



Vuilleumier-Wärmepumpen

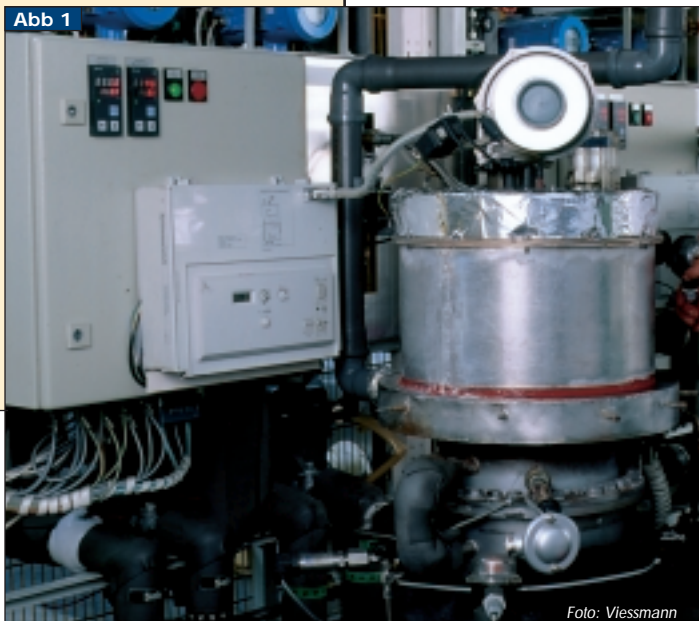


Abb 1

Foto: Viessmann

- ▶ Monovalenter Betrieb zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung ist möglich
- ▶ Außenluft als Wärmequelle erschließt Altbausektor
- ▶ Erdgaseinsparung von bis zu 44% gegenüber konventioneller Heiztechnik
- ▶ Prototypen befinden sich im Dauertest

Mehrere Vuilleumier-Wärmepumpen befinden sich seit 1998 im Dauertest

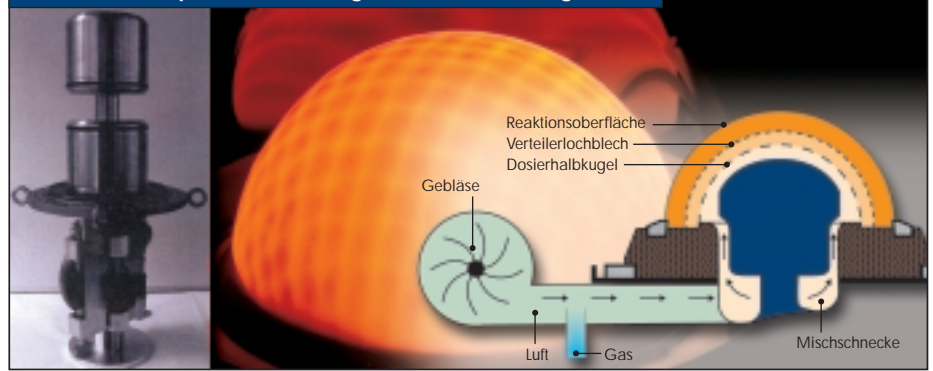
Vuilleumier-Wärmepumpen haben im Vergleich zu anderen Wärmepumpentypen einige bemerkenswerte Vorteile: Antriebsenergie ist Wärme, die dem Aggregat von außen z. B. durch einen Gasbrenner zugeführt wird. Die äußere Verbrennung ermöglicht einen schadstoffarmen Betrieb sowie die Anpassung an unterschiedlichste Brennstoffe. Als Arbeitsgas dient umweltneutrales Helium. Umgebungswärme kann auch auf niedrigem Temperaturniveau genutzt werden. Selbst mit Außenluft als Wärmequelle erreicht die Vuilleumier-Wärmepumpe in allen Lastbereichen hohe Leistungszahlen. Sie kann auch an kalten Tagen ohne gravierende Leistungseinbußen monovalent Heizwärme und Warmwasser bereitstellen. In besonderem Maße eignet sie sich daher für den Einsatz in Altbauten, bei denen in der Regel die Erschließung anderer Wärmequellen wie Erdreich oder Grundwasser nicht möglich oder teuer ist. Vuilleumier-Wärmepumpen wurden bisher nur als Kältemaschinen für sehr spezielle Einsatzgebiete, etwa zur Kühlung von Infrarotsensoren oder zur Fangkühlung in Fischkuttern eingesetzt. In den

