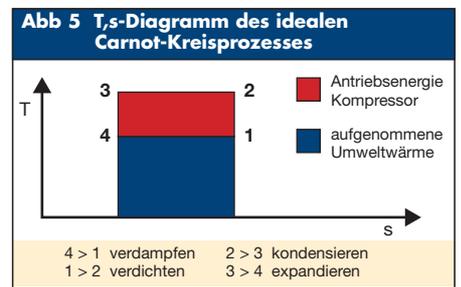
verflüssigen. Daraus ergeben sich für die Prozessführung im Bereich der kritischen Temperatur Besonderheiten.

Zum einen erreicht man nach der Verdichtung hohe Endtemperaturen, die bei vielen Anwendungen ungenutzt bleiben. Zum anderen tritt nach der Verdichtung und Wärmeabgabe nicht wie bei anderen Kältemitteln die Kondensation des Kältemittels bei konstanter Temperatur ein. Vielmehr findet nach der Verdichtung im Wärmeübertrager eine isobare Abkühlung unter „stark gleitender“ Temperatur statt. Durch die nicht-isotherme Wärmeabgabe

weicht ein derartiger Kreisprozess deutlich vom Carnot-Prozess (Abb 5) ab. Für die Leistungszahl ist dabei die Austrittstemperatur des Kohlendioxids aus dem Wärmeübertrager entscheidend. Je niedriger die Temperatur umso höher ist die erreichbare Leistungszahl. Wird am Wärmeübertrager unter die kritische Temperatur gekühlt, so erreicht man, dass die thermodynamischen Verluste bei der anschließenden Entspannung des noch unter Druck stehenden Kältemittels geringer bleiben (Prozess A in Abb 4). Eine derartige Prozessführung eignet sich für die industrielle Prozesswärme - wenn beispielsweise Wasser von 10 auf 60 bis 90 °C erwärmt werden soll. Für Heizungswärmepumpen oder Luft-Luft-



Klimaanlagen ist jedoch Prozess B (Abb 4) typisch. Hier liegt die Austrittstemperatur des Kohlendioxids aus dem Hochdruckwärmeübertrager über der kritischen Temperatur. Dies führt bei der Entspannung des



verdichteten Kältemittels zu erhöhten thermodynamischen Verlusten.

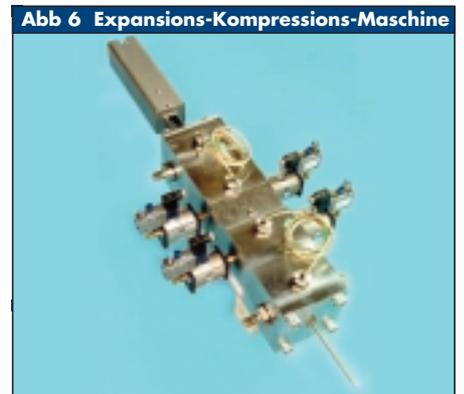
Ansatzpunkt für eine Effizienzsteigerung des Prozesses B ist u. a. die Nutzung einer arbeitsleistenden Entspannung für die Verdichtungsarbeit in der Expansions-Kompressions-Maschine der TU Dresden.

## ► Kombinierte Expansions-Kompressionsmaschine

Zur Verbesserung der Leistungszahl des transkritischen CO<sub>2</sub>-Prozesses wird an der TU Dresden eine kombinierte Expansions-Kompressionsmaschine eingesetzt. Ziel dieser Komponentenentwicklung ist es, die Drosselentspannung des komprimierten Kohlendioxids durch eine arbeitsleistende Entspannung zu ersetzen und die dabei gewonnene Expansionsarbeit in die Verdichtung einzubringen. Für den Klimakältebereich wurden die Leistungszahlen für verschiedene Prozessmodifikationen berechnet (Abb 7). Eine Erhöhung der Leistungszahl um berechnete 64,8 % (bezogen auf den Grundprozess) lässt sich demnach durch Nutzung der Expansionsarbeit in einem zweistufigen Verdichtungsprozess einschließlich Rückkühlung auf Mitteldruckniveau realisieren. Die zweite Stufe der Verdichtungsarbeit wird ausschließlich „intern“ durch Nutzung der Expansionsarbeit erbracht. Ein weiterer Vorteil dieses Anlagenkonzepts ist, dass der Wirkungsgrad des Verdichters der ersten Kompressionsstufe wegen des geringeren Druckverhältnisses größer werden kann.

