



Wärmepumpen

Auch im Winter bei niedrigen Temperaturen enthalten Erdreich und Grundwasser viel Wärme. Wärmepumpen können diese Wärmequellen nutzen, indem sie das Temperaturniveau der entnommenen Wärme anheben und anschließend in Hausheizungen einspeisen.

EINLEITUNG

In Kühlschränken werden Lebensmittel gekühlt. Dazu zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf im Gerät ein Kältemittel. Dieses Arbeitsmittel nimmt Wärme im Kühlschrankinneren auf, um sie an der Geräterückseite an die Umgebung abzugeben. Eine Wärmepumpe funktioniert nach dem gleichen Prinzip, wobei jedoch die Wärme und nicht die Kälte genutzt wird. Sie entnimmt Wärme auf niedrigem Temperaturniveau aus einer äußeren Wärmequelle, z. B. Erdreich, Grundwasser oder Außenluft. Diese hebt sie dann auf ein Temperaturniveau an, das für eine Hausheizung benötigt wird. Für diesen Temperaturhub benötigt die Wärmepumpe eine Antriebsenergie. Ziel einer guten Wärmepumpenanlage ist, dass die so aus der Umwelt entnommene Wärme um ein Mehrfaches größer ist als die zur Temperaturanhebung erforderliche Antriebsenergie.

William Thomson, der spätere Lord Kelvin, veröffentlichte 1852 die Idee, durch eine Maschine Luft in einem geschlossenen Kreislauf zu erwärmen oder abzukühlen. Er hatte beobachtet, dass sich Gase bei Kompression erwärmen. Dies zeigt im Alltag das Beispiel einer Fahrradluftpumpe. Umgekehrt sinkt die Temperatur des Gases bei Expansion. Bedeutung erlangten zuerst nur Maschinen zur Kälteerzeugung. Erst zwischen 1910 und 1930 wurden verschiedene Maschinen zur Wärmeerzeugung entwickelt und patentiert. Nach 1945 wurden vor allem in den USA und Japan Wärmepumpen in Lüftungsanlagen zur

Beheizung im Winter und Kühlung im Sommer eingesetzt.

In Europa dominierte angesichts der anderen klimatischen Bedingungen die Anwendung in Heizsystemen. Nach den Ölpreiskrisen der 70er Jahre stieg die Zahl der in Deutschland installierten Wärmepumpen stark an. Wieder sinkende Energiepreise und technische Probleme der Anlagen ließen die Verkaufszahlen zwischen 1985 – 1993 einbrechen. Mittlerweile sind die technischen Schwachstellen behoben, die Anlagen arbeiten zuverlässig und mit besseren Leistungen. Seit 1993 steigt die Zahl der installierten Wärmepumpen wieder an. Im Jahr 2000 wurden in Deutschland ca. 5.700 Wärmepumpen im privaten Wohnungsbau installiert, davon 94 % in Neubauten. Wärmepumpen machen in Deutschland etwa 2 % aller Hausheizungen aus; in der Schweiz liegt dieser Wert über 30 %.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) hat mit einer Vielzahl von Forschungsprojekten die Entwicklung effizienter und umweltfreundlicher Wärmepumpen gefördert. Hierzu zählen u. a. Untersuchungen zu umweltfreundlichen Kältemitteln, zur nachfrageorientierten Regelung und zur Kombination einer Wärmepumpe mit einer Lüftungsanlage. Weitere For-