80er und 90er Jahren arbeiteten Forschungsgruppen in Deutschland, in den Niederlanden, Dänemark und Japan an Versuchsmustern. Wesentlicher Grund dafür, dass Vuilleumier-Wärmepumpen bisher noch keine Anwendung im Heizungssektor gefunden haben, dürften die hohen Anforderungen an die Standfestigkeit des Aggregates sein. Ein Einsatz über 10-12 Jahre entspricht etwa 20.000 Betriebsstunden des hermetisch verschlossenen und der Wartung unzugänglichen Kolbensystems. Mit den Fortschritten der Material- und Fertigungstechnik ist es heute möglich, effiziente Vuilleumier-Wärmepumpen zu konstruieren, welche die geforderte Zuverlässigkeit besitzen. Um die Technik gezielt für den Hausheizungssektor zu erschließen, förderte das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) seit 1993 ein Joint Venture zweier Heizgeräte-Hersteller, die in Kooperation mit Materialforschungsinstituten mehrere gasbetriebene Vuilleumier-Wärmepumpen mit Nennleistungen von 4 und 20 Kilowatt entwickelten. Einige Prototypen werden derzeit einem 20.000-Stunden-Dauerbetriebstest unterzogen.

► Entwicklung einer 20 kW-Wärmepumpe

Mit dem Ziel des Forschungsvorhabens, Einsatzpotentiale insbesondere auch im Wohnungsbestand zu erschließen, waren einige Anforderungen an die Vuilleumier-Wärmepumpe vorgegeben. Zum einen sollte Außenluft als überall verfügbare sekundäre Wärmequelle dienen, zum anderen muss das System als alleiniger Wärmeerzeuger bei Lufttemperaturen zwischen -15 °C und 15 °C konstante Heizleistungen erbringen und Vorlauftemperaturen von bis zu 75 °C für Radiatorheizung und Brauchwassererwärmung erzeugen. Vergleichbar zu konventionellen Heizsystemen muss ein wartungsarmer und sicherer Betrieb über 20.000 h gewährleistet sein. Aufbauend auf

Abb 2 Bewegungsapparat mit Kolben und Getriebe Erhitzerkopf der 20 kW-Anlage mit Matrix-Strahlungsbrenner



Erfahrungen mit einem experimentellen 4 kW-Aggregat erfolgte die Entwicklung von Versuchsmaschinen mit von den Einsatzbedingungen abhängigen Nennleistungen zwischen 18 - 35 kW. Im Dauertest untersucht wurden Prototypen mit einer Nennleistung von 20 kW, bezogen auf die energetisch ungünstige Kombination von Außenluft als Wärmequelle und Wärmeverteilung über Radiatoren. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Baugruppen wie Erhitzerkopf, Wärmeübertrager, Regeneratoren und Getriebe, erfolgte die Konstruktion in einem aufwendigen iterativen Verfahren, in dem thermodynamische Berechnungen, Werkstoffauswahl sowie Fertigungs- und Montagetechnik sukzessive verbessert wurden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die vorgegebenen Kostenziele erreichbar sind.