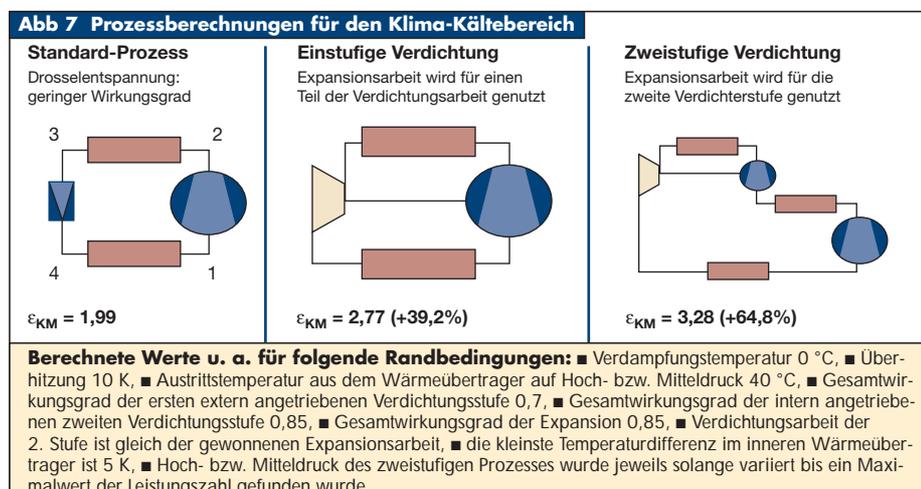
Um den anlagentechnischen Aufwand zu minimieren, wurden Arbeit leistende Entspannung und Verdichtung in einer einzigen Maschine kombiniert. Die nach dem Freikolbenprinzip arbeitende Expansions-Kompressionsmaschine ist als Volldruckmaschine ausgelegt. D. h. es wird ausschließlich die Volumenänderungsarbeit bei der Füllung des Arbeitsraums der Expansion genutzt. Damit werden zwar nur rund 60 % der bei einer vollständigen Expansion zur Verfügung stehenden isentropen Enthalpiedifferenz genutzt. Jedoch erfordert die Nutzung der vollständigen Entspannung einen höheren konstruktiven Aufwand.

Das Prinzip der Expansions-Kompressionsmaschine beruht auf zwei doppelt wirkenden Kolben, die über eine Kolbenstange verbunden sind. Die vier Arbeitsräume teilen sich in zwei Verdichtungs- und zwei Expansionsräume (Abb 8). Während einer Kolbenbewegung wird im Zylinder 1 Kohlendioxid expandiert, in 2 verdichtet und ausgeschoben. In Zylinder 3 wird das verbliebene Kohlendioxid von Verdichtungs- auf Verdichtungsansaugdruck expan-



diert und Kältemittel für den nächsten Verdichtungsprozess angesaugt. In Zylinder 4 wird das expandierte Kohlendioxid ausgeschoben. Das einfache Prinzip erlaubt es, das Modul bei entsprechender Frequenz kompakt und hermetisch zu bauen.

Erste Versuchsergebnisse zeigen, dass die direkte Kopplung von Arbeit leistender Entspannung und Verdichtungsarbeit in einer Maschine technisch funktionsfähig ist und in den geschlossenen Kreisprozess integriert werden kann. Leckagen des Kohlendioxids im Inneren der Expansions-Kompressionsmaschine traten nicht auf. Eine nächste Entwicklungsstufe zielt ab auf die konstruktiv aufwändigere Nutzung der vollständigen Entspannung in einer zweiten Versuchsmaschine.



