

**Absorptionskälteaggregat,
elektrisch beheizt und / oder gasbeheizt**



Die Absorptionskältemaschine

1. Geschichtliches

Der Absorptions-Kältekreislauf gilt als der älteste bekannte technische Prozess zur Kälteerzeugung. Die ersten theoretischen Abhandlungen und praktischen Versuche mit dem Absorptionsprinzip gehen bis zum Jahre 1777 zurück. Trotz intensiver Forschungen konnte jedoch vorerst keine brauchbare Maschine gefunden werden. (Hartmann, 1992)

John Leslie entwickelte 1810 eine Absorptionskältemaschine mit dem Kältemittel Wasser und dem Absorptionsmittel Schwefelsäure. Der industrielle Durchbruch gelang F. Carré 1859, der das Stoffpaar Ammoniak/Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) in einer kontinuierlich arbeitenden Absorptionskälteanlage einsetzte. Etwa 100 Jahre blieb dieses Stoffpaar die einzige wirtschaftliche und technisch durchführbare Kombination zur Kälteerzeugung nach dem Absorptionsprinzip. (Wikipedia, 2010; Hartmann, 1992)

Um die Jahrhundertwende zum 20. Jahrhundert betrieb Richard Mollier (*30.09.1863 - †13.03.1935) in dem von ihm aufgebauten Maschinenlaboratorium in Dresden eine Ammoniak-Wasser-Absorptionskälteanlage. Die nach ihm benannten Enthalpie- (Mollier-) Diagramme gehören noch heute zum Handwerkszeug der Kältetechniker. (Heinrich & Steimle, 1996)

2. Grundlagen

Absorption in der physikalischen Chemie bedeutet das gleichmäßige Eindringen von Gasen (sog. Absorbaten) in Flüssigkeiten oder Feststoffe (Absorptionsmittel, Absorbens). Chemische Absorption beschreibt den Prozess der Aufnahme oder des „Lösens“ eines Atoms, Moleküls oder eines Ions in dem freien Volumen des Absorbens. Der gegensätzliche Prozess wird als Desorption bezeichnet; also das Freisetzen eines gelösten Gases aus einem Absorptionsmittel.

Beispiel für die Absorption von Gasen in Flüssigkeiten:

Kohlenstoffdioxid (CO_2) gelöst in Mineralwasser

Beispiel für die Absorption von Gasen in Feststoffen:

Einlagerung von Wasserstoff in den Zwischengitterstellen von Eisen (Stichwort: Wasserstoffdiffusion)

Von der Absorption unbedingt zu unterscheiden ist die Adsorption. Bei der Adsorption handelt es sich um die Anlagerung eines Stoffes an der Oberfläche eines anderen Stoffes; es findet kein Eindringen in den aufnehmenden Stoff statt.

Eine sprachliche Unterscheidung liefert die Betrachtung der lateinischen Wortherkunft.

absorptio bzw. *absorbere* = (auf-)saugen; *adsorptio* bzw. *adsorbere* = (an-)saugen

Absorption = Aufsaugen; Adsorption = Ansaugen

Hierbei handelt es sich nicht um eine Anlagerung an der Oberfläche ([Adsorption](#)), sondern um eine Aufnahme in das freie Volumen der absorbierenden Phase.

In der Kältetechnik werden zwei verschiedene Arten von Anlagen eingesetzt:

– Kompressionsanlagen

– Absorptionsanlagen

Absorptionskälteanlagen werden durch thermische Energie angetrieben, während Kompressionskälteanlagen mechanischen Antrieb benötigen.