Abb 3 Auslegungsparameter der Vuilleumier-Wärmepumpe mit 4 kW- und 20 kW-Nennleistung

	20 kW (Prototyp) / Serienmodell	4 kW
Ausmaße (Höhe) [m]	1,04 / 1,1	0,9
Gewicht [kg]	200 / 135	60
Helium-Prozessdruck [bar]	100 ± 10 / 130 ± 13	119 ± 9
Max. Drehzahl [Upm]	450 / 540	422
Kolbenhub [cm]	5 / 5	2,5
Kolbendurchmesser [cm]	18 / 13	11

► Funktionsprinzip der Vuilleumier-Wärmepumpe

Wie der Stirling-Motor basiert auch die Vuilleumier-Wärmepumpe auf einem thermisch angetriebenen regenerativen Gaskreisprozess. Diese sind allgemein dadurch charakterisiert, dass ein Gas zyklisch eine Folge von vielfältig kombinierbaren mechanischen und / oder thermischen Verdichterelementen durchläuft (Abb. 4). Bei letzteren werden zwei miteinander verbundene Gas-Teilvolumina von einem Verdrängerkolben und einem Regenerator räumlich bzw. thermisch separiert. Die Vuilleumier-Wärmepumpe besteht aus zwei hintereinandergeschalteten thermischen Verdichterelementen mit drei Temperaturniveaus (Abb. 5). Sie kann daher zwei unterschiedlich temperierte Wärmequellen (z.B. Rauchgase eines Öl- oder Erdgasbrenners und ein Außenluft-Sole-Wärmetauscher) zu einem nutzbaren

Wärmestrom transformieren. Als Arbeitsgas verwendet man Helium, da es eine geringe Viskosität und hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und sicherheitstechnisch wie ökologisch unbedenklich ist.

Transformation der Wärmeströme
Die beiden Kolben K_1 und K_2 unterteilen ein insgesamt konstantes Gasvolumen (Abb. 5) in drei periodisch veränderliche Teilvolumina $V_{\text{heiß}}$, V_{warm} und V_{kalt} , welche mittels Wärmeübertrager (WÜ) mit den äußeren Medien (Rauchgas, Heizkreislauf, Sole) permanent in Kontakt stehen. Abb. 5 illustriert die auf diese Weise thermisch induzierte Kolben- bzw. Gasoszillation. Ein- bzw. auszukoppelnde Wärmeströme treten entsprechend den thermisch induzierten Druckänderungen zu allen Zeitpunkten in allen Gasräumen auf. Bilanziert man diese jedoch über einen gesamten Zyklus, verbleiben die in Abb. 5 eingetragenen Nettowärmeströme. Die Abgabe des Nutzwärmestroms an den Heizkreislauf im mittleren Volumen geschieht in Phase I und II. In dieser Zeit bleibt das Warmvolumen konstant, während ein isothermer Druckanstieg erfolgt und so Kompressionswärme frei wird. Die Aufnahme des heißen und kalten Wärmestroms findet dagegen bei isothermer Expansion im oberen bzw. unteren Teilvolumen statt (Phase III und IV),

Abb 4 Grundelemente von regenerativen Gaskreisprozessen

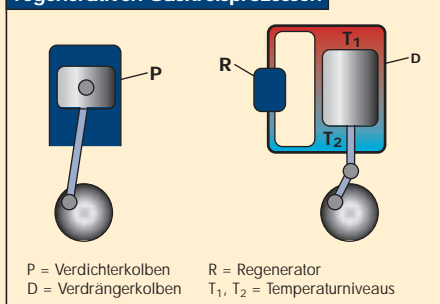
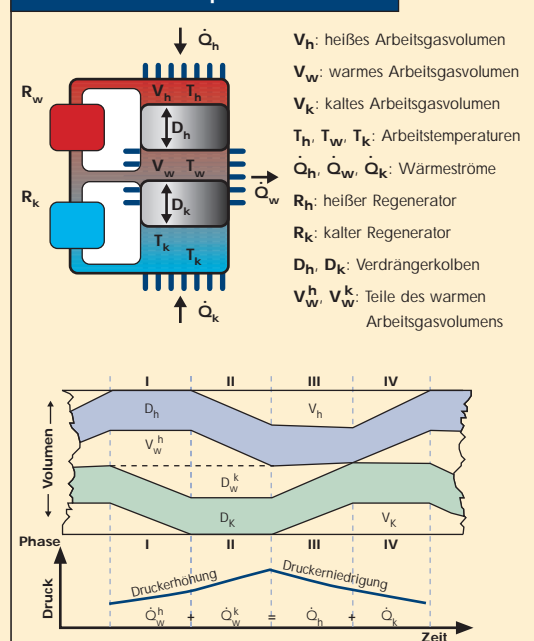


