Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 90 (1972)
Heft: 32

Artikel: Der Hilfsgas-Absorptionskälteprozess
Autor: Kouremenos, D.A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85279

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Prof. Grassmann hat beim Ausbau seines Institutes an der ETH immer den engen Kontakt mit der industriellen Praxis aufrecht erhalten und war seit dem Anfang seiner Lehrtätigkeit an der ETH bestrebt, seine Ausbildung der Ingenieure mehr und mehr den Anforderungen der verfahrenstechnischen Praxis näherzubringen. Daher hat er auch stets eng mit der SIA-Fachgruppe für Verfahrenstechnik zusammengearbeitet, deren Vorstand er seit Gründung dieser Fachgruppe im Jahre 1965 angehört.

Die Wechselwirkung zwischen den Grundsätzen von Lehre und Forschung einerseits und industrieller Grossproduktion anderseits führt immer dann zu erfreulichen Ergebnissen, wenn sich die Vertreter aller Richtungen aktiv einsetzen. In diesem Sinne waren und sind auch die Ergebnisse der intensiven Zusammenarbeit von SIA und Prof. Grassmann als Vertreter der Hochschule ausserordentlich positiv.

Wir wünschen Prof. Dr. P. Grassmann für die nächsten Jahre alles Gute und vor allem Genugtuung bei seiner weiteren wissenschaftlichen Tätigkeit, sowie bei der schwierigen Lösung aller Probleme im Zusammenhang mit der Lehrtätigkeit, Probleme, die in der heutigen Zeit zu eigentlichen Dauerproblemen geworden sind, die ständig neue Lösungen und Anpassungen erfordern und einem Dozenten nicht mehr erlauben, bestens Bewährtes als dauerhaft zu betrachten.

Unsere besten Wünsche für Prof. Dr. P. Grassmann sind nicht nur für den Ehrentag des 13. August 1972 gemeint, sondern sie sollen ihn bei seiner Tätigkeit in den nächsten Jahren ständig begleiten.

Dr. sc. techn. *F. Widmer*, Prof. am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH

Dr. Ing. Chem. *W. Hauschild*, Präsident der SIA-Fachgruppe für Verfahrenstechnik

*

Im vorliegenden Heft berichten ehemalige Mitarbeiter des Jubilars über bemerkenswerte Arbeiten aus dessen vielseitigen Arbeitsgebieten. Damit bezeugen sie ihre Wertschätzung und beglückwünschen ihn zu seinem Geburtstag. Diesen Wünschen schliessen sich auch die Redaktoren der Schweizerischen Bauzeitung an.

Der Hilfsgas-Absorptionskälteprozess

DK 621.575

Prof. Dr.-Ing. **D. A. Kouremenos**, Technische Hochschule Athen

Für den Betrieb der Hilfsgas-Absorptionskälteaggregate wird noch heute ausschliesslich die Kombination der drei bewährten Stoffe Ammoniak, Wasser und Wasserstoff verwendet. Das Ammoniak ist das Kältemittel, das Wasser übernimmt die Rolle des Absorptionsmittels und der Wasserstoff die des druckausgleichenden Hilfsgases. Obwohl solche Aggregate seit fast 50 Jahren in starkem Einsatz sind und mehrere Millionen gebaut wurden, ist die Darstellung ihres thermodynamischen Kreisprozesses bis jetzt nicht möglich gewesen. Diese Tatsache ist dadurch zu erklären, dass einerseits die Teilprozesse sehr oft kompliziert sind und dass anderseits ihre Zusammenstellung sich als schwierig erweist. Das Problem lässt sich vielleicht besser erklären, wenn man sich vorstellt, dass es sich hier um Prozesse mit Dreistoffgemischen handelt. Die vorliegende Arbeit zeigt, wie der Kreisprozess eines solchen Kälteaggregates in anschaulicher Weise auf dem Temperatur-Entropie-Diagramm dargestellt werden kann. Die Methode wird mit Hilfe eines Beispiels erläutert, und zwar unter der für solche Darstellungen üblichen Annahme, es herrsche zwischen Flüssigkeit und Dampf an jeder betrachteten Stelle Gleichgewicht.

1. Die Kreisprozesse der drei Medien

Bild 1 zeigt das Schaltschema eines derartigen Hilfsgas-Absorptionskälteaggregates, wobei die verschiedenen Bestandteile so angeordnet sind, wie es ihrer wirklichen Lage entspricht. Diese Anordnung ergibt sich daraus, dass ein solches Aggregat über keine bewegten Teile verfügt und alle Strömungen, bis auf eine Ausnahme, durch Dichte- oder Höhenunterschiede aufrecht erhalten werden müssen. Die erwähnte Ausnahme ist die Strömung der reichen Lösung vom Absorber zum Kocher, welche durch eine Thermosyphonpumpe hervorgerufen wird. Obwohl die Anordnung des Bildes 1 der Wirklichkeit ziemlich gut entspricht, ist sie jedoch nicht geeignet, die thermodynamische Analyse des Kreisprozesses durchzuführen. Wir werden sie deswegen durch die Schaltung nach Bild 2 ersetzen.

Auf Bild 2 ist der Kocher durch seine drei meist verwendeten Teile dargestellt, nämlich durch den Gleichstromaustreiber, den Rektifikator und den Deflegmator[1]). Der Dampf, der den Kocher durch den Deflegmator verlässt, enthält je nach Betriebsbedingungen und Konstruktion des Aggregates mehr oder weniger Absorptionsmittel und wird als Zweistoffgemisch im Kondensator unter Anwesenheit von wenig Hilfsgas verflüssigt. Das Kondensat kühlt sich im Gaswärmeaustauscher im Gegenstrom zum kalten Dampf aus dem Verdampfer ab und tritt dann in dessen kaltes Ende ein. Im Gegensatz zum konventionellen Kompressoraggregat ist hier keine Drosselung nötig. Der tiefe Verdampfungsdruck wird durch das Hilfsgas erreicht, das dem Kältemitteldampf einen genügend niedrigen Partialdruck vorschreibt. Die Verdampfung ist dort beendet, wo der letzte Tropfen des Zweistoffgemisches Kältemittel-Absorptionsmittel verdampft ist. Dieses thermodynamische Ende muss nicht unbedingt mit dem apparativen Ausgang des Verdampfers zusammenfallen. In Wirklichkeit stellt sich im Gaswärmeaustauscher immer eine Nachverdampfung ein. Demzufolge muss ein beträchtlicher Anteil des «apparativen» Gaswärmeaustauschers dem «thermodynamischen» Verdampfer zugeordnet werden.

Der Dampf am Ende der Verdampfung befindet sich in einem Zustand, der im allgemeinen nicht dem Gleichgewichtsdampf am Eintritt in den Absorber entspricht. Dieser Umstand macht das Einschalten eines Apparates zur Dampfanpassung (Anpassteil [1]) notwendig, der wie eine Art Deflegmator mit umgekehrten Stromrichtungen wirkt. Um diese Anpassung zu verwirklichen, entnimmt man dem «reichen» Ende des Absorbers etwas Flüssigkeit und lässt sie im Anpassteil im Gegenstrom zum vom Verdampfer herkommenden Dampf strömen. Dabei verdampft die Flüssigkeit. Da dieser Vorgang unter Anwesenheit von Hilfsgas stattfindet, verläuft er nicht isobar. Das gleiche gilt auch für den Vorgang im Absorber. Auf dessen «reichen» Seite ist der Kältemittel-Partialdruck höher als auf der «armen». Dieser Druck muss immer mit dem entsprechenden örtlichen Druck des Hilfsgases den tota-

[1]) Als Deflegmator bezeichnet man einen Apparat, in welchem sich ein Kältemittel-Absorptionsmittel-Dampfgemisch dadurch an Kältemittel anreichert, dass durch Kühlung hauptsächlich Absorptionsmittel auskondensiert wird.

