

Gasbetriebene Wärmepumpe zur monovalenten Raumbeheizung und Trinkwassererwärmung

Ein greifbarer Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen

K. Heikrodt

R. Heckt

BVE Thermolift GbR
Dennewartstr. 27
52068 Aachen

Aachen, 1999

Vorwort

Das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie hat unter dem Förderkennzeichen 0326947E das Vorhaben "Regeneratives Heizen und Kühlen II" im Zeitraum vom 1.11.1996 bis 31.1.1999 gefördert.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Vuilleumier-Wärmepumpe zur Raumbeheizung und deren experimentelle Untersuchung als Wärmeerzeuger für ein Heizungssystem in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Als Rahmenbedingungen wurden neben einer monovalenten Betriebsweise auch die mögliche Anbindung an bestehende Heizungssysteme, sogar Radiatorheizungen mit $75^{\circ}\text{C} / 60^{\circ}\text{C}$, Trinkwassererwärmung und Luft als Wärmequelle festgelegt. Leistungszahl, Herstellkosten, Wartungsfreiheit und Lebensdauer wurden in Konzeption, Auslegung und Konstruktion berücksichtigt.

Die Projektleitung und Koordination des Vorhabens hatte die BVE Thermolift GbR, Aachen, die mit dem Lehrstuhl für Thermodynamik, Fachbereich Chemietechnik der Universität Dortmund die Auslegung, Entwicklung und Erprobung der Wärmepumpen durchführte. Konstruktion und Bau der Versuchs- und Dauerlaufmuster und der Dauerlaufprüfstände sowie die umfassenden experimentellen Untersuchungen der Vuilleumier-Wärmepumpen wurden von BVE Thermolift GbR durchgeführt. Die thermodynamische Auslegung, Prozeßsimulation, das Finden von Regeneratormaterialien und die Optimierung der Regeneratoren waren die Hauptaufgaben des Lehrstuhls für Thermodynamik der Universität Dortmund. Als Partner haben die Viessmann Werke GmbH & Co, Allendorf, die Entwicklung, den Bau und die Erprobung der schadgasarmen Brenner mit Luftvorwärmung übernommen. Der Schwerpunkt der Arbeiten der Robert Bosch GmbH, Stuttgart, waren die Erstellung einer PC-basierten Regelung für den Funktionsprüfstand und der Aufbau eines Steuer-schranks für den Dauerlaufprüfstände. Das Dansk Teknologisk Institut (DTI), Arhus, übernahm die Überprüfung von Aluminiumprofilen auf ihre Tauglichkeit als Helium/Wasser-Wärmeübertragerkomponente unter schwellender Belastung. Die systematischen Untersuchungen von geradführenden Getriebevarianten für die Vuilleumier-Wärmepumpe wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Das Fraunhofer Institut für Angewandte Materialforschung, Dresden, erprobte die Möglichkeiten, Drahtfasern für Regeneratoren aus schmelzextrudierten Metallfasern herzustellen.

Der vorliegende Bericht ist die Zusammenfassung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse dieses Forschungsvorhabens. Es konnte in diesem Vorhaben nachgewiesen werden, daß eine Vuilleumier-Wärmepumpe alle Anforderungen an einen Wärmeerzeuger zur monovalenten Wohnraumbeheizung mit Trinkwassererwärmung in Verbindung mit einer Pumpenwarmwasserheizung erfüllen kann. Als Wärmequelle wurde dabei die Außenluft verwendet. In Anlehnung an den Norm-Nutzungsgrad nach

DIN 4702 Teil 8 wurden unter Berücksichtigung der Wärmequelle Außenluft eine Norm-Leistungszahl zwischen 1,5 für Radiator-Heizungssysteme mit einer maximalen Vor-/Rücklauftemperaturspreizung von 75°C / 60°C und 1,7 für Fußboden-Heizungssysteme mit einer maximalen Vor-/Rücklauftemperaturspreizung von 40°C / 30°C gemessen. Die beiden Dauerläufer mit einer Heizleistung bis zu 33 kW und die 4 kW Wärmepumpe erreichten jeweils bis Ende dieses Vorhabens Laufzeiten von mehr als 6.000 Betriebsstunden, die kumulierte Laufzeit der Wärmepumpen addiert zu den Laufzeiten der Funktionsmuster ergeben einen gesamte Versuchserfahrung von mehr als 20.000 Betriebsstunden.