Abb 5 Prinzip einer Vuilleumier-Wärmepumpe und die vier Phasen des idealen Vuilleumier-Gaskreisprozesses



wenn der Druck im Gesamtsystem wieder abfällt. Der über alle Teilvolumina gemittelte Druck schwankt während eines Zyklus um bis zu 10%. Er ist maximal, wenn die mittlere Gastemperatur am höchsten ist, weil sich das Gas mehrheitlich im warmen und heißen Teil aufhält (Phase II und III).

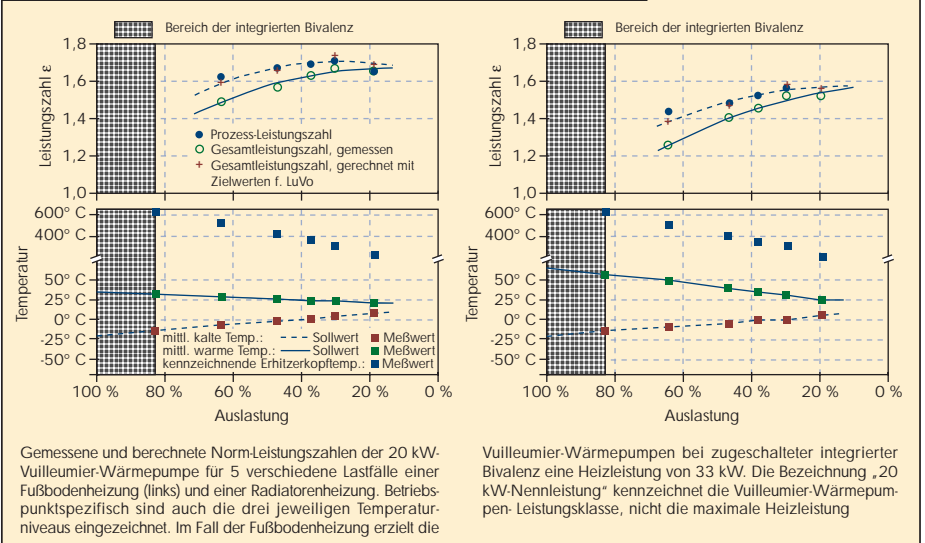
Energetische Effizienz und Heizleistungsregelung

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird charakterisiert durch die Leistungszahl, dem Verhältnis von erzeugtem Nutzwärmestrom \dot{Q}_W zu dem dafür aufgewendetem Heiß- bzw. Brennerwärmestrom \dot{Q}_H bzw. \dot{Q}_{Br} . Zwei Leistungszahlen kennzeichnen daher das Vuilleumier-Wärmepumpen-System: die Leistungszahl ϵ_{Pr} des reinen Vuilleumierprozesses und die Leistungszahl ϵ_{ges} des Gesamtsystems, bei dem die Verluste im Strahlungsbrenner als auch die zusätzliche Wärmestromgewinnung im Rauchgas-Restwärmeübertrager mitberechnet werden. (Abb. 6 und 8).

Die Leistungszahlen variieren u.a. mit den Temperaturbedingungen, also mit dem Vuilleumier-Wärmepumpen-Einsatzort. Sie sind betriebspunktspezifisch und im idealen Prozess tendenziell umso höher je größer die Temperaturdifferenz zwischen heißen und kaltem Volumen (z.B. bei sehr kalter Außentemperatur und hoher Verbrennungstemperatur) und je kleiner zugleich die Temperaturdifferenz zwischen warmen und kalten Volumen ist (z.B. bei der Versorgung einer Fußbodenheizung).