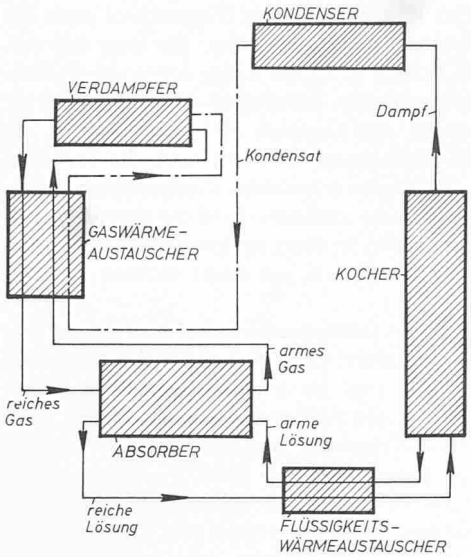

Bild 1. Schaltschema eines Hilfsgas-Absorptionskälteaggregates. Der Kältemitteldampf, der im Kocher erzeugt wird, verflüssigt sich im Kondensator; das Kondensat strömt nach seiner Abkühlung im Gaswärmeaustauscher zum Verdampfer, wo es verdampft und dabei die eigentliche Kälteleistung erbringt. Der Kältemitteldampf wird vom Verdampfer durch das durchströmende Hilfsgas mitgenommen und zum Absorber gebracht, wo er durch die vom Kocher zuströmende arme Lösung wieder absorbiert wird, um zum Kocher als reiche Lösung zu gelangen

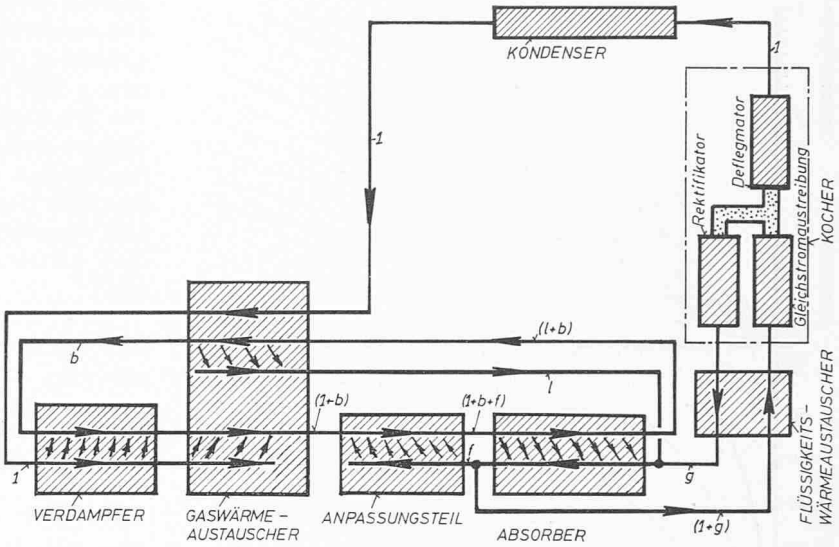

Bild 2. Darstellung der Schaltung des Hilfsgas-Absorptionskälteaggregates (Bild 1) in neuer Form, die sich für die thermodynamische Analyse besser eignet. Der Dampfanpassungsteil, der hier zwischen Absorber und Verdampfer geschaltet ist, wird in Wirklichkeit nicht gebaut. Er dient der reversiblen Anpassung des vom Verdampfer kommenden Kältemitteldampfes an den im Absorber herrschenden Zustand

len Betriebsdruck ergeben, der überall im Aggregat einen konstanten Wert aufweist. Das an Kältemittel arme Gasgemisch, welches den Absorber verlässt, wird im Gaswärmeaustauscher abgekühlt und teilweise kondensiert. Das Kondensat fliesst im Gegenstrom zum Gas, wodurch eine Deflegmation des Gases entsteht[2]). Schliesslich läuft das Kondensat zum Absorber zurück. Diese Rücklaufdampf-Deflegmation ist wegen des Hilfsgases ebenfalls kein isobarer Prozess. Am kalten Ende des Gaswärmeaustauschers tritt nur Dampf aus. Dieser strömt in den Verdampfer und steht daher mit dem dort eintretenden Kondensat im Gleichgewicht. Die Verbindung zwischen Absorber und Kocher wird durch einen herkömmlichen Flüssigkeits-Wärmeaustauscher hergestellt.

Die Massenströme, auf 1 kg Kondensat bezogen, die die verschiedenen Teile des Aggregates durchfliessen, sind auf Bild 2 angegeben. So fliessen zum Beispiel vom Gaswärmeaustauscher l kg Flüssigkeit zur armen Seite des Absorbers und $(l+b)$ kg Kältemittel-Absorptionsmittel-Dampfgemisch in der entgegengesetzten Richtung. Der austretende Strom von b kg Dampf gelangt zum Verdampfer und gibt $(1+b)$ kg Dampf an seinem Ausgang ab, die zum Dampfanpassungsteil gelangen. An dessen Ausgang strömen $(1+b+f)$ kg Dampf im Gegenstrom zu f kg Flüssigkeit, die vom Absorber abgezapft werden. Die auf ebenfalls 1 kg Kondensat bezogene arme Lösung beträgt g kg und dementsprechend die reiche Lösung $(1+g)$ kg. Mit Hilfe dieser bezogenen Massenströme können die Bilanzen in kurzer Form aufgestellt werden.

2. Die Darstellungsmethode

Zur Darstellung von Kreisprozessen werden verschiedene Diagramme verwendet, unter anderen auch das Temperatur-Entropie-Diagramm. Dieses bietet den grossen Vorteil, dass die Temperaturen, bei denen die Zustandsänderungen stattfinden, deutlich sichtbar sind. Es eignet sich deshalb zur Betrachtung der verschiedenen Wärmeaustauschvorgänge. Für die Hilfsgas-Absorptionskälteaggregate ist die Ausnutzung jedes möglichen Wärmeaustausches zur Erzielung günstigerer Wärmeverhältnisse und tieferer Verdampfungstemperaturen von grosser Bedeutung, weshalb sich die Verwendung des Temperatur-Entropie-Diagrammes aufdrängt.

Die bekannten Temperatur-Entropie-Diagramme sind üblicherweise nur für einen einzigen Stoff aufgestellt. Es müssen besondere Massnahmen getroffen werden, um ein Dreistoffgemisch in ähnlicher Weise darstellen zu können. Erst vor kurzem wurde gezeigt [2], wie ein Temperatur-Entropie-Konzentrations-Diagramm für Zweistoffgemische aufgebaut werden kann und wie sich damit unter anderem der Kreisprozess einer Absorptionskälteanlage mit Lösungspumpen und zwei Druckstufen darstellen lässt [3]. Die Darstellung der Vorgänge in einem Hilfsgas-Absorptionskälteaggregat ist jedoch wegen der Anwesenheit des Hilfsgases komplizierter.

Sowohl das Temperatur-Entropie-Konzentrations-Diagramm eines Zweistoffgemisches [2] als auch die Teilprozesse und ihre Kombination zum Kreisprozess einer Absorptionskälteanlage [3] werden als bekannt vorausgesetzt; für Einzelheiten sei auf die Arbeiten [2] und [3] hingewiesen. Es sei hier nur kurz bemerkt, dass sich dieses Diagramm durch die Projektion eines dreidimensionalen Gebildes mit den Koordinaten Temperatur, Entropie und Konzentration auf die Temperatur-Entropie-Ebene gewinnen lässt.