Allen Mitarbeitern und den studentischen Hilfskräften sei an dieser Stelle herzlichst für ihre Arbeit, ihr Interesse und ihr großes Engagement gedankt. Unser spezieller Dank gilt:

Herrn Dipl.-Ing. Th. Koch, *BVE Thermolift GbR, Aachen,*

Herrn Dipl.-Ing. M. Graaf, *BVE Thermolift GbR, Aachen,*

Herrn Dipl.-Ing. H. Dykmann, *BVE Thermolift GbR, Aachen,*

Herrn Dipl.-Ing. A. Hölscher, *BVE Thermolift GbR, Aachen,* und

Herrn Dr.-Ing. H.-D. Kühl, *Lehrstuhl für Thermodynamik,
Universität Dortmund,*

für ihre zielgerichtete und engagierte Projektarbeit und als Autoren von Teilberichten, die als Grundlage in diesen Abschlußbericht eingeflossen sind.

Dank möchten wir auch Herrn Dr. Lawitzka vom Bundesministerium für Wirtschaft und den Herren Dr. Boerner, Schacht, Donath und Dresia vom Forschungszentrum Jülich, BEO für die stets aufmerksame und freundliche Unterstützung aussprechen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft unter dem Förderkennzeichen 0326947E gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren:

K. Heikrodt¹

R. Heckt²

¹Dr.-Ing. Klaus Heikrodt:

Leiter der BVE Thermolift GbR
Projektleiter des Forschungsvorhabens

² Dipl.-Ing. Roman Heckt:

Laborleiter und Leiter der Berechnungsabteilung
der BVE Thermolift GbR

heute:

Viessmann Werke GmbH & Co.
Viessmannstr. 1
35107 Allendorf (Eder)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen.....	5
2.1. Vuilleumier-Prozeß.....	6
2.1.1. Idealer Prozeß.....	6
2.1.2. Realer Prozeß	8
2.1.3. Stand der Technik.....	10
2.2. 4 kW-Versuchsmaschinen.....	11
2.2.1. Gesamtkonstruktion.....	11
2.2.2. Meßergebnisse.....	15
2.3. Vuilleumier-Wärmepumpe zur Wohnraumbeheizung.....	18
3. 20 kW Vuilleumier-Wärmepumpe.....	25
3.1. Thermodynamische Auslegung	25
3.1.1. Ziele und Vorüberlegungen	26
3.1.2. Optimale Erhitzerkopftemperatur.....	26
3.1.3. Auswahl eines geeigneten Brenners	30
3.1.4. Untersuchungen zur Wahl von Druck, Drehzahl und Hubvolumen... 32	
3.1.5. Optimierung von Drehzahl und Totvolumen	36
3.1.6. Auslegungsdaten.....	38
3.2. Gesamtkonstruktion.....	39
4. Experimentelle Untersuchungen	47
4.1. Wärmepumpen-Prüfstände	47
4.1.1. Aufbau	47
4.1.2. Datenerfassung und Fehlerbetrachtung	51
4.2. Inbetriebnahme der ersten 20 kW Vuilleumier-Wärmepumpe.....	54
4.2.1. Vorbemerkungen	54
4.2.2. Bewegungsapparat.....	54
4.2.3. Wärmetechnische Aggregate.....	60
4.3. Dauerlaufuntersuchungen	61
4.3.1. Laufzeiten	62
4.3.2. Dichtigkeit	68
4.3.3. Getriebeverschleiß.....	70