Gründe für die wachsende Beliebtheit von Absorptionskälteanlagen (Moran, 1996):

- kein Einsatz von FCKW, HFCKW oder HFC
- einfache Technik - geringe Wartung gute Bedienbarkeit

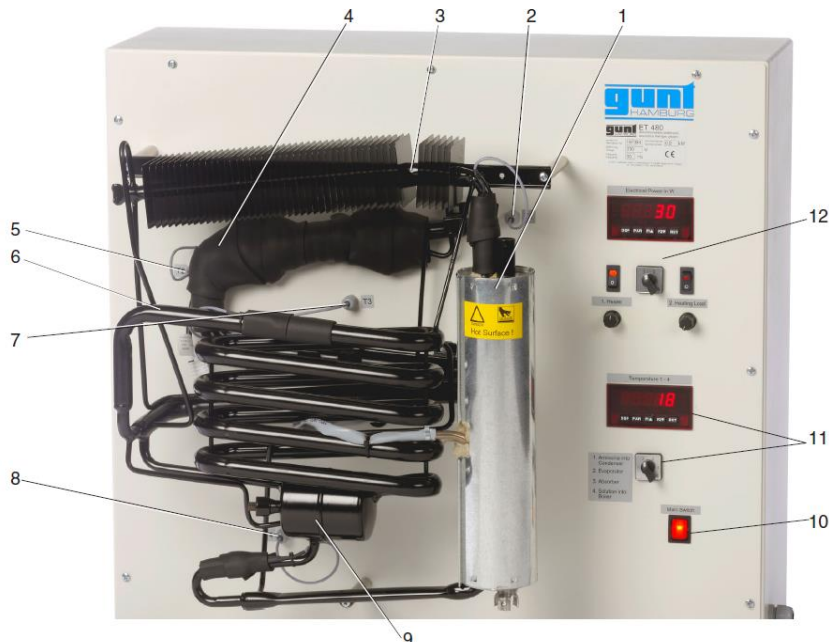


- geräuscharmer Betrieb
- geringer Strombedarf und -verbrauch in Zeiten hoher Nachfrage
- erhöhter Bedarf an Erdgas/Wärme in Zeiten niedriger Nachfrage oder Überschuss
- möglicher Antrieb mit Abwärme

Eigenschaften aktueller Absorptionskälteanlagen gegliedert nach Stoffpaaren:

Kälte-/Absorptionsmittel	NH ₃ /H ₂ O	H ₂ O/LiBr	
Arbeitsdruckbereich	2-20 bar	8-80 mbar	
Nutztemperaturbereich des Kühlmediums	< 6°C	≥ 6°C	
realisierte Leistungsklassen	10-88 kW	40-500 kW	350-6000 kW
Bauweise	einstufig	einstufig	zweistufig
Kältezahl	0,6	0,7	1,2
Anwendung	Industrie, insbes. Chem.	Klimakälteerzeugung in Einkaufszentren, Krankenhäusern, öffentlichen Einrichtung und Hotels	

3. Beispiel : Demonstrationsmodell ET480



Komponenten:

- 1 Kocher, elektrisch beheizt ergänzt durch Erdgasheizung
- 2 Thermometer, Eintrittstemperatur des Ammoniaks in den Kondensator (**T1**)
- 3 Kondensator (warme Seite)
- 4 Verdampfer (kalte Seite), umgeben von der elektrischen Gegenheizung
- 5 Thermometer, Verdampfertemperatur (**T2**)
- 6 Absorber
- 7 Thermometer, Absorbentemperatur (**T3**)
- 8 Thermometer, Eintrittstemperatur der Lösung in den Kocher (**T4**)
- 9 Vorratsbehälter
- 10 Hauptschalter
- 11 Temperaturanzeige und Bedienelement
- 12 Leistungsanzeige und Bedienelemente

Das **Demonstrationsmodell** zeigt ein voll funktionsfähiges Absorptionskälteaggregat, welches elektrisch beheizt wird und mit einem Gemisch Ammoniak / Wasser arbeitet. Dabei wurde der Versuch jedoch durch einen Erdgasbrenner modifiziert, welcher nun die notwendige thermische Energie für den Betrieb liefert. Die übersichtliche Anordnung auf einer Tafel macht die unterschiedlichen Kreisläufe gut nachvollziehbar. Thermometer an markanten Punkten der Stoffkreisläufe machen die einzelnen Bereiche des Kälteprozesses deutlich.