Üblicherweise wird der ganze Absorptionskreisprozess auf einen oberen Antriebsteil und einen unteren Kälteteil aufgeteilt, obwohl diese Unterscheidung fragwürdig erscheint. Für unseren Fall des Hilfsgas-Absorptionskälteaggregates ist der obere Teil des Kreisprozesses, der den Flüssigkeitswärmeaustauscher, den Kocher und den Kondensator enthält, praktisch nicht verschieden von einem entsprechenden Teil des Kreisprozesses einer Absorptionskälteanlage mit zwei echten Druckstufen ohne Hilfsgas. Diese Tatsache wird sofort klar, wenn man bedenkt, dass das Hilfsgas in diesen Teilen des Aggregates nur in Spuren vorhanden ist und deswegen überhaupt keinen spürbaren Einfluss ausüben kann. Die Darstellung die-

[2]) Wegen dieser Wirkung wird der «arme» Teil des Gaswärmeaustauschers auch als Rücklaufdampf-Deflegmator bezeichnet.

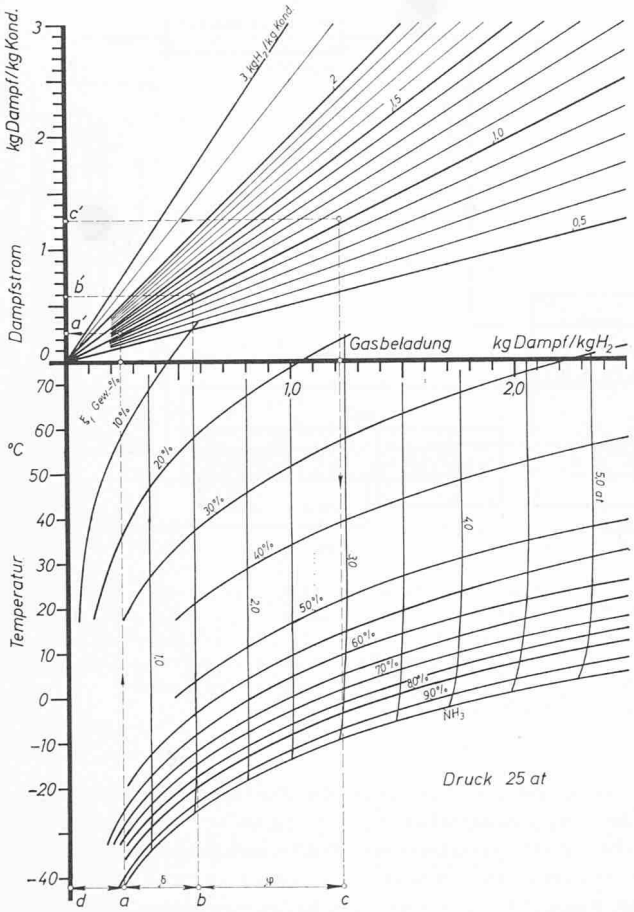

Bild 3. Diagramm zur Berechnung von nicht isobaren Änderungen des Gemisches NH_3–H_2O unter Anwesenheit von H_2. Der untere Teil stellt die Gleichgewichtszustände des Dampfes dar, die bei verschiedenen Flüssigkeitskonzentrationen ξ_f und Temperaturen zu erwarten sind. Der obere Teil gibt die NH_3-Dampfmenge für verschiedene Gasumlaufmengen und verschiedene Gasbeladungen an; totaler Druck 25 at

ses oberen Teiles des Kreisprozesses ist schon bekannt [3], und es bleibt uns hier nur übrig, den unteren Teil zu untersuchen. Dieser enthält die Verdampfung, die Anpassung, die Absorption und die Rücklaufdampf-Deflegmation.

Die resultierende Entropieänderung in diesen Teilen besteht sowohl aus den einzelnen Entropieänderungen des Hilfsgases und des Zweistoffgemisches Kältemittel-Absorptionsmittel als auch aus der Mischungsentropie der beiden. Wir müssen also zuerst drei unabhängige Kreisprozesse für das Zweistoffgemisch Kältemittel-Absorptionsmittel, für das Hilfsgas, und für die Mischungsentropie aufstellen, und nachher alle drei kombinieren. Zunächst wollen wir mit dem Zweistoffgemisch beginnen und zwar mit seinen verschiedenen Teilprozessen. Als ersten Prozess betrachten wir die Verdampfung.

3. Die Verdampfung

Die Verdampfung des Zweistoffgemisches Kältemittel-Absorptionsmittel wollen wir weiter als reversibel annehmen. Dazu müssen die Flüssigkeit und das darüber befindliche Dampfgemisch miteinander im Gleichgewicht stehen. Weiter muss die Kontinuitätsbedingung erfüllt sein. Mit diesen zwei Bedingungen ist es möglich, den Verdampfungsverlauf zu verfolgen. Der wirkliche Verlauf mit endlichem Partialdrucksprung zwischen Flüssigkeit und Dampf ist natürlich noch komplizierter, und es sind besondere Diagramme nötig [4], um ihn darstellen zu können. Die hier betrachtete reversible Verdampfung kann mit Hilfe des Diagrammes, Bild 3, gut angegeben werden. Der untere Teil dieses Diagrammes stellt die Gleichgewichtszustände des Dampfes dar, die man bei verschiedenen Gasbeladungen erwarten kann, sowie die Partialdrücke des Zweistoffgemisches Kältemittel-Absorptionsmittel. Das Diagramm ist für das Gemisch NH_3–H_2O mit H_2 als Hilfsgas aufgestellt. Für dieses Gemisch sind die Isobaren fast identisch mit den Linien konstanter Gasbeladung. Wenn man volle Übereinstimmung annimmt, wird die ganze Darstellung wesentlich vereinfacht. In einer weiteren Stufe kann man diese Annahme wegfallen lassen, um exakt rechnen zu können.

Die Aufstellung der Gleichgewichtslinien des Bildes 3 verlangt die Kenntnis des spezifischen Volumens des Dreistoffgemisches. Diese Werte sind bis jetzt noch nicht gemessen worden; jedoch wurden sie hier unter Voraussetzung eines idealen Gemisches aus Wasserstoff und dem realen NH_3–H_2O-Gemisch berechnet. Diese Annahme führt zu keinen merklichen Abweichungen, denn das hier verwendete Hilfsgas ist Wasserstoff. Ausserdem kann die Dichte des Dampf-Gemisches NH_3–H_2O, obwohl nicht bekannt, sehr genau aus dem Molenbruch[3]) berechnet werden, denn der Partialdruck des Wasserdampfes scheint durch die Anwesenheit des Ammoniaks nur sehr wenig modifiziert [5] zu werden. Der obere Teil des Bildes 3 gibt die Dampfmenge für verschiedene Gasumlaufmengen (Ordinate) und verschiedene Gasbeladungen (Abszisse) an.

Bild 3 eignet sich nicht nur für die Berechnung der Verdampfung, sondern auch für die aller Teilprozesse, die unter Anwesenheit von Hilfsgas bei einem Gesamtdruck von 25 ata stattfinden, wie aus dem wiederholten Gebrauch dieses Diagrammes später deutlich wird. Als Beispiel einer Verdampfung betrachten wir ein armes Gas mit 0,24 Beladung von NH_3–H_2O-Zweistoffgemisch, das schon auf —42°C abgekühlt ist und das im Gleichgewicht mit den 98% Kondensat von gleicher Temperatur am Eingang des Verdampfers steht. Der Dampfanteil dieses Gases besteht praktisch aus reinem Kältemittel, und der entsprechende Punkt a des Dampfgemisches ist auf dem unteren Teil des Bildes 3 angegeben. Der mittlere Gewichtsanteil des Massenstromes aus 1 kg Kondensat 95% und 0,25 kg NH_3 ergibt sich zu 98,5%. Für einen bezogenen Wasserstoffstrom von 1,04 kg H_2/kg-Kondensat erhalten wir den Punkt a' oben, der einem Dampfstrom des armen Gases von $1{,}04 \times 0{,}24 = 0{,}25$ kg Dampf/kg Kondensat entspricht. Das eine kg Kondensat, das als Flüssigkeit in den Verdampfer eintritt, verringert sich im Verlauf der Verdampfung. Der jeweilige Flüssigkeitsstrom sowie der Dampfstrom, der aus dem Kondensat entstanden ist, beide bezogen auf 1 kg Kondensat, werden üblicherweise mit φ und δ bezeichnet. Es muss natürlich immer $\varphi + \delta = 1$ sein. Im Verlauf der Verdampfung wird unter anderem auch der Punkt erreicht, bei dem der Partialdruck des Dampfgemisches den Wert 1,5 at annimmt. Alsdann gilt:

$$\varphi/\delta = (a\,b)/(b\,c)$$

Wenn man noch den durch das arme Gas in den Verdampfer eintretende Dampfstrom berücksichtigt, dann ist an dieser Stelle das Verhältnis Dampfstrom/Flüssigkeitsstrom gleich (d b)/(b c).