5.	<i>Vergleich der Versuchsergebnisse mit anderen Heizsystemen.</i>	73
5.1.	Wohnraumbeheizung	73
5.1.1.	Ableitung der Norm-Leistungszahl aus dem Norm-Nutzungsgrad	73
5.1.2.	Fußbodenheizung (40°C / 30°C)	74
5.1.3.	Niedertemperaturheizung (55°C / 45°C)	77
5.1.4.	Radiatorheizung (75°C / 60°C)	78
5.1.5.	Vergleich mit konventionellen Heizgeräten	80
5.1.6.	Vergleich mit anderen Wärmepumpen	81
5.2.	Trinkwassererwärmung	84
6.	<i>Erhitzerkopf</i>	87
6.1.	Aufgaben, Begriffsbestimmung	87
6.2.	Stand der Technik	87
6.2.1.	Rohrbündel-Erhitzerkopf	88
6.2.2.	Ringspalt-Erhitzerkopf	90
6.2.3.	Sonderbauformen	91
6.3.	Nachteile der bisherigen Erhitzerköpfe	92
6.4.	Der ‘Comferral’-Ring-Erhitzerkopf	93
6.4.1.	Werkstoffauswahl	95
6.4.2.	Wärmetechnische Auslegung	102
6.4.3.	Festigkeitsauslegung	105
6.4.4.	Gesamtanordnung	112
6.4.5.	Temperaturverteilung am Erhitzerkopf	114
6.5.	Geeignete Fertigungsverfahren	123
6.5.1.	Urformverfahren	123
6.5.2.	Fügeverfahren	126
6.5.3.	Fazit	126
7.	<i>Wärmeübertrager</i>	127
7.1.	Anforderungen	127
7.2.	Optimierung	128
7.2.1.	Konvektiver Wärmeübertragung	128
7.2.2.	Wärmeleitung durch die drucktragende Wand	130
7.2.3.	Konstruktive Zielsetzung	131
7.3.	Sternprofil-Wärmeübertrager	132
7.4.	Aluminium-Kammerprofil-Wärmeübertrager	137
7.5.	Aluminium-Korrosionsuntersuchungen	138
7.5.1.	Konzeption	139
7.5.2.	Versuchsaufbau	139
7.5.3.	Versuchsdurchführung	141
7.5.4.	Ergebnisse	142
7.5.5.	Fazit	144

8. Regenerator	145
8.1. Auslegung und Dimensionierung der Regeneratoren	146
8.2. Die experimentelle Umsetzung	148
8.2.1. Die Meßtechnik	148
8.2.2. Die Herstellung der Regeneratormatrizen	150
8.3. Versuchsergebnisse.....	152
8.3.1. Homogenitätsuntersuchungen	152
8.3.2. Experimentell ermittelte Temperatur- und Druckverlustverläufe.....	154
8.3.3. Vergleich der experimentell ermittelte Temperatur- und Druckverlustverläufe mit Simulationsrechnungen	157
8.3.4. Der Regeneratorwirkungsgrad.....	162
8.3.5. Der Druckverlustbeiwert	165
8.4. Bewertung der unterschiedlichen Regeneratorkonzepte.....	168
8.5. Herstellverfahren für schmelzextrahierte Fasern	170
8.5.1. Zielsetzung	171
8.5.2. Verbesserung der Temperaturkontrolle an der Extraktionsstelle.....	171
8.5.3. Extraktionsversuche	172
8.5.4. Zusammenfassung und Ausblick.....	181
9. Getriebe.....	183
9.1. Anforderungen.....	183
9.2. Kreuzschubkurbelgetriebe	185
9.3. Massenausgleich des Kreuzschubkurbelgetriebes.....	186
9.4. Lenkergeradföhrung.....	193
10. Dynamische Dichtungen.....	199
10.1. Funktionen und Anforderungen	200
10.2. Auswahl	202
10.2.1. Positionierung.....	202
10.2.2. Materialauswahl	203
10.2.3. Konstruktive Gestaltung.....	204
10.3. Experimentelle Ergebnisse.....	205
10.3.1. Verschleißuntersuchung	206
10.3.2. O-Ring hinterlegter Gleitring	208
10.3.3. Twinring	209
10.3.4. Lippendichtring	210