Allerdings wird hierzulande nur etwa 4% der jährlichen Heizwärmemenge bei einer Auslastung von mehr als 75% benötigt. Um das Gesamtsystem während einer Heizperiode dennoch möglichst effizient fahren zu können, legt man die Vuilleumier-Wärmepumpen nicht auf den Spitzenlastfall aus, sondern auf den häufigsten Lastfall mit einer Außenlufttemperatur von $T = +2,5^\circ\text{C}$. Der Spitzenlastfall wird dann durch eine am Strahlungsbrenner lokalisierte, kostengünstige Verschaltungsvariante bewältigt. Diese bezeichnet man als „Integrierte Bivalenz“ und erhöht die Nennleistung um bis zu 20%, indem der Rauchgaswärmestrom direkt – ohne Umweg durch den Verbrennungsluftvorwärmer im Rauchgas-Rest-

Abb 6 Norm-Leistungszahlen der 20 kW-Vuilleumier-Wärmepumpe



Gemessene und berechnete Norm-Leistungszahlen der 20 kW-Vuilleumier-Wärmepumpe für 5 verschiedene Lastfälle einer Fußbodenheizung (links) und einer Radiatorenhheizung. Betriebspunktspezifisch sind auch die drei jeweiligen Temperaturniveaus eingezeichnet. Im Fall der Fußbodenheizung erzielt die

Vuilleumier-Wärmepumpen bei zugeschalteter integrierter Bivalenz eine Heizleistung von 33 kW. Die Bezeichnung „20 kW-Nennleistung“ kennzeichnet die Vuilleumier-Wärmepumpen-Leistungsklasse, nicht die maximale Heizleistung

wärmeübertrager an den Heizkreislauf gegeben wird. Um dennoch – auch ohne Luftvorwärmung – den gleichen Erhitzerkopfwärmestrom beibehalten zu können, erhöht man die Erdgas-Luft-Zufuhr.

Vergleich mit anderen Heizsystemen

In Analogie zum Norm-Nutzungsgrad bei Heizkesseln gemäß DIN 4702 Teil 8 wurde für die Vuilleumier-Wärmepumpe eine auf das Jahr bezogene Norm-Leistungszahl definiert.

Die Energiebilanz (Abb. 8) zeigt, dass sich mit Vuilleumier-Wärmepumpen der Primärenergieverbrauch (bzw. CO₂-Emission) gegenüber einem Gasbrennwertgerät um 34% (33%) senken lässt. Der Vorteil der Vuilleumier-Wärmepumpe gegenüber anderen Wärmepumpentypen liegt in großen Einsatzbereich: hohe Heizleistung und damit monovalenter Betrieb ist auch mit Außenluft als Wärmequelle möglich. Ein direkter Vergleich der Arbeitszahlen von Kompressionswärmepumpen mit der Vuilleumier-Wärmepumpen - Norm-Leistungszahl ist nur betriebspunktspezifisch sinnvoll.

Betriebserfahrungen im Dauertest

Die Anzahl beweglicher Bauteile ist zwar geringer als z.B. in verbrennungsmotorisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen, diese müssen jedoch über die gesamte Anlagen-Lebensdauer von mindestens 20.000 Betriebsstunden, was etwa 12 Heizperioden entspricht, sicher und wartungsfrei laufen,

da sie später im geschweißten Druckbehälter eines Serienmodells nicht mehr zerstörungsfrei zugänglich sind. Da es kein Zeitrafferverfahren zum Studium von Verschleißprozessen gibt, muss in Echtzeit nachgewiesen werden, dass die Vuilleumier-Wärmepumpe während dieses Zeitraums zuverlässig arbeitet.