Zur Festlegung des entsprechenden Zustandspunktes auf dem Temperatur-Entropie-Konzentrations-Diagramm stehen nun drei Angaben zur Verfügung:

1) Mittlerer Gewichtsanteil des Massenstroms 98,5%
2) Partialdruck des NH_3–H_2O-Gemisches 1,5 at
3) Verhältnis Dampfstrom/Flüssigkeitsstrom = (d b)/(b c)

[3]) Unter Molenbruch versteht man das Verhältnis der Anzahl NH_3-Mole zu der der H_2O-Mole.

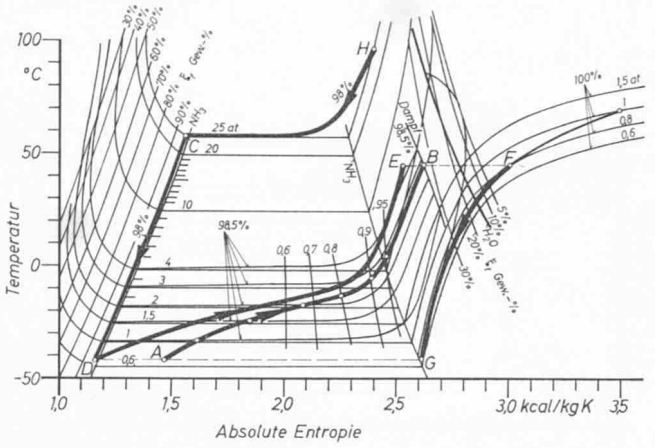

Bild 4. Temperatur-Entropie-Konzentrationsdiagramm für das aus Kälte- und Absorptionsmittel bestehende Zweistoffgemisch [2]. Der Verdampfungsprozess wird durch die Linie AB dargestellt; er bezieht sich auf den resultierenden Massenstrom, der aus 1 kg Kondensat 98 % und 0,25 kg Kältemitteldampf des armen Gases besteht und der einen mittleren Gewichtsanteil von 98,5 % aufweist. Die Änderung FG ist ein Teil der Rücklaufdampf-Deflegmation. Die resultierende Änderung [3] von FG und AB wird durch die Linie DE angegeben. HC stellt die Kondensation und CD die Abkühlung des Kondensates dar

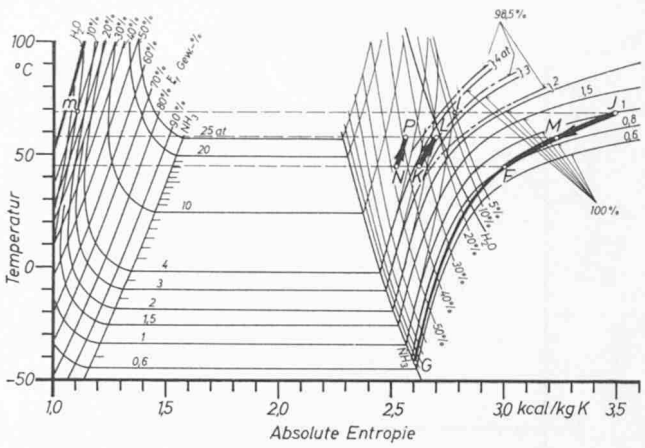

Bild 5. Verlauf der Rücklaufdampf-Deflegmation *JMFG* und der Anpassung KL. Im *T*, *ξ*, *s*-Diagramm. Die Resultierende [3] der Änderung MF und KL wird durch die Linie NP angegeben. Auf der rechten Seite des Diagrammes sind Linienscharen für verschiedene Drücke für die Rücklaufdampf-Deflegmation (100 %) und die Anpassung (98,5 %) eingetragen

Für den weiteren Verlauf der Verdampfung können ähnliche Werte erhalten werden, und man kann dadurch den ganzen Verdampfungsprozess aufzeichnen. Auf Bild 4 ist in dieser Weise die Verdampfung unseres Beispiels angegeben.

Auf Bild 4 gibt die Linie AB den Verlauf der Verdampfung an. Die mit 0,6, 0,7 usw. bezeichneten Hilfslinien bezeichnen das Verhältnis Dampf/Flüssigkeit. Auf diesen Linien kann mit Hilfe des Bildes 3 der Druck eingezeichnet werden, der dem gesuchten Punkt entspricht. Auf diese Weise lässt sich der Verlauf leichter verfolgen. Das Ende der Verdampfung, Punkt B, liegt in unserem Beispiel bei etwa +45°C.

Ebenfalls auf Bild 4 ist auf der rechten Seite die Linie FG eingetragen, welche einen Teil der Rücklaufdampf-Deflegmation darstellt und welche später weiter erklärt wird. Man kann sie aber schon jetzt benutzen und sie mit der Verdampfungslinie AB kombinieren, um die resultierende Änderung DE zu bekommen. Wie schon früher erwähnt, bezeichnet b den auf 1 kg Kondensat bezogenen resultierenden Massenstrom durch die Rücklaufdampf-Deflegmation in kg. In entgegengesetzter Richtung zu diesem strömt der Massenstrom $(1+b)$ durch den Verdampfer. Der auf 1 kg Kondensat bezogene resultierende Massenstrom für die Änderung DE ist dementsprechend 1 kg und hat den mittleren Gewichtsanteil 98 %. Die Wärmemenge, die durch die Fläche unterhalb der Linie DE dargestellt wird, ist nicht die Kälteleistung, denn erstens ist darin die Abkühlung des Kondensates nicht berücksichtigt, und zweitens ist der Wärmeinhalt des Hilfsgases noch nicht mitgerechnet. Auf die Bestimmung der Kälteleistung werden wir später zurückkommen.

4. Rücklaufdampf-Deflegmation, Anpassung

Die Verdampfung ist der einzige Gleichstromprozess unter Anwesenheit vom Hilfsgas, der im Aggregat stattfindet. Die übrigen Teilprozesse, darunter auch die Rücklaufdampf-Deflegmation und die Anpassung, sind Gegenstromprozesse. Auf Bild 5 sind die Hilfslinien für die Deflegmation [2] des Rücklaufdampfes für einen Gewichtsanteil von 100 % am Austritt des Deflegmators, sowie die Hilfslinien für die Anpassung mit mittlerem Gewichtsanteil 98,5 % angegeben. Beide Linienscharen sind für verschiedene Drücke aufgestellt, sodass man den genauen Verlauf gut eintragen kann.