11. Seriennahe 20 kW Vuilleumier-Wärmepumpe.....	211
11.1. Prozeßauslegung und Gehäusemaße.....	213
11.2. Erhitzerkopf	217
11.3. Regeneratoren	218
11.4. Getriebe.....	218
11.5. Verdränger	221
11.6. Dynamische Dichtungen	221
11.7. Gesamtanlage	221
12. Zusammenfassung	223
13. Literatur.....	225
14. Anhang.....	231

1. Einleitung

Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesteckt, die anthropogenen CO₂-Emissionen bis zum Jahre 2005 gegenüber dem Stand von 1990 um 25% zu reduzieren. Die Analyse der in der Bundesrepublik Deutschland verursachten CO₂-Emissionen zwischen 1990 und 1998 zeigt, daß bisher lediglich eine Reduktion von 13 % erreicht wurde /1/. Die temperaturbereinigte Betrachtung - eine Kompensation des milden Winters im Jahre 1990 - ergibt immerhin eine Reduktion um 14 %. Diese Erfolge lassen sich durch den Rückgang des Primärenergieverbrauchs im selben Zeitraum um 5 % /1/ als Folge der veränderten Industrieregion in Ostdeutschland und im wesentlichen durch die Substitution kohlenstoffreicher Energieträger, wie z.B. der Kohle, durch kohlenstoffarme Energieträger, wie dem Erdgas erklären, welches im Augenblick noch reichlich verfügbar ist /2/. Langfristig wird man aber allein aus Ressourcengründen wieder auf die Kohle zurückgreifen müssen, so daß eine echte Minderung der CO₂-Emissionen nur durch eine nachhaltige Verbrauchsminimierung möglich ist und das von der Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland gesteckte Ziel so nicht nachhaltig erreicht wird.

Die Struktur des Energieverbrauchs in Deutschland weist für 1997 nach /3/ einen Primärenergieverbrauch von 14.458 Petajoule aus, demgegenüber steht ein Endenergieverbrauch von 9.470 Petajoule, der sich in die vier Gruppen Industrie mit 25,9 %, Haushalt mit 30,0 %, Verkehr mit 27,9 % und Kleinverbraucher mit 16,2 % aufteilt. Eine Aufschlüsselung nach Bedarfsarten zeigt, daß zur Raumbeheizung von den Haushalten 23,3 %, von Kleinverbrauchern 7,8 % und von der Industrie 2,6 % des gesamten Endenergieverbrauchs aufgewandt wird. Für Prozeßwärmern unter 100 °C - wie Warmwasser - wenden die Haushalte 4,4 %, die Kleinverbraucher 4,0 % und die Industrie 7,5 % der Endenergie auf. In Summe resultiert daraus, daß in der Bundesrepublik Deutschland von den 9.470 Petajoule jährlichem Endenergieverbrauch die Hälfte (49,6 %) in Wärmern unterhalb von 100 °C umgewandelt wird.

Eine nachhaltige Reduktion des Endenergieverbrauchs und der damit verbundenen anthropogenen CO₂-Emissionen in dem großen Bereich der Niedertemperaturwärmern ist auf zwei Wegen denkbar. Der erste Weg verlangt nach einer nennenswerten Reduktion des Bedarfs an Niedertemperaturwärmern durch aufwendigere Isolationen und intelligenteres Energiemanagement im Wohnungsbestand. Da 1996 in Deutschland 82,0 Millionen Menschen in einem Wohnungsbestand von ca. 36,5 Millionen Wohnungen lebten, von denen jährlich nur ca. 1,5% durch neue Wohnungen mit einem verbesserten Energiestandard ersetzt werden, führt dieser Weg jedoch erst in ferner Zukunft zu einer feststellbaren Reduktion der anthropogenen CO₂-Emissionen. Auf dem zweiten Weg kann bei konstantem Bedarf an Niedertemperaturwärmern durch eine nennenswerte Steigerung der Effizienz bei der Energieumwandlung der Endenergie-

verbrauch und damit die anthropogenen CO₂-Emissionen maßgeblich reduziert werden. Aufgrund der im Vergleich zum Wohnungsbestand kurzen Lebensdauer der energiewandelnden Aggregate, kann auf diesem Weg in kürzester Zeit die geforderte Reduktion der CO₂-Emissionen erreicht werden.