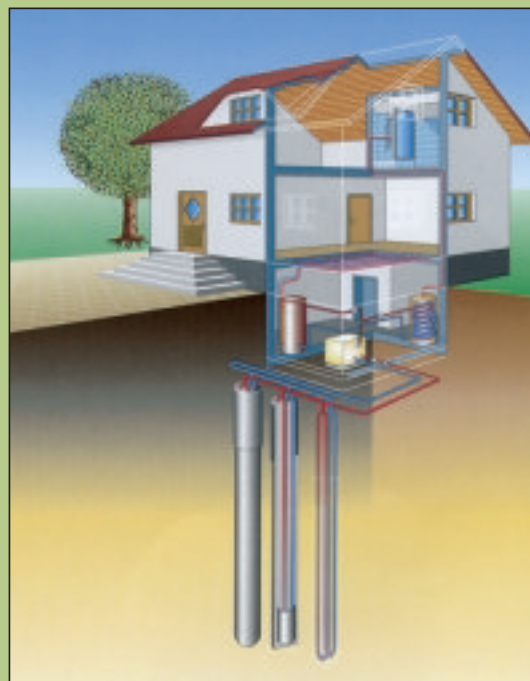


Abb. 1

Modell einer Wärmepumpenheizung mit Erdwärmesonden

schungsvorhaben betrafen Wärmepumpen, die für den Einsatz in großen Wohnanlagen und der Industrie entwickelt wurden. Schwerpunkt im Folgenden sollen Wärmepumpen für Ein- oder Zweifamilienhäuser sein.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Wärmequelle
- > Temperaturhub
- > Kompression
- > Expansion

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Die „Heimat“ der Wärmepumpe in der Physik ist die Thermodynamik, die Lehre über Energieumwandlung und Wärmeströme. Vor allem drei physikalische Prinzipien sind zum Verständnis einer Wärmepumpe grundlegend: Alltägliche Erfahrung ist, heißer Kaffee wird mit der Zeit kälter und gekühlte Getränke wärmer. Beide Temperaturen gleichen sich an die Raumtemperatur an und es entsteht ein Wärmestrom. Dieser fließt selbständig nur von einem höheren zu einem tieferen Temperaturniveau. Um Wärme gegen die natürliche Richtung fließen zu lassen, muss eine Pumpe arbeiten. Wärme verhält sich hier wie Wasser, das selbstständig bergab fließt, bergauf aber gepumpt werden muss. Zweitens liegt die Siedetemperatur von Flüssigkeiten bei niedrigerem Druck tiefer als bei hohem

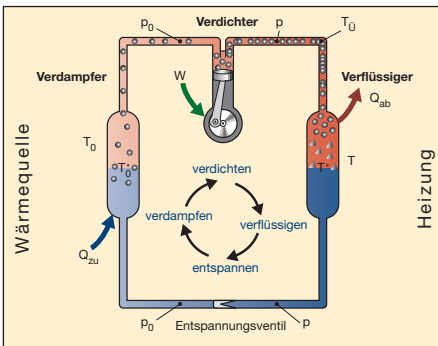


Abb. 2 Kreisprozess der Wärmepumpe (Q_{zu} = zugeführte Wärme, Q_{ab} = abgegebene Wärme, P_0 = niedriger Druck, P = hoher Druck, T = Temperatur, W = zugeführte Antriebsenergie)

Druck. Im Hochgebirge siedet Wasser bei niedrigeren Temperaturen als auf Meereshöhe. Drittens erfordert ein Verdampfungsprozess Energie, die bei einer Kondensation wieder frei wird. Führt man in einem kreisförmigen Prozess, z. B. in einer Wärmepumpe, zuerst eine Verdampfung und dann eine Kondensation durch, hat man Wärme transportiert.

Abb. 2 zeigt den Kreisprozess in einer Kompressions-Wärmepumpe. In einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert ein Kältemittel (Kohlenwasserstoffe, z. B. Propan oder Fluorkohlenwasserstoffe, z. B. R 134a). Wichtigste Eigenschaft von Kältemitteln ist, dass sie auch bei niedrigen Temperaturen leicht verdampfen. Durch Expansion sinkt die Temperatur des Kältemittels unter das Niveau der Umgebungswärme ab. Diese Temperaturdifferenz zwischen z. B. oberflächennahen Erdschichten und dem Kältemittel ermöglicht einen Wärmestrom zum Verdampfer. Anschließend wird der Kältemitteldampf vom Verdichter angesaugt und komprimiert. Durch diese Druckerhöhung wird die Temperatur des Kältemittels über das Niveau der Hausheizung angehoben. Am Verflüssiger liegt wieder eine Temperaturdifferenz vor und es kommt zu einem Wärmestrom zur Heizung. Das unter Hochdruck stehende Kältemittel kühlt wieder ab, kondensiert und wird über ein Drosselventil entspannt. Anschließend beginnt der Kreisprozess, d. h. verdampfen – verdichten – verflüssigen – entspannen, von Neuem.