Das Demonstrationsmodell ist zur **Verwendung in der Aus- und Weiterbildung** bestimmt. Es ist nicht für industriellen oder häuslichen Einsatz geeignet.

4. Inbetriebnahme

Die Anlage ist zwingend mit dem Plexiglasschutz zu betreiben. Dieser ist so angeordnet das alle Anlagenkomponenten außer der Bedienelemente abgeschirmt sind.

Um das Aggregat in Betrieb zu nehmen, muss es zunächst mit dem elektrischen Netz verbunden und am Schalter "**Main Switch**" eingeschaltet werden.



Mit dem Schalter "**Heater**" wäre der elektrische Heizer des Kochers eingeschaltet. Die Leistung des elektrischen Heizers könnte mit dem darunter befindlichen Drehknopf verändert werden.

Aufgrund des Erdgasbetriebs ist die Nutzung der elektrischen Heizung hinfällig. Die Folge ist, dass der Schalter "**Heater**" ausgeschaltet bleiben soll.



Der eigentliche Betrieb des Aggregates, d. h. das Einstellen von niedrigen Temperaturen am Verdampfer, beginnt **ca. 30 min.** nach dem Einschalten der Wärmequelle (Brenner).

Um das Kälteaggregat mit Wärme belasten zu können, kann mit dem Schalter "**Heating Load**" eine elektrische Gegenheizung zugeschaltet werden. Ihre Leistung kann ebenfalls mit dem darunter befindlichen Drehknopf verändert werden. Die Digitalanzeige "**Electrical Power**" zeigt wahlweise die aufgenommene elektrische Leistung des Heizers oder der Gegenheizung an. Die Auswahl erfolgt mit dem Umschalter 1/2:

- 1: Heizer / Heater
- 2: Gegenheizung / Heating Load

Die Digitalanzeige "**Temperature 1-4**" zeigt wahlweise die von den vier Temperaturfühlern aufgenommene Temperatur an. Die Auswahl erfolgt durch drehen des Umschalter auf 1/2/3/4:



- 1: Eintrittstemperatur des Ammoniaks in den Kondensator /Ammonia into condenser (**T1**)
- 2: Verdampfertemperatur /Evaporator (**T2**)
- 3: Absorbtemperatur / Absorber (**T3**)
- 4: Eintrittstemperatur der Lösung in den Kocher /Solution into Boiler (**T4**)

5. Sicherheitshinweise

5.1 Gefahren für Leib und Leben



Gefahr eines elektrischen Schlages!

Elektrischen Anlage und Anschlüsse vor Spritzwasser schützen.



GEFAHR



GEFAHR! Bei ausströmendem Gas keine Zündfunken erzeugen!

Es kann zu unkontrollierten Verpuffungen kommen.



Gefahr von Verbrennungen!

Abgasstutzen des Kochers wird im Betrieb heiß! Abgasstutzen nicht berühren!



Gefahr der Verätzung!

Bei einem Defekt austretendes Ammoniakgas nicht einatmen oder in Kontakt mit Augen kommen lassen.

5.2 Gefahren für Gerät und Funktion



ACHTUNG! Das Aggregat arbeitet nur in aufrechter Stellung!

Das Aggregat arbeitet mit der Schwerkraft. Es erbringt deshalb nur dann Kühlleistung, wenn es aufrecht aufgestellt wird.



ACHTUNG! Brennerdüse bei Verstopfen reinigen!

Kocher erhält nicht die Heizleistung, die er benötigt, um das Ammoniak auszutreiben.



ACHTUNG

ACHTUNG! Programmierung der Leistungsanzeige nicht verändern!

Drücken der Einstellknöpfe führt zu Verstellung der Skalierung der Anzeige.



ACHTUNG! Bei defektem Rohrsystem Anlage nicht weiter betreiben!