Die Steigerung der Energieeffizienz der Heizgeräte, die auch maßgeblich an der Trinkwassererwärmung beteiligt sind, führt in diesem Bereich der Niedertemperaturwärmen ohne Komforteinbußen zu der geforderten Reduktion der CO₂-Emissionen.

Eine thermodynamische Betrachtung der bestehenden Heizungstechnologie, in der fossile Energieträger verbrannt werden, um Niedertemperaturwärme zu erzeugen, zeigt, daß dort das große Arbeitspotential der durch die fossilen Energieträger erwärmten Rauchgase ungenutzt bleibt. Im Gegensatz dazu nutzen thermisch getriebene Wärmepumpen das Arbeitspotential der heißen Rauchgase (Exergie) um einen Umgebungswärmestrom (Anergie) auf ein höheres und somit für die Erstellung der Niedertemperaturwärme nutzbares Temperaturniveau zu transformieren. Dadurch ist die bereitgestellte Niedertemperaturwärme (der Nutzen) derartiger Anlagen größer als die mit dem Brennstoff zugeführte chemisch gebundene Energie (dem Aufwand).

In dem Forschungsvorhaben "Regeneratives Heizen und Kühlen I" /4/ konnte gezeigt werden, daß aus der Gruppe der regenerativen Gaskreisprozesse sich der Vuilleumier-Prozeß am besten für die Umsetzung in einer thermisch getriebenen Wärmepumpe für die Hausheizung eignet.

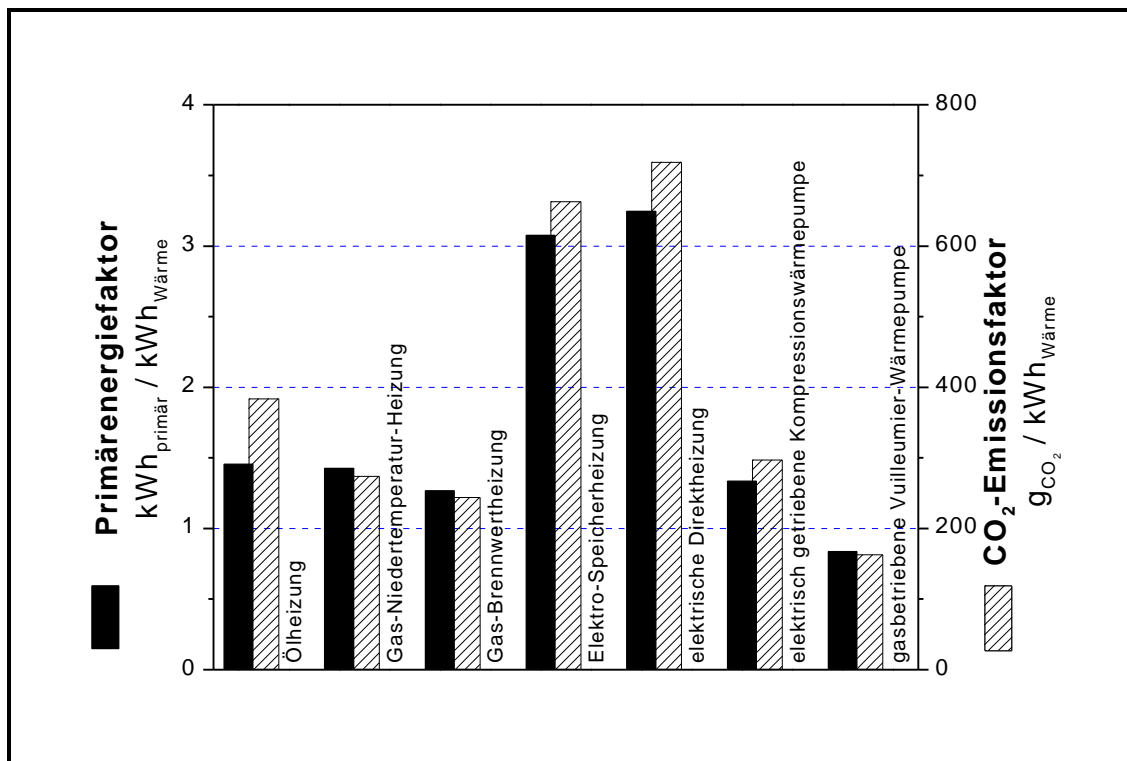


Abb. 1.1: Primärenergieverbrauchs-faktoren verschiedener Heizungssysteme (/5/, Vuilleumier-Wärmepumpe: $e_{ges} = 1,5$, Verteilungsverluste 10%)