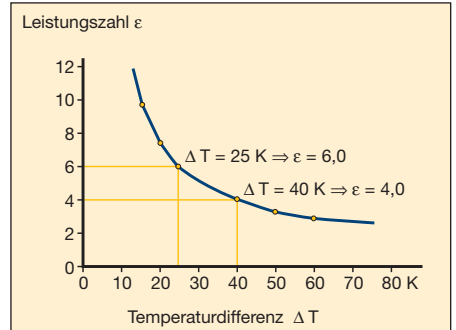


Abb. 3 Leistungszahl in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Verflüssiger (bezogen auf $T_0 = 273$ K). Näherungsweise wird die tatsächliche Leistungszahl mit 50 % des theoretisch möglichen Idealwertes (Carnot-Wert) angenommen.

Entscheidend für die Effizienz einer Wärmepumpe ist die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizung. Je geringer sie ausfällt, um so bessere Leistungen werden ermöglicht (Abb. 3). Bei einer Wärmepumpenheizung sind dabei die winterlichen Klimabedingungen ausschlaggebend. Von Vorteil sind demnach Wärmequellen, die im Winter über möglichst hohe Temperaturen verfügen, und Heizungssysteme, die mit möglichst niedrigen Temperaturen arbeiten.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Wärmestrom
- > Kreisprozess
- > Temperaturdifferenz

ANLAGENTECHNIK

Eine Wärmepumpenanlage besteht aus den Komponenten: Wärmequellenanlage, Wärmepumpe und Wärmenutzungsanlage. Wärmepumpen (WP) können nach verschiedenen technischen Prinzipien angetrieben werden: Kompressions-WP entweder mit Elektromotor oder Gasmotor und Absorptions-WP mit einem thermischen Verdichter zur Nutzung z. B. von Abwärme mit hoher Temperatur. Daneben existieren noch weitere Verfahren wie die Diffusions-Absorptions-WP. Im privaten Wohnungsbau dominieren strombetriebene Kompressions-Wärmepumpen und stehen nachfolgend im Mittelpunkt. Die Effizienz von Wärmepumpen wird durch die Kennwerte in Abb. 4 dargestellt. Der wichtige Wert ist die Jahresarbeitszahl, da sie z. B. auch das Nutzerverhalten einbezieht.

Abb. 5 zeigt einen Überblick der verschiedenen Wärmequellen. Wasser und Erde (ca. 80 % Marktanteil) verfügen während des Winters, wenn der Heizwärmebedarf

	Bedeutung	Aussage
Leistungszahl (ϵ)	Das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener, elektrischer Antriebsleistung zu einem bestimmten Zeitpunkt und für bestimmte Temperaturverhältnisse.	Effizienz der Wärmepumpe bei Prüfbedingungen.
Jahresarbeitszahl (β) *	Das Verhältnis der pro Jahr gelieferten Heizwärme (Q) zur benötigten Antriebsenergie (W). Damit werden u. a. betriebsbedingte Schwankungen gemittelt.	Effizienz der gesamten Wärmepumpen-Heizungsanlage.

Abb. 4 Kennwerte von Elektro-Wärmepumpen * In Zukunft wird der Kehrwert der Jahresarbeitszahl, d. h. W/Q [Jahresaufwandszahl], wichtiger werden

	Erdwärmekollektor	Erdwärmesonde	Grundwasser	Luft	Massivabsorber
Örtliche Verfügbarkeit	überall	überall	nicht überall	überall	nur bei Neubauten
Platzbedarf	hoch	gering	gering	gering	gering
Durchschnittstemperatur im Winter	-5° bis +5°C	0° bis +10°C	+8° bis +12°C	-25° bis +15°C	-3 bis +5 °C
Wasserrechtlich genehmigungspflichtig	nein	fast immer	immer	nein	nein
Mittlere Jahresarbeitszahl	bis 4	bis 4,5	bis 4,5	bis 3,3	–

Abb. 5 Kenndaten wichtiger Wärmequellen für WP-Anlagen im privaten Wohnungsbau unter mitteleuropäischen Klimabedingungen. Massivabsorber sind z. B. erdberührende Betonteile (z. B. Gründungspfähle), in die ein Wärmetauscher von Beginn an „eingebaut“ wird.

groß ist, über eine relativ hohe, stabile Durchschnittstemperatur. Dies begrenzt den notwendigen Temperaturhub und ist für die Leistung einer Wärmepumpe von Vorteil.