Das Ammoniak/Wasser-Gemisch kann austreten. Das Aggregates ist dann nicht mehr funktionsfähig.

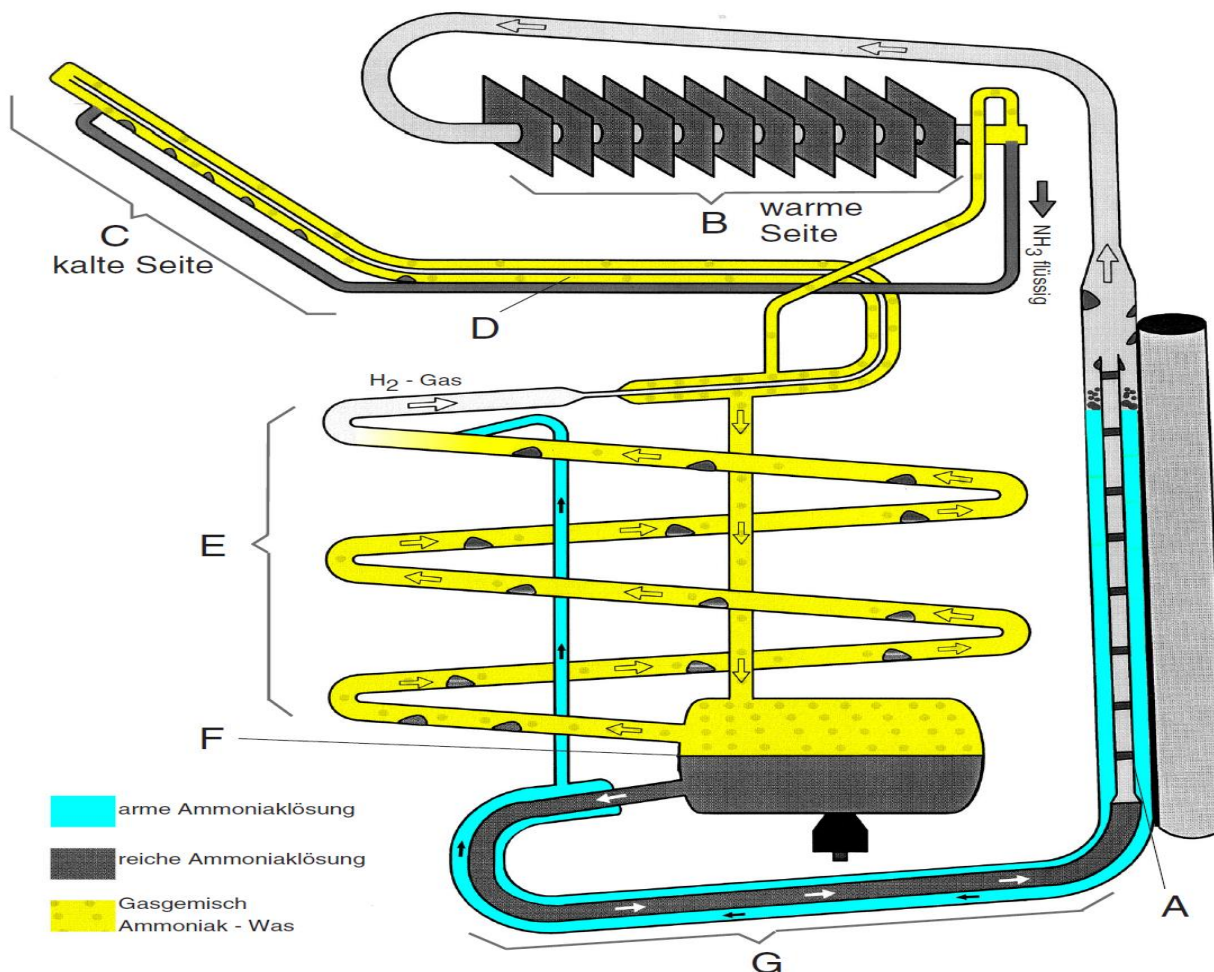
6. Grundlagen der Kühlung durch Absorption

