

**Experimentelle Untersuchungen und regelungstechnische Optimierung einer
Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine in Kombination mit einem
solar angetriebenen Kühlsystem mit Eisspeicher**

Von der Fakultät für Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Marco Zetzsche

aus Werdau

Hauptberichter
Mitberichter

Prof. Dr. Dr.-Ing.habil. Hans Müller-Steinhagen
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung 26.10.2012

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart
2012

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	1
Kurzfassung	6
Abstract	6
1. Einleitung	7
1.1. Gliederung und Zielstellung der Arbeit	9
1.1.1. Randbedingungen	10
1.1.2. Stand der Technik	12
2. Grundlagen	15
2.1. Wärmeverhältnis und Leistungszahl	17
2.2. Arbeitsstoffpaarungen für Absorptionsanlagen	19
2.3. Absorptionskältemaschinen mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid	19
2.4. Absorptionskältemaschinen mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser	20
2.5. Mehrstufige Absorptionskältemaschinen	23
3. Versuchsanlagen	25
3.1. Aufbau der Absorptionskältemaschine	25
3.2. Funktionsweise	27
3.2.1. Prototyp 1	29
3.2.2. Prototyp 2	30
3.3. Komponenten der Absorptionskältemaschine	31
3.4. Externe Kreisläufe	37
3.5. Messtechnik	39
3.5.1. Temperaturmessung	39
3.5.2. Druck	40
3.5.3. Volumenstrom, Massenstrom und Dichte	41
3.5.4. Wärmeleistung	42
4. Versuche unter Laborbedingungen	43
4.1. Durchführung der Messungen	43
4.2. Messergebnisse	44
4.3. Regelung der Absorptionskältemaschine	46
4.3.1. Einfluss der Betriebstemperaturen auf den Tiefdruck	46
4.3.2. Regelung des Tiefdrucks	49
4.3.3. Bauform und Funktionsweise des Kältemittelexpansionsventils	53
4.3.4. Zusammenfassung	56
4.4. Interne Wärmerückgewinnung	58
4.4.1. Austreiber	58
4.4.2. Lösungsmittelwärmeübertrager (LMWÜ)	59
4.4.3. Dephlegmator	59

4.4.4. Verdampfer	60
4.4.5. Kältemittelwärmeübertrager (KMWÜ)	62
4.5. Befüllung mit Kältemittel	64
4.6. Betrieb der Membranpumpe	65
4.7. Betrieb als solar unterstützte Absorptionswärmepumpe	66
5. Solare Kühlung	69
5.1. Das Kollektorfeld	69
5.2. Eisspeicher	71
5.3. Kälteverbraucher	73
5.4. Kältenetz	74
5.4.1. Kälteträger	74
5.4.2. Betriebssicherheit	74
5.4.3. Regelung	75
5.5. Messergebnisse	78
5.5.1. Selbstregelung der Heiztemperatur	78
5.5.2. Direkte Raumkühlung	80
5.5.3. Beladung des Eisspeichers	83
5.5.4. Dynamisches Betriebsverhalten	85
5.5.5. Einbindung des Eisspeichers	90
5.6. Simulation	92
6. Bewertung der Ergebnisse und Zusammenfassung	97
6.1. Bewertung der Druckregelung	97
6.2. Energetische Bewertung	98
6.2.1. Leistungszahl im stationären Betrieb	98
6.2.2. Leistungszahl im Kühlbetrieb	100
6.2.3. Kühlkomfort	102
6.3. Zusammenfassung	103
Literaturverzeichnis	105
A. Messinstrumente und Komponenten	114
A.1. Kollektorfeld	117
A.2. Auslegungsdaten Kühldeckeninstallation	117
B. Messreihen Prototyp 1	118
B.1. 90 °C Heizung ; 27 °C Rückkühlung ; 15 °C/0 °C/-10 °C Kälteträger	119
B.2. 100 °C Heizung ; 27 °C Rückkühlung ; 15 °C/0 °C/-10 °C Kälteträger	120
B.3. 110 °C Heizung ; 27 °C Rückkühlung ; 15 °C/0 °C/-10 °C Kälteträger	121
B.4. 110 °C Heizung ; 40 °C/45 °C Rückkühlung ; 15 °C/0 °C Kälteträger	122
B.5. Einfluss des Dephlegmators	123
C. Fehlerbetrachtung	124
D. Messungen	125
D.1. Vergleich Handsteuerung - automatische Steuerung	125
D.2. Beladung des Eisspeichers	126
E. Grundriss, Schema	127
F. Regelung der Kälteversorgung	129

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit messtechnischen Untersuchungen an einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine und deren Verwendung zur solaren Kühlung. Dafür wurde die Absorptionskältemaschine thermodynamisch analysiert und eine angepasste Regelstrategie entwickelt. Zur Regelung wurden zwei verschiedene Bauformen von Expansionsventilen untersucht. Die Kältemaschine kann aufgrund der umfangreichen Wärmerückgewinnung in einem großen Verdampfungstemperaturbereich arbeiten. Es wurde ein System zur solaren Kühlung von fünf Büroräumen des Institutsgebäudes aufgebaut. Das System besitzt einen großen Neuheitscharakter, da ein Eisspeicher für die Speicherung von Kälteenergie verwendet wird. Der Eisspeicher bietet den Vorteil, dass auch bei fehlender Antriebsleistung der Absorptionskältemaschine die Raumkühlung über längere Zeiten erfolgen kann. Gleichzeitig ist der Speicher kompakt und hat ein geringes Gesamtvolumen. Die gesamte Anlage ist in der Lage schnell zwischen den Betriebspunkten Eisspeicherbeladung und -entladung sowie Raumkühlung umzuschalten und auf diese Weise den Kühlkomfort im Raum dauerhaft zu gewährleisten.

Abstract

This work investigates an ammonia/water absorption chiller in combination with a solar cooling system. The absorption chiller has been analyzed and a new control strategy was developed. Two different types of expansions valves were investigated. Because of the extensive heat recovery, the absorption chiller could be operated in a wide range of operational conditions. In addition to the chiller, a complete solar cooling system has been established in the department's building. This solar cooling system is a novelty because an ice-store is used for storing cooling energy. The compact ice-store can cover the cooling load, even if there is a shortage of driving heat. The complete system can switch very fast between several operational modes such as charging and discharging the ice-store as well as cooling of the rooms. The cooling comfort could thus be maintained over a long period of time.