Wir betrachten zunächst die Rücklaufdampf-Deflegmation. Es ist schon bekannt [2], wie man die entsprechenden Hilfslinien für isobare Deflegmation angeben kann. Nach dieser Methode sind auch auf Bild 5 die Hilfslinien für 100 % Gewichtsanteil für Werte zwischen 0,6 und 4 at eingetragen. Wenn man nun eine nicht isobare Deflegmation unter Anwesenheit des Hilfsgases betrachtet, so muss die entsprechende neue Linie, welche diesen Prozess beschreibt, alle Hilfslinien für isobare Deflegmation bei den verschiedenen Drücken durchschneiden. Die Schnittpunkte dieser neuen Linien mit den Hilfslinien für isobare Deflegmation gibt die Zustandspunkte für die betreffenden Drücke an. Diese neue Hilfslinie ist in unserem Beispiel die Linie JMFG, die man mit Hilfe von Bild 3 finden kann. Ihre Konstruktion wird an der des Punktes F erläutert: Der Punkt J am Eintritt des Gemisches in den Deflegmator ist bekannt und durch den Vorgang im Absorber festgelegt. Wir wissen also, dass dort beim Druck 1 at der Rücklaufdampf den Zustand J aufweist, und weiter wissen wir, dass der resultierende Massenstrom überall im Deflegmator den Wert $b = 0{,}25$ kg hat. Das Verhältnis Dampf zu Flüssigkeit beim Punkt J ist bekanntlich [2] (Jm)/(JI). An der neuen Stelle des Rücklaufdampf-Deflegmators, wo der Partialdruck 0,8 at herrscht, ist der resultierende Massenstrom wieder $b = 0{,}25$ kg, aber das Verhältnis Dampf- zu Flüssigkeitsstrom hat einen anderen Wert. Aus Bild 3 kann man nun für den Partialdruck 0,8 at die entsprechende Gasbeladung ablesen und weiter mit Hilfe des oberen Teiles von Bild 3 und des bekannten Wasserstoffstromes die dem Druck 0,8 at entsprechende neue Dampfmenge finden. Die neue Flüssigkeitsmenge ergibt sich weiter, wenn man von dieser Gasmenge den resultierenden Massenstrom $b = 0{,}25$ kg abzieht. Auf diese Weise lässt sich das neue Dampf-Flüssigkeitsverhältnis berechnen; man muss auf der Hilfslinie der isobaren Deflegmation für 100 % und 0,8 at des Bildes 5 denjenigen Punkt finden, der dieses Verhältnis aufweist. Man erhält so den Punkt F und weiter die ganze Kurve JMFG. Die entsprechende Kurve KL für die Anpassung wurde nach der gleichen Methode gezeichnet.

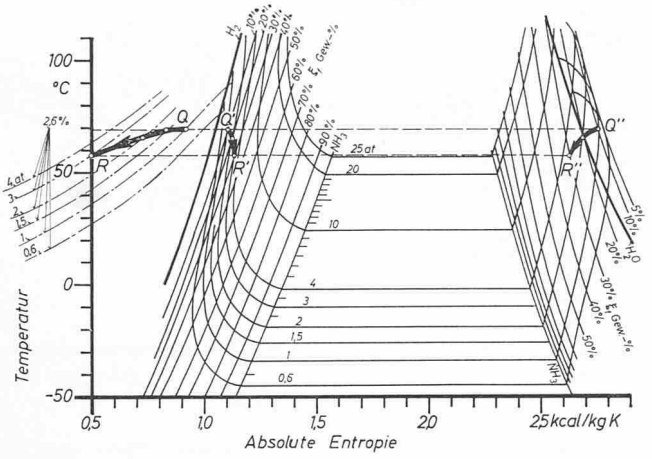

Bild 6. Darstellung der Hilfsgas-Absorption. Die Zustandsänderung des Dampfes ist durch die Linie Q″ R″, diejenige der Flüssigkeit durch die Linie Q′ R′ und die Zustandsänderung des resultierenden Massenstroms durch die Linie Q R angegeben. Die Hilfslinien auf der linken Seite entsprechen der isobaren Gegenstromabsorption bei den verschiedenen Drücken, die die Hilfsgas-Absorption durchläuft

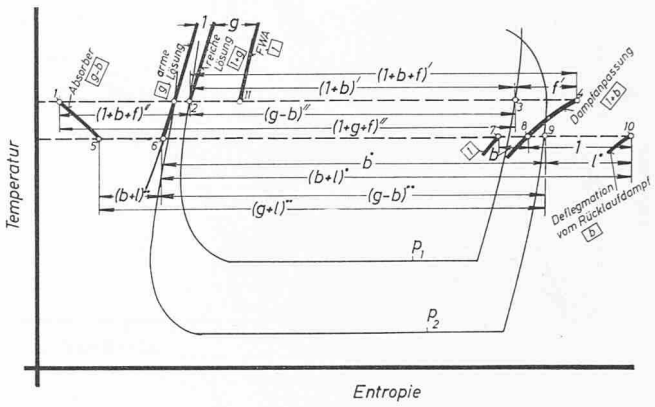

Bild 7. Zum Beweis, dass die Vorgänge im Absorber, im Rücklaufdampf-Deflegmator und in den übrigen Teilen des Aggregates sich zu einem geschlossenen Kreisprozess zusammenstellen lassen

Die Kurve MF beschreibt die Zustands-Änderung der b kg des Rücklaufdampfes und die Kurve KL diejenige der $(1+b)$ kg, die durch den Anpassteil zum Absorber strömen. Die resultierende Änderung dieser beiden Teilprozesse wird durch die Kurve NP angegeben [3], welche für einen resultierenden Massenstrom von einem kg gilt.

5. Absorption

Die Absorption in einer Hilfsgas-Atmosphäre ist wieder dadurch gekennzeichnet, dass der Partialdruck keinen konstanten Wert hat. Auf der «reichen» Seite des Absorbers ist der Partialdruck des NH_3–H_2O-Gemisches grösser, und nimmt kontinuierlich ab, wenn man zur «armen» Seite hinübergeht. Bei den Hilfsgas-Absorptionsaggregaten wird ausschliesslich die Gegenstromabsorption verwendet. Wir wollen sie anhand eines Beispiels erläutern.

Im Grunde genommen kann die Absorption in ähnlicher Weise untersucht werden, wie die schon erwähnte Rücklaufdampf-Deflegmation. Man muss die Hilfslinien für eine isobare Gegenstrom-Absorption bei verschiedenen Drücken ermitteln und nachher mit Hilfe der Kontinuitäts-Gleichung die neue Hilfslinie für die Hilfsgas-Absorption berechnen. Unser Beispiel ist auf Bild 6 angegeben.

Die Hilfslinien für isobare Gegenstrom-Absorption bei verschiedenen konstant gehaltenen Drücken befinden sich auf der linken Seite des Bildes. Sie wurden für eine arme Lösung von 2,6% aufgestellt. Dieser Gewichtsanteil entspricht demjenigen des resultierenden Massenstromes auf der «armen» Seite des Absorbers. Man kann diesen Wert leicht berechnen, wenn man bedenkt, dass der Absorber mit 30% reicher bzw. 10% armer Lösung arbeitet und dass das Kondensat 98% Kältemittel enthält. Damit ergibt sich der auf 1 kg Kondensat bezogene Massenstrom der armen Lösung $g = 3{,}4$ kg. Weiter ist der resultierende Massenstrom durch den Rücklaufdampf-Deflegmator $b = 0{,}24$ kg. Der Gegenstrom am «armen» Ende des Absorbers von 3,4 kg armer Lösung mit 10% und 0,25 kg Dampf mit ~100% ergibt eine resultierende arme Lösung von 2,6% Gewichtsanteil.

Mit den Hilfslinien der isobaren Gegenstrom-Absorption für die resultierende arme Lösung von 2,6% wurde die Zustandsänderung Q R des Hilfsgas-Absorbers in ähnlicher Weise wie bei dem früher betrachteten Rücklaufdampf-Deflegmator ermittelt.

Der Wasser-Massenstrom in der Lösung des Absorbers ändert sich wegen der geringen Wasserverdampfung nicht stark. Trotzdem ist es jedoch nicht ganz berechtigt, diejenige Methode zur Berechnung des Absorbers zu benutzen, die man üblicherweise bei Gas-Waschkolonnen anwendet (siehe zum Beispiel [6]), und welche auf einem konstanten Massenstrom des Waschmittels beruht.