## ► Ausblick

Für viele thermodynamisch gut geeignete, aber leider umweltschädigende Kältemittel sind inzwischen eine Reihe von Alternativen entwickelt worden. Allerdings sind „Drop-In“-Verfahren, bei denen der Austausch des Kältemittels ohne technische Änderung an den Anlagenkomponenten erfolgen kann, eher die Ausnahme. Die thermodynamischen Eigenschaften der Alternativkältemittel, einschließlich des Kohlendioxids, machen in der Regel Komponenten Anpassungen erforderlich.

Kohlendioxid wird jetzt schon in Kaskadenkälteanlagen für den Tieftemperaturbereich eingesetzt. Transkritische Prozesse wie z. B. bei der Wärmepumpenanwendung in konventionellen Heizungssystemen sind noch im Entwicklungsstadium. Die kombinierte Expansions-Kompressionsmaschine ist ein vielversprechender Weg für die Effizienzsteigerung von CO<sub>2</sub>-Anlagen.

Im Rahmen des von der Europäischen Gemeinschaft geförderten COHEPS Projektes wurde das Kältemittel CO<sub>2</sub> für verschiedene Anwendungen untersucht. Geeignete Einsatzbereiche für die CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe sind industrielle Trocknungsprozesse, Luftentfeuchtungsgeräte und die Warmwassererzeugung, aber auch die Substitution von konventionellen Heizkesseln für die Raumheizung mit hohen Vorlauftemperaturen. Das denkbare Marktpotential für derartige Wärmepumpen wäre enorm. Um sich allerdings in diesem Marktsegment behaupten zu können, sind Jahresarbeitszahlen erforderlich, die einen energetischen und möglichst auch ökonomischen Vorteil bieten. Darüber hinaus steht im Bereich der heiztechnischen Altbausanierung die CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe in Konkurrenz zu anderen technischen Alternativen wie Vuilleumier-Wärmepumpe, Diffusions-Absorptionswärmepumpe oder Brennstoffzellenheizgeräten.

Derzeit wird durch das Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen (FKW) ein Praxistest einer CO<sub>2</sub>-Heizungswärmepumpe in einem Altbau vorbereitet, um unter realen Betriebsbedingungen das Heizverhalten zu untersuchen und belastbare Aussagen zur Jahresarbeitszahl zu treffen. Angestrebt wird eine Jahresarbeitszahl zwischen 3 und 3,5. Ein weiteres interessantes Projekt ist die Entwicklung einer pumpenlosen CO<sub>2</sub>-Erdwärmesonde für Wärmepumpen, die gegenüber herkömmlichen Solesystemen Effizienzvorteile verspricht.

### ► PROJEKTADRESSEN

- TU Dresden  
Lehrstuhl für Kälte- und Kryotechnik  
Dr. Eberhard Kraus  
01062 Dresden
- Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen (FKW) GmbH  
Prof. Dr. Horst Kruse  
Weidendamm 14  
30167 Hannover

### ► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

#### Literatur

- Heyl, Peter; Quack, Hans; Kühne, Maik:  
Kombinierte Expansions-Kompressions-Maschine für Kohlendioxid in Freikolbenbauweise.  
In: Industrierpumpen + Kompressoren 2000, H.1, S. 26-33.
- Heyl, Peter; Quack, Hans: Transkritischer CO<sub>2</sub>-Prozess mit arbeitsleistender Entspannung – Betriebserfahrungen und Versuchsergebnisse.  
In: DKV-Tagungsbericht 26 (1999) Bd. II.1, S. 290-303.
- Heyl, Peter; Kraus, Eberhard; Quack, Hans:  
CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung – Ergebnisse und Erfahrungen.  
DKV-Tagungsbericht 24 (1997) Bd. II.2, S. 87-100.

#### 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)  
Villemombler Straße 76, 53123 Bonn
- Projektbegleitung im Auftrag des BMWi  
Projektträger Biologie, Energie, Umwelt (BEO)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Dr. Claus Börner  
52425 Jülich
- Förderkennzeichen  
0327221

## 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



**BINE**

Informationsdienst

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>