Verdichter- und Absorptionskälteanlagen unterscheiden sich durch die Art der zugeführten Antriebsenergie und im Verfahren zur Druckerhöhung. Bei einem Absorptions-Kühlschrank wird das Kältemittel durch Zufuhr von Wärmeenergie aus einer wässrigen Lösung ausgetrieben und auf hohen Druck verdichtet. Der Kältemitteldampf wird dann in einem nachfolgenden Kondensator unter Abgabe von Wärme verflüssigt. Durch Entspannen auf einen geringeren Druck verdampft das Kältemittel erneut und nimmt dabei Wärme aus der zu kühlenden Umgebung auf.

Das gasförmige Kältemittel kommt dann wieder mit Wasser in Kontakt und geht in Lösung. Der Ausgangszustand ist damit wieder erreicht und der Prozesskreis geschlossen. Die Funktion eines Absorptions-Kühlschranks ohne mechanisch angetriebenen Kompressor beruht auf zwei wesentlichen Sachverhalten:

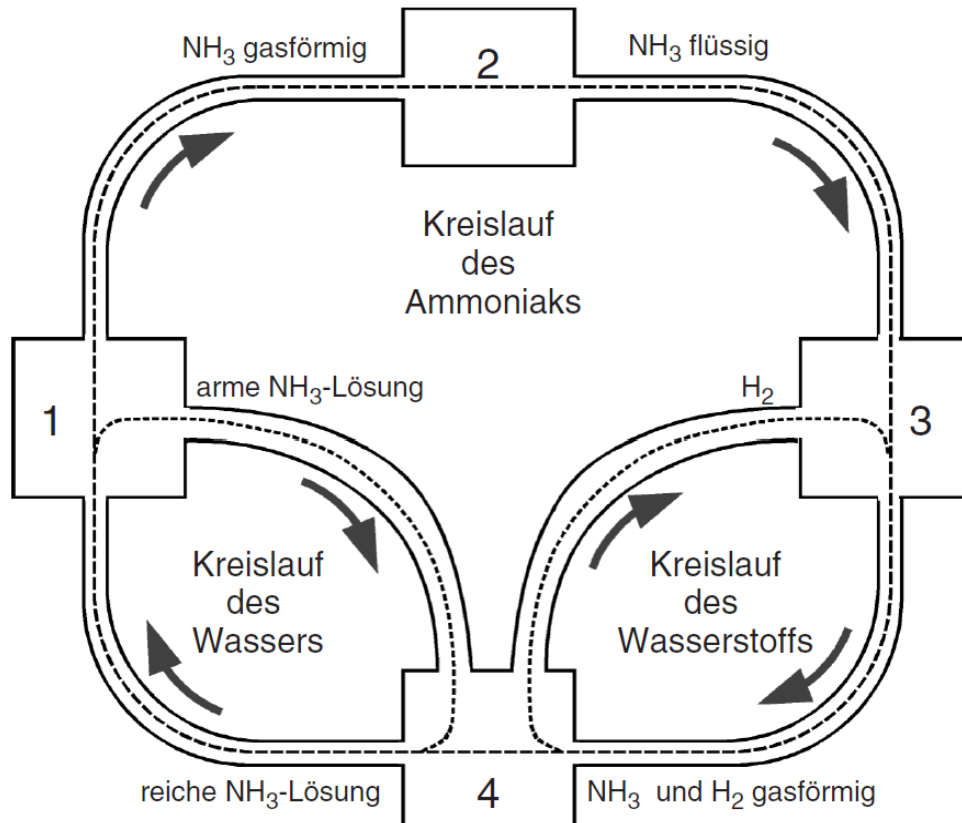
- Wasser hat die Eigenschaft, in kaltem Zustand und bei niedrigem Druck große Mengen gasförmiges Ammoniak in sich aufnehmen zu können. Dieses Ammoniak kann bei höherer Temperatur und höherem Druck wieder ausgetrieben werden.
- Ammoniakdampf kann in einem geschlossenen System bei Druck und Raumtemperatur verflüssigt werden. Unter Aufnahme großer Wärmemengen kann er in Anwesenheit eines Hilfsgases bei tieferer Temperatur wieder verdampfen.