6. Kreisprozess des Kältemittel-Absorptionsmittel-Gemisches

Auf den früher betrachteten Bildern 4 und 5 wurden schon einige Teilprozesse zusammengestellt. Es bleibt nun, den oberen Teil des «Kälteteiles» des Kreisprozesses zu betrachten und weiter zu untersuchen, ob man den Absorber zusammen mit dem Rücklaufdampf-Deflegmator kombinieren kann, um einen an sich geschlossenen Teil des Kreisprozesses zu bekommen. Zum Beweis, dass so etwas möglich ist, betrachten wir das Schema Bild 7.

Man sieht dort die zwei Grenzlinien für die Drücke p_2 und p_1, welche am Ein- und Austritt des Absorbers herrschen. Die verschiedenen Hilfslinien für Absorption, Rücklaufdampf-Deflegmation, Dampfanpassung und arme und reiche Lösung sind ebenfalls eingetragen. Die verschiedenen Längenverhältnisse sind durch die entsprechenden Massenströme charakterisiert, die auf Bild 2 schon angegeden sind. Diese Längen sind auf Bild 7 mit Strich′, Doppelstrich″, Punkt. und Doppelpunkt.. gekennzeichnet, um zu zeigen, dass jede Kennzeichnung eine andere Längeneinheit besitzt. Wenn man verschieden gekennzeichnete Längen in Beziehung zu einander bringt, dann darf man nur mit Verhältnissen arbeiten. Dies wird weiter durch den Gebrauch klarer.

Betrachten wir zunächst den oberen Teil des Bildes 7, auf dem die Zustände am reichen Ende des Absorbers dargestellt sind. Wir sehen sofort, dass folgende Gleichungen gelten:

$$\frac{(24)}{(23)} = \frac{(1+b+f)'}{(1+b)'} = \frac{(1+b+f)}{(1+b)}$$

und

$$\frac{(12)}{(23)} = \frac{(1+b+f)''}{(g-b)''} = \frac{(1+b+f)}{(g-b)}$$

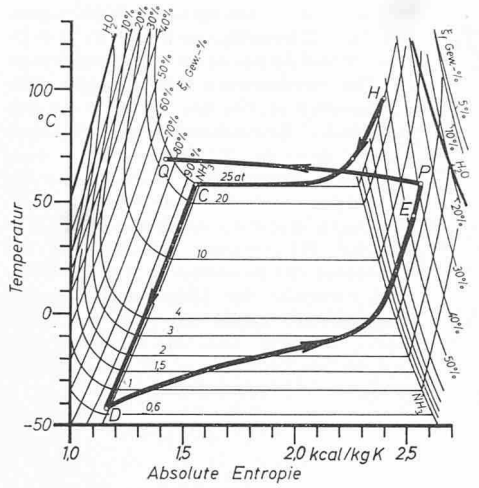

Bild 8 (links). Der «Kälteteil» des Kreisprozesses mit dem Zweistoffgemisch Kältemittel-Absorptionsmittel. Das Hilfsgas und die Mischungsentropie sind noch nicht berücksichtigt

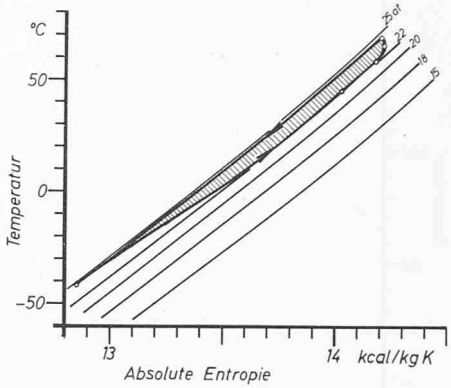

Bild 9 (rechts). Der Kreisprozess des Wasserstoff-Hilfsgases, der dem Kreisprozess des Zweistoffgemisches Kältemittel-Absorptionsmittel des Bildes 8 entspricht. Totaler Arbeitsdruck 25 at

Aus diesen zwei Beziehungen ergibt sich

$$\frac{(24)}{(23)} \cdot \frac{(23)}{(12)} = \frac{(1+b+f)}{(1+b)} \cdot \frac{(g-b)}{(1+b+f)}$$

oder

$$(1) \qquad \frac{(24)}{(12)} = \frac{(g-b)}{(1+b)}$$

Auf Bild 7 sind die Massenströme, die den verschiedenen Teilprozessen entsprechen, in rechteckigen Rähmchen angegeben. Der Absorber wird also durch $(g-b)$ kg und der Dampfanpassteil durch $(1+b)$ kg durchgeströmt. Dementsprechend muss der resultierende Punkt r der beiden Punkte 1 und 4 die gleiche Temperatur haben und zwischen diesen beiden Punkten liegen. Es muss weiter gelten [3]

$$(2) \qquad \frac{(r4)}{(1r)} = \frac{(g-b)}{(1+b)}$$

Der Vergleich der Beziehungen (1) und (2) zeigt, dass der resultierende Punkt r mit dem Punkt 2 identisch sein muss, der auf der Grenzlinie für den Druck p_1 liegt. Durch den gleichen Punkt aber muss auch die Linie für die reiche Lösung gehen. Damit hat sich ergeben, dass der aus 1 und 4 resultierende Punkt r identisch mit dem Punkt 2 der reichen Lösung ist und dadurch der Anschluss des Absorptionsvorganges und des Vorganges im Dampfanpassungsteil an den Antriebsteil[4]) des Kältekreisprozesses möglich ist.

Es ist nun noch der untere Teil des Bildes 7 zu untersuchen, um festzustellen, ob sich dort auch eine geschlossene Kurve ergibt. Zunächst ist daran zu erinnern, dass 7 der resultierende Punkt aus 8 und 10 ist. Es bleibt nun zu finden, wo der resultierende Punkt aus 5 und 6 liegt. Ist dieser Punkt mit dem Punkt 7 identisch, dann kann auch dieser untere Teil des Bildes 7 einen geschlossenen Kreisprozess liefern. Um das zu beweisen, betrachten wir zuerst die Punkte 5 und 6. Der resultierende Massenstrom ist $g-(g-b) = b$ und die Entropie $\bar{S}$ des resultierenden Massenstroms muss einen solchen Wert haben, dass:

$$S_6 \cdot g - S_5 (g-b) = b \cdot \bar{S}$$

oder

$$\frac{(\bar{S}-S_5)}{(S_6-S_5)} = \frac{g}{b}$$

[4]) Als «Antriebsteil» bezeichnet man den oberen Teil des Kreisprozesses, wie er zum Beispiel in Bild 10 oberhalb der Linie X X′ dargestellt ist.

Diese Beziehung kann weiter wie folgt geschrieben werden:

$$\frac{(\bar{S}-S_6)}{(S_6-S_5)} = \frac{(g-b)}{b}$$

oder

$$(3) \qquad \frac{(\bar{S}-S_6)/(b+l)}{(S_6-S_5)/(b+l)} = \frac{g-b}{b}$$

Wenn man die Punkte 5, 6 und 9 in Bild 7 betrachtet, ergibt sich:

$$\frac{(S_6-S_5)}{(S_9-S_6)} = \frac{(b+l)^{\cdot\cdot}}{(g-b)^{\cdot\cdot}} = \frac{(b+l)}{(g-b)}$$

oder

$$\frac{(S_6-S_5)}{(b+l)} = \frac{(S_9-S_6)}{(g-b)}$$

Wenn nun dieser Wert in die Beziehung (3) eingetragen wird, ergibt sich:

$$\frac{(\bar{S}-S_6)/(b+l)}{(S_9-S_6)/(g-b)} = \frac{g-b}{b}$$

oder

$$(4) \qquad \frac{\bar{S}-S_6}{S_9-S_6} = \frac{b+l}{b}$$

Aus dem Bild 7 ist aber ersichtlich, dass

$$(5) \qquad \frac{S_{10}-S_6}{S_9-S_6} = \frac{(b+l)^{\cdot}}{b^{\cdot}} = \frac{b+l}{b}$$

ist.

