

**Entwicklung und Simulation einer mobilen, trockenen
Absorptionskälteanlage unter Nutzung von Motorabwärme**

Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Werner Hünemörder
aus Stuttgart

Hauptberichter: em. Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen
Tag der mündlichen Prüfung: 21.03.2002

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Universität Stuttgart
2002

Kurzfassung

Werner Hünemörder

Entwicklung und Simulation einer mobilen trockenen Absorptionskälteanlage mit Nutzung von Motorabwärme

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung und Simulation einer trockenen Absorptionskälteanlage zum Einsatz in der Transportkühlung beschrieben. Da zum Antrieb die bisher ungenutzte Abgaswärme des Motors verwendet wird, kann Primärenergie eingespart und damit der Schadstoffausstoß des Fahrzeugs verringert werden. Diese Art der Kälteerzeugung erfolgt diskontinuierlich in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird flüssiges Kältemittel verdampft, wobei dem Kühlraum Wärme entzogen wird. Der Kältemitteldampf wird anschließend von einem Salz, dem sogenannten Absorbens, unter Abgabe von Wärme chemisch gebunden (absorbiert). Im zweiten Schritt wird das Absorbens durch das Abgas beheizt und das Kältemittel ausgetrieben (desorbiert). Das gasförmig ausgetriebene Kältemittel wird unter Abgabe von Wärme an die Umgebung wieder verflüssigt. Derartige Anlagen zeichnen sich durch ihre Robustheit und einen einfachen Anlagenaufbau mit wenigen bewegten Teilen aus.

Es wird die Eignung verschiedener Arbeitsstoffpaare diskutiert. Für das ausgewählte Arbeitsstoffpaar Manganchlorid/Ammoniak ($MnCl_2/NH_3$) werden eigene Messergebnisse der Temperaturleitfähigkeit und des Wärmeeindringkoeffizienten der Ammoniakate dargestellt.

Da keine Angaben über die Abgastemperaturen von LKW's im normalen Fahrbetrieb vorlagen, wurden von einem LKW-Hersteller Messfahrten zur Bestimmung der Abgastemperatur durchgeführt. Daraus wurde die zum Antrieb der Kälteanlage zur Verfügung stehende Abgaswärme ermittelt. Es wird festgestellt, dass die Abgaswärme nur im Langstreckenverkehr zum Antrieb einer trockenen Absorptionskälteanlage ausreicht.

Verschiedene Anlagen- und Antriebskonzepte werden unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen im Fahrzeug und der begrenzten zur Verfügung stehenden Abgaswärme erarbeitet und näher betrachtet. Für die ausgewählte Variante mit direkter Beheizung der Reaktionsbehälter (Reaktoren) durch das Abgas werden unterschiedliche Reaktorbauformen entworfen.

Ein Programm zur Simulation des stark instationären Verhaltens der Reaktoren der Absorptionskälteanlage wird vorgestellt. Grundlage bildet die numerische Berechnung eines quasi-dreidimensionalen Temperaturfeldes mit Wärmequellen und -senken mit Hilfe des Finite-Differenzen-Verfahrens. Es wird ein Verfahren zur dynamischen Steuerung der Zeitschrittweite beschrieben, das die Zeitschrittweite auf den größten Wert einstellt, bei dem gerade keine Instabilität der Berechnung auftritt. Die Simulationsergebnisse zur Bewertung der unterschiedlichen Reaktorbauformen werden ausführlich dargestellt.

In einer Versuchsanlage wurden Modellreaktoren auf ihre Effektivität und Zeitstandfestigkeit hin untersucht. Es wurden über 1000 Absorptions-/Desorptionszyklen durchgeführt, ohne dass eine nennenswerte Verschlechterung der Eigenschaften des Arbeitsstoffpaares festgestellt werden konnte. Die Überprüfung des Simulationsprogramms mit den Messwerten der Modellreaktoren zeigt eine gute Übereinstimmung.

Abstract

Werner Hünemörder

Development and simulation of a mobile dry absorption cooling machine driven by the vehicle exhaust

This work presents the development and simulation of a dry absorption refrigeration system to be used in transport refrigeration. The still unused heat of the engine's exhaust gas is taken to drive the refrigeration system. Primary energy can be saved and thus the pollutant output of the vehicle can be reduced.