6.1 Funktionsschema des Absorptionsaggregates



A Kocher und Steigrohr **B** Kondensator **C** Verdampfer **D** Gaswärmetauscher **E** Absorber **F** Vorratsbehälter
G Flüssigkeitswärmetauscher

6.2 Absorptions-Kälteprozess



- 1 Kocher :
Austreiben des Ammoniaks NH_3 aus der reichen Lösung durch Wärmezufuhr.
- 2 Kondensator : (**warme Seite**)
Verflüssigung des Ammoniaks NH_3 durch Wärmeabgabe an die Umgebungsluft.
- 3 Verdampfer : (**kalte Seite**)
Entspannen des Ammoniaks über eine Kapillare als Drossel, Zugabe von Wasserstoff H_2 als Hilfsgas. Als Folge verdampft das Ammoniak und nimmt Wärme aus dem Kühlgut auf.
- 4 Absorber :
Abführung der Absorptionswärme durch Luftkühlung und Anreichern der armen Lösung mit Ammoniak.

6.2.1 Kreislauf des Wassers

Im Vorratsbehälter befindet sich ein Gemisch aus $\sim 65\%$ Wasser (H_2O) und $\sim 35\%$ Ammoniak (NH_3). Diese Mischung heißt "reiche Lösung". Sie strömt aus dem Vorratsbehälter zum Kocher. Dort wird aus ihr bei $\sim 150\text{...}180^\circ\text{C}$ Ammoniakdampf ausgetrieben, der als Blasen im Steigrohr aufsteigt. Die Folge dessen ist eine Pumpwirkung, die den ganzen Prozess in Gang hält. Die verbleibende Flüssigkeit heißt "arme Lösung". Diese wird vom Dampfdruck durch den Flüssigkeitswärmetauscher, in welchem die reiche Lösung vorgewärmt wird, in den Absorber gedrückt. Die arme Lösung rieselt durch die Rohrschlangen des Absorbers zurück in den Vorratsbehälter. Damit ist der Flüssigkeitskreislauf geschlossen.

6.2.2 Kreislauf des Ammoniaks

Der im Kocher ausgetriebene Ammoniakdampf erreicht mit $\sim 70^\circ\text{C}$ den Kondensator. Dieser wird durch Kühlrippen auf Raumtemperatur gehalten. Bei dieser Temperatur und einem Druck im System von ~ 25 bar (abs) verflüssigt sich der Ammoniakdampf. Das flüssige Ammoniak strömt durch eine Kapillare als Drossel durch den Gaswärmetauscher in den Verdampfer, entspannt sich dort und benetzt dabei die Oberfläche im Verdampfer. Gleichzeitig wird Wasserstoff als Hilfsgas zugeblasen. Bei dem nun geringeren Druck verdampft das Ammoniak unter Aufnahme von Wärmeenergie aus dem Kühlgut. Das Gasgemisch Ammoniak-Wasserstoff erreicht den Vorratsbehälter und steigt durch die Rohrschlangen des Absorbers auf. Dabei strömt es der armen Lösung aus dem Wasserkreislauf entgegen und das Ammoniak löst sich praktisch wieder vollständig darin. Die arme wird wieder zur reichen Lösung.

6.2.3 Kreislauf des Wasserstoffs

Die arme Lösung im Absorber nimmt das Ammoniak praktisch vollständig auf, während der Wasserstoff von diesen Vorgängen gänzlich unberührt bleibt. Das nahezu reine und nun wieder leicht gewordene Wasserstoffgas verlässt den Absorber am oberen Ende in den Verdampfer und wird dort über die mit Ammoniak benetzte Oberfläche geblasen.