Der Anschluss an eine Flächenheizung (z. B. Fußbodenheizungen) ist für die Wärmepumpe günstig. Diese arbeiten mit niedrigen Vorlauftemperaturen, meist 35°C. Auch dies begrenzt den Temperaturhub. Derart niedrige Heizungstemperaturen reichen für die Warmwasserversorgung nicht aus, hier sind mindestens 55°C erforderlich. Hierfür kann die Wärmepumpe ebenfalls herange-

zogen werden, eine zweite, kleinere Brauchwasser-Wärmepumpe integriert oder auf eine thermische Solaranlage zurückgegriffen werden.

Ist in die Heizanlage neben der Wärmepumpe noch ein weiterer Wärmeerzeuger eingebunden, spricht man von bivalenter Betriebsweise. Eine alleinige Versorgung durch die Wärmepumpe heißt monovalent. In gut gedämmten Häusern mit einer Niedertemperatur-Heizung sind heute monovalente Anlagen üblich. Diese erfordern einerseits geringere Investitionskosten und

andererseits eine exakte Berechnung der Komponenten und Gesamtanlage. Die Integration eines Pufferspeichers in das Heizungssystem kann Nachfrageschwankungen ausgleichen. Heute funktioniert die Wärmepumpentechnik genauso zuverlässig wie die herkömmliche Heiztechnik.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Jahresarbeitszahl
- > Fußbodenheizung
- > bivalent
- > monovalent

ERDGEKOPPELTE WÄRMEPUMPEN

Fast zwei Drittel aller neuen Wärmepumpen im privaten Wohnungsbau arbeiten mit Erdwärmetauschern. Diese können als Erdwärmesonden (Abb. 1) vertikal in einem Bohrloch von bis zu 150 m Tiefe oder als Erdwärmekollektoren (Abb. 6) horizontal in 1,2 – 2 m tiefen Gräben verlegt werden. Entscheidungskriterien hierfür sind der vorhandene Platz, die wasserrechtliche Situation und die Bodenverhältnisse vor Ort. Gute Voraussetzungen bieten wassergesättigte Lehmböden (Abb. 7). Bei Erdwärmesonden wird das Bohrloch rings um die Sonde mit einer Bentonit/Zement-Füllung wieder verschlossen, um einen ungestörten Wärmeübergang zwischen Erdreich und Erdsonde zu gewährleisten und Grundwasservorkommen in unterschiedlicher Tiefe nicht künstlich miteinander zu verbinden. Abb. 8 zeigt den Temperaturverlauf im ungestörten Erdreich mit zunehmender Tiefe. Der Einfluss der Sonnenwärme ist bis zu einer Tiefe von 10 – 20 m nachweisbar. In Erdwärmesonden zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf ein Wasser-Glykol-Gemisch (Sole). Meist bestehen sie aus coaxialen oder U-förmigen Kunststoffrohren. In Erdwärmekollektoren kann auch direkt das Kältemittel (Direktverdampfer-System) allerdings in Kupferrohren zirkulieren. Dieses System hat Effizienzvorteile, da ein Wärme-

Erdwärmekollektor		Erdwärmesonde	
Bodenqualität	Spezifische Wärmeentzugsleistung [W/m ² (Kollektorfläche)]	Bodenqualität	Spezifische Wärmeentzugsleistung [W/m (Sondenlänge)]
Trockener nichtbindiger Boden	8 – 10	Kies, Sand trocken	20 – 25
Bindiger Boden feucht	16 – 30	Kies, Sand wasserführend	55 – 80
Wassergesättigter Sand/Kies	30 – 40	Ton, Lehm feucht	30 – 50
		Kalkstein	45 – 70
		Sandstein	55 – 80
		Gneis, Granit	55 – 85

Abb. 7 Übersicht über den Einfluss des Bodens auf den Wärmeentzug. Die Werte vor Ort können durch Grundwassereinfluss u. ä. stark abweichen. Die Werte der horizontalen und der vertikalen Erdwärmetauscher sind nicht miteinander vergleichbar, da es sich um verschiedene Maßeinheiten handelt. (Werte nach VDI 4640)

tauscher zwischen Wärmequelle und Wärmepumpe entfällt.