Ein Vergleich des Primärenergieverbrauchs und der damit verbundenen CO₂-Emissionen der bestehenden Heizungstechnologie mit einer Vuilleumier-Wärmepumpe ist in Abb. 1.1 dargestellt. Die Werte sind aus /5/ entnommen und um eine gasbetriebene Vuilleumier-Wärmepumpe mit einer realisierbaren Leistungszahl von $\epsilon = 1,5$ ergänzt. Der dargestellte Primärenergiefaktor ist das Verhältnis von erzeugter Wärme zu eingesetzter Primärenergie. Mit der Vuilleumier-Wärmepumpe kann der Primärenergieverbrauch gegenüber einem Brennwertgerät um 34 % und gegenüber einer elektrisch angetriebenen Kompressions-Wärmepumpe um 37 % senken werden. Das spiegelt sich auch bei den CO₂-Emissionen wider. Eine mit Erdgas betriebene Vuilleumier-Wärmepumpe ist mit 163 g/kWh deutlich unterhalb den Werten für Brennwertgeräte mit 244 g/kWh und elektrisch getriebenen Kompressions-Wärmepumpen mit 297 g/kWh. Eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 33 % bzw. 45 % ist somit mit dieser Technologie erreichbar und damit auch die Ziele der Bundesregierung.

Um einen flächendeckenden Einsatz dieser neuen Technologie im Wohnungsbestand in Deutschland zu erreichen, muß dieses Aggregat neben den thermodynamischen Kriterien auch eine Reihe weiterer Anforderungen erfüllen. Im Regelfall befinden sich in Ein- und Mehrfamilienhäusern Pumpenwarmwasserheizungsanlagen und für die Trinkwassererwärmung ein entsprechender Speicher. Konventionelle Heizgeräte erzeugen die Heizenergie überwiegend in monovalenter Betriebsweise. Eine Vuilleumier-Wärmepumpe für den Wohnungsbestand muß daher in der Lage sein, in monovalenter Betriebsweise Vorlauftemperaturen von bis zu 75 °C für Radiatorheizung und Trinkwassererwärmung bereitzustellen. Die erforderliche Heizleistung wird in den überwiegenden Fällen im Bereich zwischen 18 kW und 35 kW liegen. Als sekundäre Wärmequelle muß die Außenluft verwendet werden; damit muß die Wärmepumpe bei Außenlufttemperaturen zwischen - 15 °C und +15 °C konstante Heizleistung erbringen. Vergleichbar zu konventionellen Heizgeräten muß eine wartungsarme und sichere Betriebsweise von mehr als 20.000 h gewährleistet sein. Darüber hinaus müssen die Kosten für die Wärmepumpe so gering sein, daß sich für den Betreiber die Anschaffung aus wirtschaftlicher Sicht lohnt.

Es konnte in diesem Forschungsvorhaben nachgewiesen werden, daß eine Vuilleumier-Wärmepumpe die genannten Anforderungen erfüllen kann. Der vorliegende Abschlußbericht faßt die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zusammen. Die Auslegung und Konstruktion der Versuchsmaschinen mit Nennleistungen zwischen 20 kW und 33 kW wird detailliert beschrieben und die Funktionsergebnisse und erreichten Leistungszahlen in Anlehnung an die für konventionelle Heizgeräte maßgebliche Richtlinie DIN 4702 Teil 8 dargestellt. Die bisher erreichten Dauerlaufergebnisse an Versuchsmustern und Komponenten werden ebenso dargestellt wie ein möglicher Seriententwurf, der die gesteckten Kostenziele erreicht.