

**Experimentelle und theoretische Untersuchung einer
solarbetriebenen, diskontinuierlich arbeitenden
trockenen Absorptionskälteanlage**

Technische Hochschule Stuttgart
Inst. für Wärmetechnik

Inv.-Nr. A 2120

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

vorgelegt von

Alfred Erhard

aus Pforzheim

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Groll

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Februar 1997

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

1997

Kurzfassung

Alfred Erhard

Experimentelle und theoretische Untersuchung einer solarbetriebenen, diskontinuierlich arbeitenden trockenen Absorptionskälteanlage

In der vorliegenden Arbeit wird eine experimentelle und theoretische Untersuchung einer solarbetriebenen, diskontinuierlich arbeitenden trockenen Absorptionskälteanlage vorgestellt. Ausgehend von der Idee einer einfach aufgebauten Kälteanlage mit einer geringen Kälteleistung (ausreichend z.B. zur Kühlung von Medikamenten) wurde ein Prototyp aufgebaut und in einem Feldversuch getestet.

Das Grundprinzip dieser Art der Kälteerzeugung ist die chemische Absorption eines Kältemitteldampfes (z.B. Ammoniak (NH_3)) von einem Salz, dem sog. Absorbens.

Die beiden Reaktoren, in denen sich das Absorbens befindet, sind direkt in einen schwach konzentrierenden Kollektor eingebaut, um die für die Desorption des NH_3 erforderliche hohe Temperatur zu erreichen. Die Anlage besitzt kein einziges bewegtes Teil, weder im NH_3 -System, noch in einem sekundären Kühlkreislauf. Ermöglicht wird dies durch vier waagrechte Wärmeröhre. Während der Desorption erfolgt ein Wärmetransport in die Reaktoren und während der Absorption erfolgt der Wärmetransport aus den Reaktoren.

Aufgrund dieser Technik regelt sich der Prozeß vollständig selbst über die Temperaturen in den Reaktoren.

Die experimentelle Untersuchung in einem Freilandversuch hat gezeigt, daß eine trockene Absorptionskälteanlage mit geringer Leistung durch die Verwendung von Wärmeröhren ohne jegliches bewegtes Teil betrieben werden kann. Trotz der auftretenden Wärmeverluste durch die immer wiederkehrende Abkühlung und Aufheizung der Anlagenteile, wurden Wärmeverhältnisse im Bereich von 0.045 bis 0.082 bei einer durchschnittlichen Dauerkälteleistung von 15 W erreicht.

Weiterhin wird ein Rechenmodell für eine solarbetriebene trockene Absorptionskälteanlage vorgestellt. Die Grundlage der Berechnungen bildet die numerische Berechnung des Reaktors mit dem ADI-Verfahren. Das Rechenmodell basiert auf der zweidimensionalen, instationären Fourierschen Wärmeleitgleichung. Berücksichtigt werden die inneren Wärmequellen und -senken bei der chemischen Reaktion, sowie die anisotrope Wärmeleitfähigkeit der Absorbentien.

In einer Langzeituntersuchung des Arbeitsstoffpaares $\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$ wurden mehr als 2000 Zyklen bestehend aus Absorption und Desorption absolviert. Dabei nahm die zyklisierte NH_3 -Masse um ca. 6 % ab. Die Zeit, die für die Desorption von 50 % des NH_3 erforderlich ist vergrößerte sich von 47 min auf 60 min.

Mit der Langzeituntersuchung konnte gezeigt werden, daß ein problemloser Dauerbetrieb einer diskontinuierlich arbeitenden trockenen Absorptionskälteanlage über lange Zeit möglich ist.

Abstract

Alfred Erhard

Experimental and theoretical evaluation of a solar powered, discontinuously working, dry absorption cooling machine

This work presents an experimental and theoretical investigation of a solar powered, discontinuously working dry absorption cooling machine. With the objective of simplicity and autarky in mind a simple prototype with small cooling power, sufficient e.g. for vaccine cooling was built and tested.

The working principle relies on the chemical absorption of a refrigerant vapour (e.g. ammonia (NH_3)) by a salt as absorbent.

Two reactors containing the absorbent are mounted directly inside a concentrating solar collector. Thus the high temperature necessary for desorption of NH_3 will be reached. The unit contains no moving parts neither inside the NH_3 system nor inside a secondary cooling circuit. A proper operation of the desorption and absorption cycles is guaranteed by employing horizontal heat pipes. During the desorption they transport heat into the reactors and during the absorption they transport the heat of reaction out of the reactors. This results in the sorption process being completely self-regulating depending on the temperatures of the reactors.

It was shown in a field test that it is possible to run a dry absorption cooling machine without any moving parts by means of the horizontal heat pipes. In spite of the heat losses due to the recurrent heating and cooling of parts of the machine a solar COP between 0.045 and 0.082 has been reached. The average cooling power was 15 W.

Furthermore a mathematical model for a solar powered dry absorption cooling machine is presented. The model is based on the transient two-dimensional heat conduction equation in cylindrical coordinates. The volumetric heat sources and heat sinks due to the chemical reaction as well as the anisotropic thermal conductivity of the absorbent is taken into account.