Bei einer Wärmepumpenheizanlage müssen die einzelnen Komponenten – Erdwärmesonde, Wärmepumpe und Heizung – genau aufeinander abgestimmt werden, um gute technische und ökonomische Ergebnisse zu erzielen. Ausgehend vom Wärmebedarf des Hauses werden die Länge der Erdwärmesonden und die Leistung der Wärmepumpe festgelegt. Hierzu ein Beispiel: Ein Niedrigenergiehaus erhält eine Heizung mit einer Leistung von 5 kW. Bei einer mittleren, thermischen Bodenqualität [$\lambda = 2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; $\sim 55 \text{ W/m}$] benötigt man bei einer Jahresarbeitszahl von 3,5 für ein einzelnes Haus etwa 90 m Erdwärmesondenlänge. Wenn eine Wärmepumpe eine höhere Jahresarbeitszahl schafft, muss auch die Sondenlänge leicht erhöht werden. Um Erdwärmesonden nachhaltig über viele Jahre betreiben zu können, darf die Wärmeentnahme während der Heizperiode nur so groß sein, wie während des Sommers durch natürliche Wärmeleitung wieder regeneriert werden kann. Langzeituntersuchungen zeigen, dass bei sorgfältiger Planung ein derartiges Gleichgewicht möglich ist und die Sonden über viele Jahre zuverlässig funktionieren. Allgemein gültige Angaben zu den Investitions- und Heizkosten sind an dieser Stelle kaum möglich, da u. a. sehr

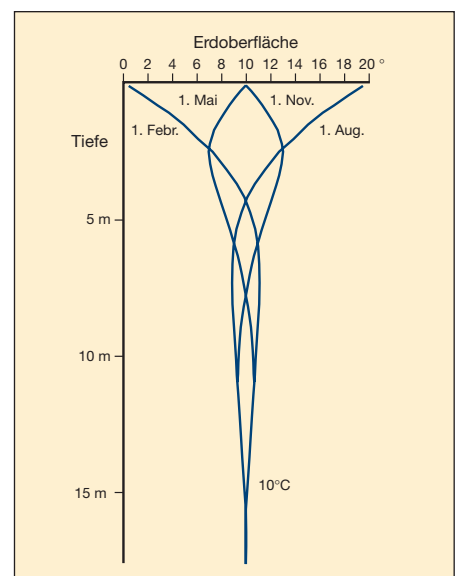


Abb. 8 Einfluss der Jahreszeiten auf die Temperatur der obersten Erdschichten

verschiedene Anlagenkonzepte möglich sind, Stromsondentarife für Wärmepumpen gewährt werden und Förderprogramme existieren.

ZENTRALE BEGRIFFE

- > Erdwärmesonde
- > Erdwärmekollektor
- > Auslegung
- > Nachhaltigkeit

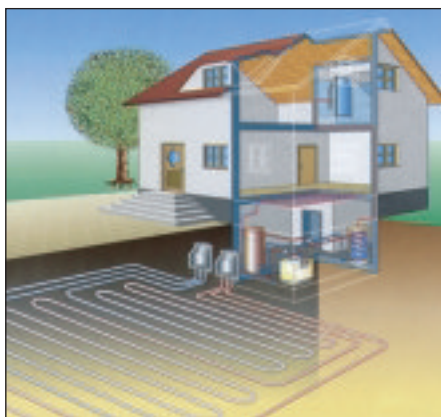


Abb. 6 Modell einer Wärmepumpen-Heizanlage mit Erdwärmekollektor

UMWELTBILANZ UND AUSBLICK

Lange waren FCKW-haltige Kältemittel ein zentrales Problem in der Ökobilanz von Wärmepumpen. Heute sind nur noch chlorfreie Fluorkohlenwasserstoffe (z. B. R 134a) bzw. halogenfreie Kältemittel (z. B. Propan) erlaubt.