Von den verschiedenen 4 kW-Versuchsmustern befindet sich eine seit Frühjahr 1998 im Dauertest, ebenso drei Systeme mit Nennleistungen von 20 kW: ein Funktionsmuster sowie zwei baugleiche, weiterentwickelte Prototypen (Dauerläufer I und II). Diese beiden Maschinen verhalten sich geräusch- und schwingungsarm und bewähren sich seit mehr als 10.000 Betriebsstunden unter realitätsnahen, vom Prüfstand simulierten Einsatzbedingungen. Ihre Verfügbarkeit betrug bis zum Projektende, also während der ersten rund 6500 Betriebsstunden, 83% bzw. 87%. Betriebsunterbrechungen waren in einem Fall auf einen Fertigungsfehler in der Kolbenstange zurückzuführen, sonst auf Störungen in peripheren Prüfstandaggregaten oder bedingt durch Getriebeuntersuchungen (Fettprobe, Sichtinspektion). Sie waren nicht der Wärmepumpen-Funktion selbst anzulasten. Die bisherigen Ergebnisse zeigen zusammen mit zusätzlichen Untersuchungen lebensdauerkritischer Komponenten, dass die geforderte Betriebsstundenzahl erreicht wird.

Abb 7 Typische Prozessgrößen einer 4 kW-Versuchsmaschine mit Außenluft als Umweltwärmequelle

Erhitzerkopftemperatur T_H (Jahresmittel)	608°C
Wassertemperatur T_W (Jahresmittel)	35,6°C
Soletemperatur T_K (Jahresmittel)	-2,5°C
Brennerleistung (bzgl. H_u) \dot{Q}_{Br}	2,61 kW
Antriebswärmestrom \dot{Q}_H	2,03 kW
Heizleistung des Prozeß \dot{Q}_W	3,29 kW
Zusätzl. Heizleistung des Rauchgasrest-WÜ \dot{Q}_{rest}	0,59 kW
Umweltwärmeaufnahme \dot{Q}_K	1,26 kW
Leistungszahl des Prozeß $\epsilon_{Pr} = \dot{Q}_W / \dot{Q}_H$	1,62
Leistungszahl Gesamtsystem $\epsilon_{ges} = (\dot{Q}_W + \dot{Q}_{rest}) / \dot{Q}_{Br}$	1,48

Das simulierte Einsatzgebiet des 4 kW-Versuchsmusters ist eine Fußbodenheizung mit Vorlauftemperatur von 35°C. Die Leistungszahlen beziehen sich auf den jahresbezogenen, mittleren Betriebspunkt. Der Brennerwirkungsgrad der 4kW-WVP ist mit 78% nicht besonders gut.

Abb 8 Primärenergieeffizienz im Vergleich mit konventionellen Heizgeräten

	Fußbodenheizung 40°C/30°C	Niedertemperaturheizung 55°C/45°C	Radiatorheizung 75°C/60°C
Öl/Gas-Heizkessel	94 %	94 %	94 %
Gas-Brennwertkessel	108 %	107 %	105 %
20kW Vuilleumier-Wärmepumpe (gemessen)	161 %	159 %	145 %
20kW Vuilleumier-Wärmepumpe (sicher erreichbar)	168 %	162 %	152 %

► Ausblick

Selbst gegenüber gut ausgelegten konventionellen Heizsystemen sind Primärenergieeinsparungen von bis zu 44 % realisierbar. Die Wärmepumpe benötigt kein ozon- und klimawirksames Kältemittel, als Arbeitsgas wird sicherheitstechnisch wie ökologisch unbedenkliches Helium verwendet. Der im Rahmen des Projekts weiterentwickelte Erdgas-Brenner emittiert äußerst geringe Schadgasmengen.

Zwei 20 kW-Prototypen bewährten sich bislang im Dauertest über jeweils rund 10.000 Betriebsstunden. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit dieser Aggregate unter simulierten, realistischen Einsatzbedingungen wurde damit nachgewiesen. Abschließende Untersuchungen zum langfristigen Verschleiß der bewegten Baukomponenten stehen noch aus.

Die Entwicklung zur Serienproduktion würde nach einer Herstelleraussage voraussichtlich drei Jahre beanspruchen. Um die Amortisationszeit der Produktmehrkosten - im Vergleich zur Brennwerttechnik - auf 3 bis 5 Jahre zu begrenzen, müssen bis zur Serienproduktion noch zahlreiche Details optimiert werden. So müssen z.B. günstigere Produktionskosten, ggf. unter Hinnahme eines reduzierten Bauteil- oder Gesamtwirkungsgrads, mit den eingesparten Energiekosten des Investors gegengerechnet werden müssen.