This type of refrigeration system is working in two steps. In the first step, liquid refrigerant is evaporated by removing heat from the cooling compartment. The gaseous refrigerant is absorbed from the salt, the so-called absorbent. In the second step, the absorbent is heated by the exhaust gas to desorb the refrigerant which is condensed by dissipating heat to the ambient.

Such systems are characterised by their high robustness and the simple set-up of the refrigeration system with a few moving parts only.

The suitability of different absorbents is discussed. Experimental results of the thermal diffusivity and thermal conductivity of the ammoniates are presented for the selected working pair manganese-chloride/ammonia ($\text{MnCl}_2/\text{NH}_3$).

Because no data of the exhaust gas temperatures of trucks under normal driving conditions are given, a truck manufacturer carried out measuring rides to determine the exhaust gas temperature. The available exhaust gas heat has been calculated with these data. The result was, that the exhaust gas heat is only sufficient in long-distance rides to drive the refrigeration system.

Various system and driving concepts are discussed for the special conditions in a moving vehicle and the limited exhaust heat. Different designs of reaction chambers (so called reactors) are developed with direct heating of the reactors by the exhaust gas.

A new computer program has been developed to simulate the transient behaviour of the reactors of the absorption refrigeration system. This model is based on the numeric calculation of a quasi-three-dimensional temperature field with heat sources and heat sinks using the finite difference method. A procedure for the dynamic control of the time increments during the iteration is described. This procedure adjusts the time increments to that maximum value for which no instability of the calculation occurs. Simulations of different reactor constructions were carried out in order to check their suitability for the mobile use.

Long-term investigations and suitability tests were made with various small reactors in a pilot plant. In more than 1000 absorption/desorption cycles there occurred no considerable degradation of the working pair. There is a good agreement between the simulation results and the measured data for these small reactors.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Kurzfassung	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Nomenklatur	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Wissenschaftlicher und technischer Stand	3
3 Aufbau und Funktionsweise der trockenen Absorptionskälteanlage.....	6
3.1 Komplexverbindungen	7
3.2 Gleichgewichtsreaktion	8
4 Auswahl des Arbeitsstoffpaares.....	10
4.1 Das Kältemittel	10
4.2 Das Absorptionsmittel	10
5 Stoffwerte und Eigenschaften des Arbeitsstoffpaares.....	16
5.1 Die Wärmeleitfähigkeit λ	16
5.2 Der Wärmeeindringkoeffizient b	17
5.3 Die Temperaturleitfähigkeit a	18
5.4 Der Kontaktkoeffizient K	18
5.5 Die volumetrische Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$	19
5.6 Die Dichte ρ	19
5.7 Die Reaktionsgeschwindigkeit.....	20
5.8 Die Dissoziationsdruckkurve	21
6 Ermittlung der zur Verfügung stehenden Energie	24
7 Korrosionsuntersuchung	28
8 Konzeption der Anlage.....	29
8.1 Anlagenaufbau	29
8.1.1 Anlage mit überflutetem Verdampfer	29
8.1.2 Anlage mit trockener Verdampfung	30
8.2 Art der Beheizung	32
8.2.1 Indirekte Beheizung.....	32
8.2.2 Direkte Beheizung	33
8.3 Zyklische Umschaltung	34
8.4 Abtauung.....	38
8.4.1 Abtauung mit Umgebungsluft	38
8.4.2 Heißgasabtauung	39
8.5 Bewertung der Konzepte.....	40
8.6 Werkstoffauswahl.....	41
8.7 Konzept der Gesamtanlage.....	44
8.8 Verunreinigung des Abgaswärmeübertragers	44