Der Vergleich der Gleichungen (4) und (5) liefert den Beweis, dass $\bar{S} = S_{10}$ ist. Es ist also der resultierende Punkt der Punkte 5 und 6 identisch mit dem resultierenden Punkt 10 der zwei anderen Punkte 7 und 8. Diese Tatsache erlaubt die Zusammenstellung aller Teilprozesse zu einem geschlossenen Kreisprozess, was auf Bild 8 durchgeführt ist.

Auf Bild 8 stellt HC die Kondensation des 98 %igen Dampfes und CD die Abkühlung des Kondensates dar. DE bedeutet die resultierende Änderung aus der Verdampfung und einem Teil der Rücklaufdampf-Deflegmation. Das Stück EP entspricht der Resultierenden aus der Anpassung und der Rück-

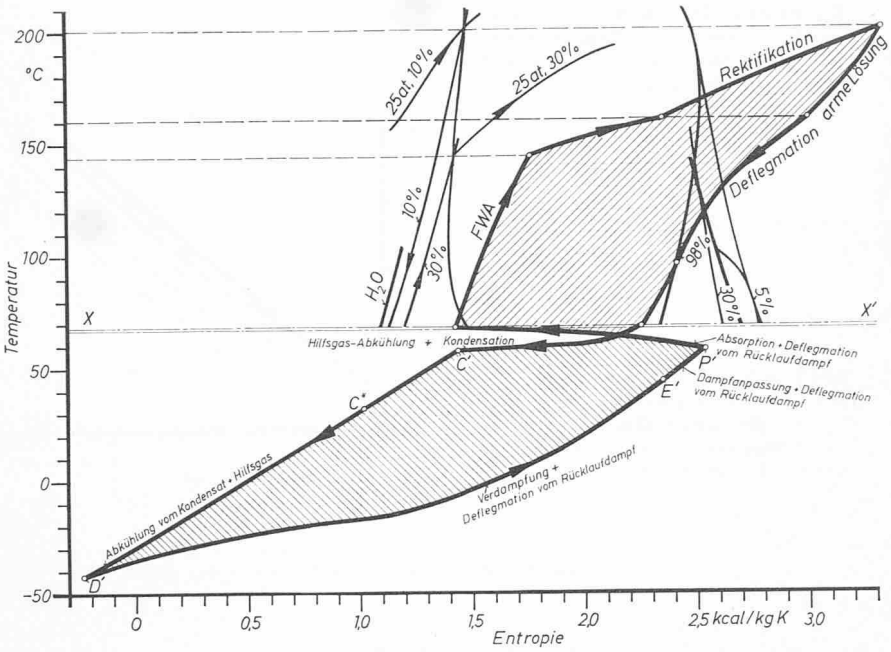

Bild 10. Der Absorptions-Kälte-Kreisprozess des Dreistoffgemisches NH_3–H_2O–H_2 ohne Berücksichtigung der Mischungsentropie. Die verschiedenen Wärmemengen können trotzdem als Flächen unterhalb der entsprechenden Zustandsänderungen abgelesen werden, denn die Mischungsentropie muss dazu nicht berücksichtigt werden. Um die Kälteleistung zu bekommen, muss man von der Fläche unterhalb der Änderung D'E'P' diejenige Wärmemenge abziehen, die zur Abkühlung des Kondensates und des Hilfsgases unterhalb der Umgebungstemperatur nötig ist, und welche unterhalb der Änderung C*D' liegt. Oberhalb der Linie XX' sind die absoluten Werte der Entropie eingetragen, unterhalb nur die relativen

laufdampf-Deflegmation und schliesslich stellt PQ die Resultierende aus der Absorption der armen Lösung und der Rücklaufdampf-Deflegmation dar. Die Punkte H und Q können nun ohne weiteres an den oberen Teil des «Antriebsteiles» des Kreisprozesses angeschlossen werden, um den ganzen Kreisprozess zu schliessen.

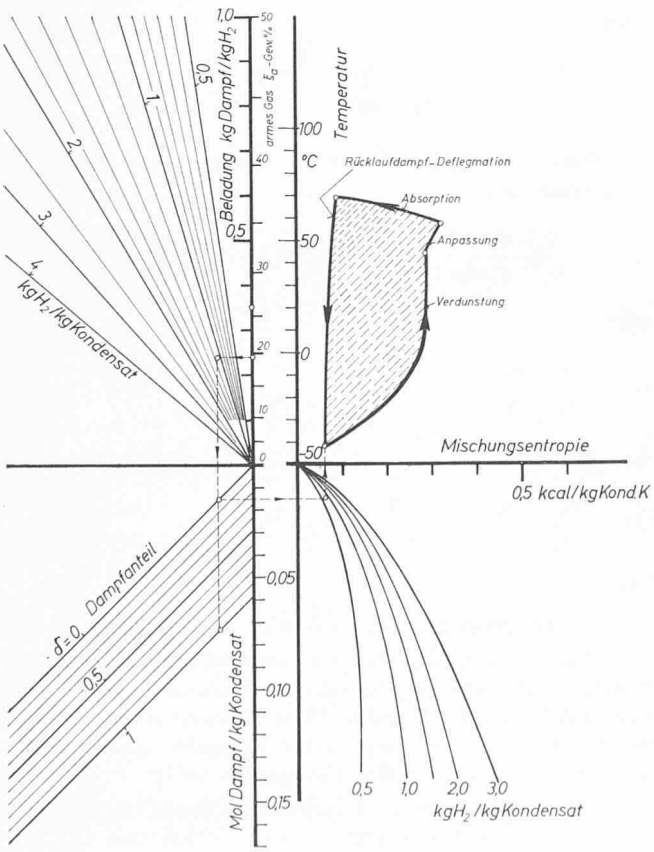

Bild 11. Zur Berechnung der idealen Mischungsentropie von NH_3–H_2O–H_2-Gemischen. Auf dem oberen rechten Teil ist der «Kreisprozess» der Mischungsentropie dargestellt

7. Das Hilfsgas

Das Hilfsgas beeinflusst den Kreisprozess nur in seinem «Kälteteil», wo alle drei Stoffe gleichzeitig auftreten. Der totale Druck ist im ganzen Aggregat konstant. Sein Wert erlaubt die Berechnung des Paritialdruckes des Hilfsgases, wenn der Partialdruck des Kältemittel-Absorptionsmittel-Gemisches bekannt ist. Für unser Beispiel haben wir schon alle Zustände dieses Gemisches ermittelt; man kann zum Beispiel den Druck und die entsprechende Temperatur Bild 8 entnehmen. Für den totalen Arbeitsdruck von 25 at ergibt sich dann auf dem Temperatur-Entropie-Diagramm des Wasserstoffes der Kreisprozess des Hilfsgases. Dieser Prozess ist für unser Beispiel im *T, S*-Diagramm Bild 9 eingetragen.

Wenn nun die Entropieströme aus den beiden Bildern 8 und 9 addiert werden und der bekannte «Antriebsteil» des Kreisprozesses [3] mitberücksichtigt wird, dann ergibt sich der Kreisprozess des Kälteaggregates, jedoch ohne Berücksichtigung der Mischungsentropie.

Auf Bild 10 ist diese Zusammensetzung durchgeführt. Der Vergleich zu Bild 8 zeigt deutlich den Einfluss des Hilfsgases. Obwohl auf Bild 10 die Mischungsentropie noch nicht berücksichtigt ist, können doch ohne weiteres die Wärmemengen unterhalb der entsprechenden Zustandslinien abgelesen werden, denn hiefür muss die Mischungsentropie nicht bekannt sein.

Der Vergleich der Bilder 10 und 8 zeigt klar die erhöhte Wärmemenge, die zur Abkühlung des Kondensates und des Hilfsgases nötig ist. Die wichtige Rolle des Gaswärmeaustauschers als auch seine Grösse ist damit anschaulich hervorgehoben.