Die Vuilleumier-Prototypen weisen eine Nennleistung von 20 kW auf. Mit erprobten Skalierungsmodellen könnten 45 kW-Prototypen mit mäßigem Zusatzaufwand entwickelt werden. Noch höhere Leistungen ließen sich allenfalls mit einem prinzipiell anderen Baukonzept realisieren, denn das wachsende Eigengewicht der beweglichen Bauteile induziert andere Materialbelastungen. Bei Kleinanlagen um 5 kW-Nennleistung erhöhen sich die spezifischen Kosten unverhältnismäßig stark aufgrund der in allen Leistungsklassen notwendigen Peripheriegeräte (z.B. zur Regelung).

Geschätzt wird, dass sich die kapitalintensive Investition in eine Serienproduktion ab einer Jahresstückzahl von rund 20.000 Geräten einer Nennleistung lohnt. Absatzmärkte werden vorwiegend in Gebieten Ost- und Mitteleuropas (D, NL) mit guter Erdgasinfrastruktur und mitteleuropäischem Klima gesehen. Ein großes Marktpotential bietet die Substitution von Altanlagen. Grundsätzlich lassen sich Vuilleumier-Wärmepumpen auch mit anderen Befeuerungsarten betreiben, sie eignen sich auch zur Klimatisierung von Gebäuden. Mit der für 2001 vorgesehenen Energieeinsparverordnung erhält der Planer einen größeren Gestaltungsspielraum wie er den Primärenergieverbrauch eines Gebäudes senken will, ob durch Wärmedämmung, Solarnutzung oder besonders effiziente Heizanlagen wie z.B. die Vuilleumier-Wärmepumpe.

► PROJEKTADRESSEN

- BVE Thermolift GbR, Aachen. Joint Venture der Viessmann Werke GmbH & Co sowie der Robert Bosch GmbH.
- Viessmann Werke GmbH & Co, Dr. K. Heikrodt, Postfach 10, 35105 Allendorf.
- Robert Bosch GmbH, Geschäftsbereich Thermotechnik, Junkersstr. 20-24, 73243 Wernau
- Universität Dortmund, Fachbereich Chemietechnik, Lehrstuhl für Thermodynamik.
- Fraunhofer Inst. für Angewandte Materialforschung, Dresden
- TU Braunschweig, Inst. für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik.
- Dansk Teknologisk Institut (DTI), Arhus, Dänemark

► ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Literatur

- Dzubiella, M. (Viessmann Werke GmbH & Co, Allendorf): Regeneratives Heizen und Kühlen mit halbem Brennstoffverbrauch. Abschlussbericht des BMWi-Forschungsvorhabens 0326947B. April 1997.
- Heikrodt, K.; Heckt, R., Koch, Thomas u.a. (BVE Thermolift GbR, Aachen): Regeneratives Heizen und Kühlen. Abschlussbericht des BMWi-Forschungsvorhabens 0326947A. Juni 1997.
- Heikrodt, K.; Heckt, R. (BVE Thermolift GbR, Aachen): Gasbetriebene Wärmepumpe zur monovalenten Raumbeheizung und Trinkwassererwärmung. Ein greifbarer Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Abschlussbericht des BMWi-Forschungsvorhabens 0326947E („Regeneratives Heizen und Kühlen II“). Februar 1999.

PROJEKTORGANISATION

- **Förderung des Vorhabens**
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
Godesberger Allee 185, 53175 Bonn
- **Projektbegleitung im Auftrag des BMWi**
Projektträger Biologie, Energie, Umwelt (BEO)
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Claus Börner
52425 Jülich
- **Förderkennzeichen**
0326947 A-E

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**
Susanne Schoofs
Dr. Franz Meyer

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
Internet: <http://bine.fiz-karlsruhe.de>