9	Detaillösungen zum Reaktoraufbau.....	46
9.1	Rohrreaktor.....	47
9.1.1	Rohrreaktor mit Innen- und Außenrippen.....	48
9.1.2	Rohrreaktor mit Wärmeleitmatrix.....	49
9.2	Plattenreaktor.....	50
9.2.1	Plattenreaktor mit Sicken.....	51
9.2.2	Plattenreaktor mit Streckgitter und äußerer Abstützung.....	52
10	Simulationsprogramm.....	55
10.1	Aufbau.....	55
10.1.1	Simulation der Reaktoren.....	55
10.1.2	Berechnung des instationären zweidimensionalen Temperaturfeldes mit Wärmequellen und -senken.....	56
10.1.2.1	Finite-Differenzen-Verfahren.....	56
10.1.2.2	Die energetische Bilanzierung des Volumenelementes.....	57
10.1.2.3	Lösung des Differentialgleichungssystems.....	60
10.1.2.4	Zeitschrittweitensteuerung.....	61
10.1.3	Iteration der Wandtemperatur.....	65
10.2	Gesamtsimulation.....	67
10.2.1	Hilfsprogramme.....	68
11	Simulationsergebnisse.....	70
11.1	Modellierung der Reaktoren.....	70
11.1.1	Reaktor aus ebenen Platten.....	70
11.1.2	Rippenrohrbündel.....	71
11.1.3	Plattenreaktor mit Sicken.....	72
11.1.4	Plattenreaktor mit Streckgitter und äußerer Abstützung.....	72
11.2	Ergebnisse für ausgewählte Reaktoren.....	73
11.2.1	Gesamtreaktor.....	75
11.2.2	Einzelne Segmente.....	79
11.2.2.1	1. Rohrreihe.....	80
11.2.2.2	12. Rohrreihe.....	82
11.2.3	Temperaturverlauf im Reaktor.....	84
11.2.4	Vergleich von Simulationsrechnungen für die verschiedenen Reaktoren.....	85
11.2.4.1	Rohrbündelreaktoren.....	87
11.2.4.2	Plattenreaktor mit Sicken.....	90
11.2.4.3	Plattenreaktor mit Streckgitter.....	91
11.2.4.4	Bewertung.....	92
12	Experimentelle Untersuchungen an Modellreaktoren.....	94
12.1	Versuchsaufbau.....	94
12.2	Versuchsdurchführung.....	99
12.3	Ergebnisse.....	100
12.4	Überprüfung des Simulationsprogramms.....	103
12.4.1	Modellreaktor 1.....	103

12.4.2	Modellreaktor 2	105
13	Zusammenfassung	109
14	Literaturverzeichnis	113
15	Anhang	121
15.1	Die Bestimmung von Stoffwerten mit Hilfe eine Temperaturschwingungsanlage	121
15.1.1	Das Messprinzip	121
15.1.2	Aufbau der Versuchsanlage	121
15.2	Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten und Druckverluste	124
15.2.1	Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener einphasiger Rohrströmung	124
15.2.2	Wärmeübergang an berippten Oberflächen	125
15.2.3	Wärmeübergang bei quer angeströmten Rohrbündeln	127
15.2.4	Druckverlust bei einphasiger Rohrströmung	128
15.2.5	Druckverlust bei der Strömung quer zu Rohrbündeln	129
15.2.6	Druckverlust bei der Strömung quer zu Rippenrohrbündeln	131
15.3	Zahlenwertgleichungen für Stoffwerte	132
15.3.1	NH ₃	132
15.3.1.1	Der Dampfdruck p	132
15.3.1.2	Die Dichte ρ der Flüssigkeit	133
15.3.2	Luft	133
15.3.2.1	Die Dichte ρ	133
15.3.2.2	Die dynamische Viskosität η	133
15.3.2.3	Die Wärmeleitfähigkeit λ	134
15.3.2.4	Die spezifische Wärmekapazität c_p	134
15.3.3	Abgas	134
15.3.3.1	Die Dichte ρ	134
15.3.3.2	Die dynamische Viskosität η	135
15.3.3.3	Die Wärmeleitfähigkeit λ	135
15.3.3.4	Die spezifische Wärmekapazität c_p	135
15.3.4	Thermoöl AVIA Thermofluid S	135
15.3.4.1	Die Dichte ρ	136
15.3.4.2	Die kinematische Viskosität ν	136
15.3.4.3	Die Wärmeleitfähigkeit λ	136
15.3.4.4	Die spezifische Wärmekapazität c_p	136