Ein wichtiges Kriterium in der ökologischen Bewertung einer erdgekoppelten Elektrowärmepumpe mit Fußbodenheizung ist die Primärenergiebilanz. Unter welchen Bedingungen trägt eine Wärmepumpe zum Energiesparen bei? In dieser Bewertung ist die Wärmepumpe an die Energiebilanz der Kraftwerke gekoppelt. Geht man vom durchschnittlichen Wirkungsgrad der deutschen Kraftwerke von 36 % und Jahresarbeitszahlen zwischen 3,5 und 4 aus, dann erreicht eine Wärmepumpe einen Wirkungsgrad bezogen auf Primärenergie von 126 – 144 %. Sie kann demnach gegenüber anderen Heizsystemen gut bestehen. Die CO₂-Emissionen

einer o. g. Wärmepumpenanlage im Vergleich zu einer Brennwertheizung werden ganz unterschiedlich bewertet. Hierbei sind die zu Grunde gelegten Kraftwerke, die den notwendigen Strom tatsächlich liefern, die entscheidende Annahme. Mittlerweile sind durch die technischen Fortschritte bei Wärmepumpen die zur Diskussion stehenden Differenzbeträge nur noch sehr gering.

Verbraucher können durch die Wahl des Anbieters die ökologische Qualität (d. h. CO₂-Emissionen) ihres Stroms beeinflussen und z. B. auch komplett auf Strom aus Photovoltaik, Windenergie oder Wasserkraft wechseln. Damit besteht die Möglichkeit, die Bewertung der Wärmepumpentechnik von der allgemeinen Stromdiskussion zu entkoppeln. Auch eine weitere Modernisierung der Kraftwerke und ein steigender Anteil von Strom aus erneuerbaren Energiequellen am gesamten Strommix kann dieses unterstützen. In Kürze werden Neubauten generell Niedrigenergiehäuser mit geringem Heizwärmebedarf sein. Um diesen zu decken, ist für umweltbewusste Bauherren, abhängig von den Bedingungen vor Ort, eine erdgekoppelte Wärmepumpe neben Brennwertheizungen, thermischen Solaranlagen, Nahwärmesystemen mit BHKW und künftig einer Brennstoffzellen-Heizung eine der in Frage kommenden zukunftssträchtigen Technikalternativen.



Abb. 9 Heizungskeller mit Wärmepumpe

LITERATUR

- Bei BINE können verschiedene Projekt-Infos zum Thema „Wärmepumpe“ kostenlos angefordert werden.
- Kruse, H.; Heidelck, R.: Heizen mit Wärmepumpen, Köln: TÜV-Verlag, Reihe „BINE-Informationspakete“, 3. erweiterte Auflage Februar 2002, ISBN 3-8249-0641-4
- Informationszentrale der Elektrizitätswirtschaft (IZE): Der Trick mit der Wärmepumpe, Strombasiswissen Nr. 127, Bezug: IZE, Postfach 700561, 60555 Frankfurt

Bildung & Energie im Web

www.bine.info

Unsere Informationen für Schule, Beruf und Erwachsenenbildung finden SIE unter: www.bine.info Dort sind in der Rubrik "Service/Infoplus" ein Literaturverzeichnis und eine aktuelle Linkliste zum Thema eingestellt.

Ergänzende Informationen

Info-Mappen / Download

Zu den behandelten Themen ist jeweils eine kostenlose Mappe mit vertiefenden Informationen bei BINE erhältlich. Alle Abbildungen stehen für Bildungszwecke unter www.bine.info in der Rubrik "Service/Info-Downloads" kostenlos zum Download zur Verfügung oder können gegen eine Bearbeitungsgebühr von 15,-€ (V-Scheck) bei BINE angefordert werden.

IMPRESSUM

▼ Herausgeber



**FACHINFORMATIONSZENTRUM
KARLSRUHE**

Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH

76344 Eggenstein-Leopoldshafen

▼ Fachliche Beratung

Prof. Hans-Jürgen Laue, IZW e. V.
Dr. Burkhard Sanner, Universität Gießen

▼ Redaktion

Uwe Milles

▼ ISSN

1438-3802

▼ Nachdruck

Nachdruck des Textes zulässig bei vollständiger Quellenangabe und gegen Zusendung eines Belegexemplares - Nachdruck der Abbildungen nur mit Zustimmung der jeweils Berechtigten.

▼ Stand

Dezember 2001

BINE - INFORMATIONEN UND IDEEN ZU ENERGIE & UMWELT

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

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

Internet: www.bine.info