In a long term investigation of the working pair $\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$ more than 2000 cycles of absorption and desorption were carried out. The 50 % reaction time (i.e. the time it took for 50 % of the NH_3 -mass to react) changed during these 2000 cycles from 47 min to 60 min. The amount of NH_3 available for the cooling cycle decreased by 6 % of the original mass. The long term investigation demonstrated the viability of the working principle of dry absorption using the working pair $\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen	VIII
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Literaturübersicht	3
2.1 Diskontinuierlich arbeitende Absorptionskälteanlagen	3
2.2 Solarbetriebene, diskontinuierlich arbeitende Absorptionskälteanlagen	4
2.3 Arbeitsstoffpaare	6
3 Funktionsweise und Grundlagen einer diskontinuierlich arbeitenden trockenen Absorptionskälteanlage	8
3.1 Grundlagen und Definitionen	8
3.2 Das Kältemittel Ammoniak	9
3.3 Anforderungen an das Arbeitsstoffpaar	10
3.4 Das Arbeitsstoffpaar $\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$	10
3.5 Darstellung des trockenen Absorptionsprozesses im $(\ln p, 1/T)$ -Diagramm	17
3.6 Funktionsweise der Absorptionskälteanlage	18
3.7 Wärmeverhältnis und Gütegrad	20
3.8 Vorteile und Nachteile diskontinuierlich arbeitender trockener Absorptionskälteanlagen	21
4 Experimentelle Untersuchungen an einer Prototypanlage	23
4.1 Versuchsaufbau	23
4.1.1 Die Kollektoren	27
4.1.2 Die Reaktoren	27
4.1.3 Die Wärmerohre	30
4.1.4 Ammoniak-Kondensator	31
4.1.5 Ammoniak-Speicher	31
4.1.6 Kühlraum mit Verdampfer	31

4.2	Meßwerterfassung und Meßgenauigkeit	
4.2.1	Temperaturmessung	
4.2.2	Druckmessung	
4.2.3	Dampfmassenstrom / Füllstand	
4.2.4	Messung der Bestrahlungsstärke	
4.3	Meßergebnisse	
4.4	Auswertung der Versuche	
4.4.1	Wärmebilanz am Solar-Absorber	
4.4.1.1	Absorption der Solarstrahlung	
4.4.1.2	Wärmeverlust durch Strahlung	
4.4.1.3	Wärmeverlust durch Konvektion	
4.4.1.4	Wärmeverlust durch Wärmeleitung	
4.4.1.5	NH ₃ -Massenstrom	
4.4.1.6	Der Wärmestrom aufgrund der Reaktion	
4.4.1.7	Änderung der inneren Energie	
4.4.1.8	Wärmestrom durch die Wärmerohre	
4.4.1.9	Ergebnisse der Wärmebilanz am Solar-Absorber	
4.4.2	Wärmebilanz am Kühlraum und am Ammoniak-Speicher	
4.4.2.1	Wärmemenge durch die Verdampfung von Ammoniak	
4.4.2.2	Verluste durch die Abkühlung auf die Kühlraumtemperatur	
4.4.2.3	Nutzbare Kältemenge und Wärmeeintrag in den Kühlraum und Speicher	
4.4.3	Beurteilung der Kälteanlage und Vergleich mit Literaturangaben	
5	Modellierung einer solarbetriebenen trockenen Absorptionskälteanlage	
5.1	Modellierung des Reaktors	
5.1.1	Numerische Berechnung des Temperaturfeldes	
5.1.1.1	Das Finite-Differenzen-Verfahren	
5.1.1.2	Energiebilanz an einem Flächenelement	
5.1.1.3	Randbedingungen	
5.1.1.4	Das ADI-Verfahren	
5.2	Modellierung der Gesamtanlage	
5.2.1	Mathematisches Modell des Sonnenkollektors	
5.2.2	Modellierung des Thermosyphons	
5.2.3	Modellierung des Ammoniak-Kondensators	
5.2.4	Modellierung des Ammoniak-Speichers und des Verdampfers	
5.2.5	Modellierung des Kühlraumes	
5.2.6	Modellierung des Sekundärkühlers	

6	Ergebnisse der Simulationsrechnungen	89
6.1	Programm zur Simulation einer solarbetriebenen, diskontinuierlich arbeitenden trockenen Absorptionskälteanlage	89
6.1.1	Eingaben vor Programmstart	89
6.1.2	Ausgaben des Rechenprogrammes	89
6.2	Vergleich von Messung und Rechnung	90
6.3	Parameterstudie	94
6.4	Wärmebilanzen	102
7	Zusammenfassung	104
8	Literaturverzeichnis	107
9	Anhang	113
Anhang A	Stoffgrößen	114
Anhang B	Anordnung der Meßfühler	116
Anhang C	Untersuchung der Langzeitstabilität des Arbeitsstoffpaares $\text{NH}_3/\text{SrCl}_2$	118
Anhang D	Struktur des Simulationsprogrammes	121
		...