Die Temperatur sinkt spontan auf sehr tiefe Werte (ca. -15°C), denn das flüssige Ammoniak verdunstet sofort in den Wasserstoff hinein, obwohl der Gesamtdruck auch hier 25 bar (abs) beträgt. Für die Verdunstung des Ammoniaks ist jedoch nur dessen Teildruck von ~ 1 bar (abs) von Bedeutung. Damit setzt sich also der Druck im Verdampfer wie folgt zusammen:

1 bar (abs) Ammoniakdampf
+ 24 bar (abs) Wasserstoff

= 25 bar (abs) Totaldruck.

Durch das andauernde Verdampfen von Ammoniak steigt nun langsam der Teildruck des Ammoniaks im Gas und damit auch die Verdunstungstemperatur. Gasgemisch und Flüssigkeit durchlaufen den Gaswärmetauscher, wobei der Teildruck des Ammoniaks allmählich auf ~ 3 bar (abs) ansteigt und der Teildruck des Wasserstoffs auf 22 bar (abs) absinkt. Es verdunsten die letzten Reste des flüssigen Ammoniaks bei einer Temperatur von etwa ca. -5°C . Die Dichte eines Gasgemisches aus Wasserstoff und Ammoniakgas ist wesentlich größer als die Dichte von reinem Wasserstoff. Dieses schwere Gasgemisch sinkt nach unten in den Vorratsbehälter und durchströmt von dort aufsteigend die Rohrschlangen des Absorbers, wo das an Ammoniak reiche Gas der vom Kocher zurückkehrenden armen Lösung begegnet.

Der Absorber verfügt über eine große Oberfläche und wird durch Kühlrippen ebenfalls nahezu auf Raumtemperatur gehalten. Die arme Lösung ist und bleibt also relativ kalt und absorbiert daher das Ammoniak praktisch vollständig. Übrig bleibt das nahezu reine Wasserstoffgas, sodass auch dieser Kreislauf geschlossen ist. Am unteren Ende des Absorbers tropft die wieder mit Ammoniak stark beladene reiche Lösung in den Vorratsbehälter zurück.

7. Versuchsdurchführung

Während des Versuches *Absorptionskälteanlage* ermitteln Sie ausgehend von einem Anfangszustand Z_1 zwei weitere quasi-stationäre Zustände Z_2 und Z_3 der Versuchsanlage. Der Anfangszustand Z_1 wurde dabei bereits im Vorfeld eingestellt. Das Anfahren der Zustände Z_2 und Z_3 geschieht ausschließlich durch eine Variation der elektrischen Heizlast P_L .

Ihre Aufgaben sind dabei:

- die Ermittlung der Zustände Z_1 - Z_3 mit Hilfe des vorgefertigten Versuchsprotokolls
- Auswertung des Zustands Z_2 durch Eintragen der entsprechenden Nassdampfisotherme in das angefügte h, ξ - Diagramm
- Aufnahme der Temperaturverläufe von Z_1 zu Z_2 und Z_2 zu Z_3 mit Hilfe des vorgefertigten Versuchsprotokolls
- Auswertung der Temperaturverläufe mit Hilfe eines Tabellenverarbeitungsprogramms.

7. 1 Versuchsvorbereitung

- Plexiglasschutz vor der Anlage soll so angeordnet sein, dass alle Anlagenkomponenten außer der Bedienelemente abgeschirmt sind.
- Den Hauptschalter „ **Main Switch** “ einschalten.
- Der Schalter „ **Heater** “ soll ausgeschaltet bleiben.
- Den Schalter „ **Heating Load** “ einschalten.
- Den Gasbrenner anzünden und ihn konzentrisch zum Brennerrohr positionieren.
- Den Gasbrenner so leise einstellen, dass man nur ein leises Verbrennungsgeräusch hört. Die höchste Temperatur T_1 (Eintrittstemperatur des Ammoniaks in den Kondensator) darf den Wert von **170 °C** nicht übersteigen. Andernfalls ist der Gasbrenner zu heiß eingestellt.
- Den Gasbrenner nicht mehr verstellen und langsam kontinuierlich weiter brennen lassen.