Um die Kälteleistung zu berechnen, muss man von der Fläche unterhalb der Kurve D'E'P' diejenige Wärmemenge abziehen, die zur Abkühlung des Kondensates und des Hilfsgases unter die Umgebungstemperatur nötig ist und welche unter der Linie C*D' liegt. Die Abkühlung von C' auf C* erfolgt durch Wärmeabgabe an die Umgebung.

8. Die Mischungsentropie

Bei der Berechnung der Entropie des Ammoniak-Wasser-Dampfgemisches wird immer nur die ideale Mischungsentropie berücksichtigt, während man die Mischungswärme als vernachlässigbar klein betrachtet. Die gleiche Annahme wollen

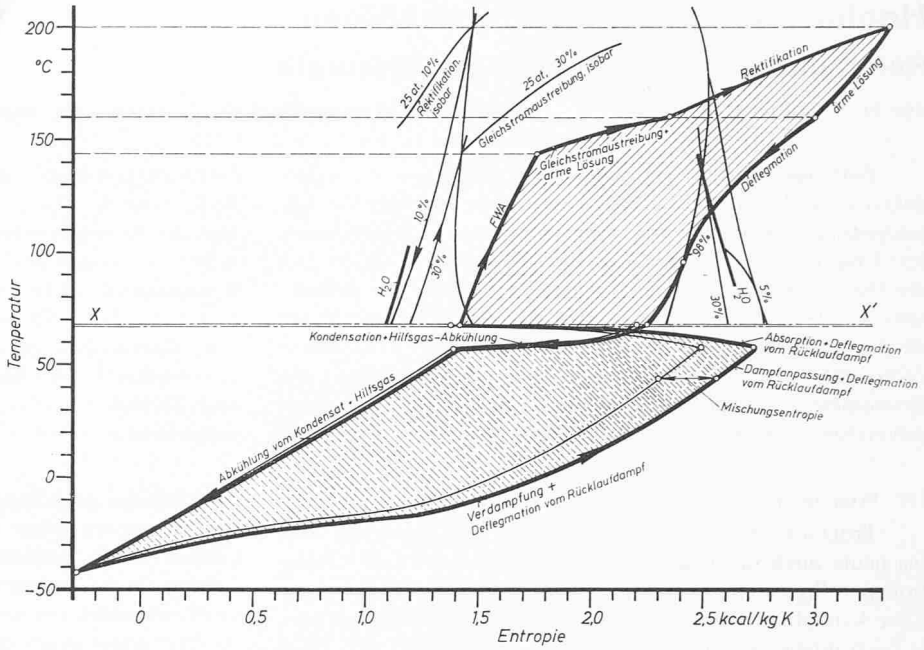

Bild 12. Der Kreisprozess des Hilfsgas-Absorptionskälteaggregates. Der Teil des Kreisprozesses unterhalb der Linie XX' enthält die Mischungsentropie wegen des Hilfsgases

wir hier auch für das Dreistoffgemisch treffen. Die Mischungsentropie des Zweistoffgemisches Ammoniak-Wasser ist schon berücksichtigt; wir werden weiter dieses Gemisch als einen einheitlichen Stoff betrachten, der mit dem Hilfsgas gemischt wird. Wegen des sehr ähnlichen Molekular-Gewichtes vom Ammoniak und Wasser ist auch die rechnerische Behandlung stark vereinfacht, wenn man die beiden Stoffe als ähnlich behandelt.

Die ideale Mischungsentropie zweier Stoffe kann nach der bekannten Beziehung berechnet werden, die in [7] angegeben ist. Für unsere Zwecke ist es vorteilhafter, diese Beziehung in der Form des Diagrammes Bild 11 darzustellen.

Der Gebrauch dieses Bildes ist einfach, so dass es nicht näher erläutert werden muss. In seinem oberen rechten Teil ist der «Kreisprozess» der Mischungsentropie dargestellt. Die zu jedem Zustandpunkt des Kreisprozesses auf Bild 10 entsprechende Mischungsentropie kann Bild 11 entnommen werden. Die Summe dieser zwei Werte liefert die Entropie des Gemisches für den betreffenden Punkt.

9. Der Kreisprozess

Durch die mittels Bild 11 berechneten Werte der Mischungsentropie wurde das Bild 10 weiter ergänzt, um den genauen Kreisprozess des Hilfsgas-Absorptionskälteaggregates zu erhalten. Das Ergebnis sieht man auf Bild 12. Die dünngezogene Linie im unteren Teil des Kreisprozesses entspricht Bild 10 und liefert die Grösse der Mischungsentropie. Zur Berechnung der Wärmemengen muss jedoch die dünngezogene Linie verwendet werden oder noch besser der Linienzug auf Bild 10.

Der Antriebsteil des Kreisprozesses wurde im ganzen Beispiel genau gleich gehalten wie bei einem schon früher veröffentlichten [3] Kreisprozess einer Kälteanlage mit zwei Druckstufen und Lösungspumpe. Damit kann ein besserer Überblick über den Einfluss des Hilfsgases gewonnen werden. In den wirklichen Kreisprozessen treten unvermeidliche Partialdrucksprünge und Temperaturunterschiede auf, welche das Bild des hier betrachteten Kreisprozesses modifizieren. Der Haupteinfluss dieser Irreversibilitäten besteht darin, dass einerseits die Verdampfungstemperaturen höher bleiben und anderseits der Absorber beträchtlich kühler gehalten werden muss, um mit dem gleichen Gasgewichtsanteil arbeiten zu können.

Bezeichnungen

b	Dampfmenge am Austritt des Rücklaufdampf-Deflegmators je kg Kondensat.
f	Flüssigkeit, abgezapft vom Absorber für die «Anpassung» je kg Kondensat.
g	Umlaufende arme Lösung je kg Kondensat.
l	Flüssigkeit am Eintritt des Rücklaufdampf-Deflegmators je kg Kondensat.
S	Entropie [kcal/kg K]
$\overline{S}$	Entropie der resultierenden Strömung [kcal/kg K]
T	Temperatur [K]
δ	Dampfanteil eines Dampf-Flüssigkeits-Gemisches je kg Kondensat.
φ	Flüssigkeitsanteil eines Dampf-Flüssigkeits-Gemisches je kg Kondensat.
ξ Gew.-%	Kältemittelkonzentration
ξ_a Gew.-%	Kältemittelkonzentration des armen Gases
ξ_f Gew.-%	Kältemittelkonzentration der Flüssigkeit

Literaturverzeichnis

[1] *D. Kouremenos:* The Resorption Refrigeration Cycle on the Temperature-Entropy Diagram; XIII. Int. Congress of Refrigeration, Aug./Sept. 1971 Washington D.C., paper 2.39

[2] *D. Kouremenos:* Das *T,S*-Diagramm der Absorptionskältemaschine; Kältetechnik – Klimatisierung *23* (1971), H. 5, S. 155/161

[3] *D. Kouremenos:* Darstellung des Kreisprozesses einer Absorptionskältemaschine im *T,S*-Diagramm; Kältetechnik – Klimatisierung *23* (1971), H. 12, S. 351/356

[4] *D. Kouremenos:* The Thermodynamic Properties of Ammonia-Hydrogen Gas Mixtures; A Temperature Mass Fraction Diagram for Evaporation Purposes; XIII. Int. Congress of Refrigeration, Aug./Sept. 1971 Washington D.C., paper 2.40

[5] *T.A. Wilson:* The total and partial vapor pressure of aqueous ammonia solutions; Univ. Illinois Eng. Exp. Station Bul. 146, 1925

[6] *P. Grassmann:* Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik; 2. Auflage, Aarau & Frankfurt/M. 1970, Sauerländer Verlag

[7] *P. Grassmann:* Einführung in die thermische Verfahrenstechnik. Berlin 1967, W. de Gruyter & CO. Verlag

Adresse des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. *D.A. Kouremenos*, Alitsis 13, Athen 103.