Bem. Die Versuchsvorbereitung wurde bereits vor dem Beginn des Versuches durch Ihre Betreuer durchgeführt und der Anfangszustand Z_1 sollte bereits erreicht sein.

7. 2 Versuchsablauf

1. Ermitteln des Zustands Z_1
Im Versuchsprotokoll sind die Daten des voreingestellten Anfangszustandes festzuhalten. Die thermische Last (Gegenheizung / Heating Load) wurde auf einen Wert von etwa **45 W** eingestellt. Neben der Umgebungstemperatur sind die Temperaturen T_1 - T_4 zu ermitteln, sowie die tatsächliche thermische Last. Die Anzeige braucht immer eine gewisse Zeit nach Umschalten bis sie die korrekte Temperatur anzeigt.
2. Anfahren und Ermitteln von Zustand Z_2
Dafür ist die Thermische Last P_L des Zustands Z_1 auf **55 W** zu erhöhen. Gleichzeitig den Zeitzähler einschalten und die Temperatur T_2 alle 2 Minuten notieren. Das Protokoll (Zeit und Temperatur) beenden wenn die Temperatur T_2 sich innerhalb von sechs Minuten (3 Intervallen) nicht mehr ändert. Vervollständigen Sie bei Erreichen des quasi-stationären Zustands das Versuchsprotokoll unter dem Punkt Zustand Z_2 .
3. Anfahren und Ermitteln Von Zustand Z_3
Die Vorgehensweise entspricht der unter Punkt 2, jedoch wird die thermische Last P_L hier auf **25 W** abgesenkt. Das Erreichen den quasi-stationären Zustand ist wie unter Punkt 2 gekennzeichnet.



8. Versuchsprotokoll

Datum: _____

Uhrzeit: _____

Gruppe: _____

Zustand 1	
T _{Umgebung}	
P _H	CH4
P _L [W]	45
T ₁ [°C]	
T ₂ [°C]	
T ₃ [°C]	
T ₄ [°C]	

Zustand 2	
T _{Umgebung}	
P _H	CH4
P _L [W]	55
T ₁ [°C]	
T ₂ [°C]	
T ₃ [°C]	
T ₄ [°C]	

Zustand 3	
T _{Umgebung}	
P _H	CH4
P _L [W]	25
T ₁ [°C]	
T ₂ [°C]	
T ₃ [°C]	
T ₄ [°C]	

Z ₁ → Z ₂		Z ₂ → Z ₃	
t [min]	T ₂ [°C]	t [min]	T ₂ [°C]
0		0	
2		2	
4		4	
6		6	
8		8	
10		10	
12		12	
14		14	
16		16	
18		18	
20		20	
22		22	
24		24	
26		26	
28		28	
30		30	
32		32	
34		34	
36		36	
38		38	
40		40	
42		42	
44		44	
46		46	
48		48	
50		50	



9. Anhang

9.1 Technische Daten

L x B x H 750 x 435 x 600 mm

Gewicht ca. 40 kg

Versorgung 230V , 50Hz

Alternativen optional, siehe Typenschild

Absorptionsaggregat: Füllung Ammoniak / Wasser

NH₃ / H₂O

Hilfsgas Wasserstoff, H₂

Heizquelle elektrisch 120 W

Temperaturmessung: Digitalanzeige

Anzeigebereich -200 ... +850 °C

Genauigkeit 0,4 °C bei 18 ... 20 °C

1,6 °C bei 0 ... 50 °C

Leistungsanzeige: Messbereich 0 - 9999 W

Anzeigebereiche programmierbar

Gegenheizung: elektrisch, Leistung 65 W

9.2 h,ξ Diagramm

