



Abschlußbericht

**zum Forschungsvorhaben der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt e.V.**

Untersuchungen zur Hermetisierung und zum Einsatz neuer Werkstoffe in Ammoniak-Kälteanlagen kleiner und mittlerer Leistung

durchgeführt vom

01.10.1994 - 31.03.1996

am

**Institut für Kältetechnik
und Angewandte Wärmetechnik
Universität Hannover**

**Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Horst Kruse
Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Manfred Burke**

Hannover im Mai 1996

INHALT

1. Einleitung	1
2. Das Kältemittel Ammoniak.....	2
3. Sicherheitsvorschriften für NH ₃ -Kälteanlagen.....	3
4. Stand der Forschungsarbeiten zu Projektbeginn.....	5
5. Ziele des Forschungsvorhabens	8
6. Durchführung des Forschungsvorhabens	9
6.1 Teilnehmer des Forschungsprojektes.....	9
6.2 Verlauf des Forschungsvorhabens	11
7. Ergebnisse des Forschungsvorhabens	13
7.1 Aufbau der Ammoniak-Versuchskälteanlage.....	13
7.2 Werkstoff Aluminium und gewählte Verbindungstechniken.....	16
7.2.1 Aluminium	16
7.2.2 Nicht lösbare Verbindungstechniken	17
7.2.3 Lösbare Verbindungstechniken	18
7.2.4 Ergebnis der metallurgischen Untersuchungen.....	20
7.3 Reinigung der Kälteanlage.....	20
7.4 Untersuchung zur trockenen Verdampfung in Plattenwärmetauschern.....	21
7.5 Ammoniak-Kalorimeter	25
7.5.1 Aufbau des Sekundärflüssigkeitskalorimeters	26
7.5.2 Aufbau und Inbetriebnahme des Ammoniak-Kalorimeters	29
7.5.3 Vergleich des Anlagenverhaltens von Ammoniak und R22	33
7.5.4 Verdichterleistungsmessungen mit Ammoniak.....	38
7.6 Halbhermetischer Ammoniakverdichter	40
8. Zusammenfassung und Ausblick.....	43
Literaturverzeichnis	46

1. EINLEITUNG

Als Geburtsjahr der Kompressionskältemaschinen gilt das Jahr 1834, in dem Jakob Perkins am 14. August sein britisches Patent Nr. 6662 "Apparatus for Producing Cold and Cooling Fluids" unter Verwendung des hochexplosiven Kältemittels Äther anmeldete [21]. Etwa 40 Jahre später schlug Carl von Linde in seinem Patentantrag von 1876 erstmals das Kältemittel Ammoniak für den Kaltdampfprozeß vor, nachdem Ferdinand Carré sich bereits 1859 Ammoniak und Wasser als Arbeitsstoffe in Absorptionskälteanlagen patentieren ließ. Den Durchbruch als Arbeitsstoff in Kompressionskälteanlagen, die zunächst vorwiegend in großen Brauereien eingesetzt wurden, erlangte Ammoniak durch die Weltausstellung 1878 in Paris. Anschließend wurde es in nahezu allen Bereichen der Kältetechnik bis zur Einführung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) eingesetzt. Von diesen wurde das Kältemittel Ammoniak insbesondere wegen dessen Toxizität und Entflammbarkeit, dessen Unverträglichkeit mit Kupfer und anderen Buntmetallen sowie dessen extrem geringer Löslichkeit mit den eingesetzten Kältemaschinenölen, wodurch eine selbsttätige Ölrückführung aus dem Verdampfer zum Verdichter nur unter konstruktiven Aufwand gewährleistet werden konnte, nach und nach aus kleinen Kälteanlagen verdrängt. In Kälteanlagen großer Leistung dagegen hat dieses energetisch sehr günstige Kältemittel mit der Bezeichnung R717 sich bis heute behaupten können [6,25].

Ausgelöst durch die FCKW-Halon-Verbotsverordnung steht Ammoniak als Alternativkältemittel wieder verstärkt zur Diskussion, da es weder ein direktes Ozonabbau- noch ein direktes Treibhauspotential besitzt. In Zusammenarbeit mit der Industrie und dem Handwerk wurden daher am Institut für Kältetechnik und Angewandte Wärmetechnik der Universität Hannover (IKW) im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Möglichkeiten zum wirtschaftlichen Einsatz des Kältemittels Ammoniak in Kälteanlagen kleiner und mittlerer Leistung untersucht. Durch den Einsatz eines ammoniaklöslichen Schmierstoffes sollte auch für Ammoniak-Kälteanlagen eine "einfache" Anlagenschaltung mit selbsttätiger Ölrückführung ermöglicht werden, wie sie bislang den Halogen-Kältemitteln vorbehalten ist. Alternativ zu den bislang in Ammoniak-Kälteanlagen eingesetzten Stahlwerkstoffen wird der Werkstoff Aluminium verwendet. Neben einem günstigen Preis kann zur Bearbeitung dieses Werkstoffes - mit Biegen, Bördeln oder Löten - auf für den Kälteanlagenbauer vertraute Techniken zurückgegriffen werden, wie sie derzeit nur bei Kupferrohren üblich sind. Zur vollständigen Hermetisierung der Kälteanlage soll ein im Rahmen dieses Forschungsvorhabens von der Bock Kältemaschinenfabrik GmbH entwickelter, halbhermetischer NH₃-Verdichter eingesetzt und dessen Betriebsverhalten experimentell erprobt werden.

2. DAS KÄLTEMITTEL AMMONIAK

Von den in der Tabelle 1 aufgeführten Kältemitteln für Kompressionskälteanlagen ist Ammoniak das einzige, das sowohl ein Ozonzerstörungspotential (ODP) als auch ein Treibhauspotential (GWP) von 0 besitzt. Auf der Wunschliste des Deutschen Bundesumweltamtes [9] wird Ammoniak nach Wasser, Kohlendioxid, Luft und Kohlenwasserstoffen sowie Alkoholverbindungen an vierter Stelle genannt, gefolgt von den fluorierten Kohlenwasserstoffen (FKW) auf Rang fünf.

Tabelle 1: Kältemittel für Kompressionskälteanlagen

Kältemittel	Bez.	Chem. Formel	M [g/mol]	t_s [°C]	t_{kr} [°C]	p_{kr} [bar]	ODP ¹ [-]	GWP ² [-]
Dichlordifluormethan	R12	CCl_2F_2	120,93	-29,8	112,0	41,1	1,0	8500
Chlordifluormethan	R22	$CHClF_2$	86,48	-40,8	96,0	49,7	0,055	1700
Blend R22/R115 (48,5/51,2)	R502	$CHClF_2$ CCl_2CF_3	111,64	-45,4	82,2	40,7	0,330	5591
Difluormethan	R32 ^b	CH_2F_2	52,02	-51,8	78,4	58,3	0	580
Pentafluorethan	R125	CHF_2CF_3	120,03	-48,6	66,3	36,3	0	3200
Trifluorethan	R143a ^b	CF_3CH_3	84,04	-47,3	73,0	37,8	0	4400
Tetrafluorethan	R134a	CF_3CH_2F	102,03	-26,2	101,1	40,7	0	1300
Propan	R290 ^b	C_3H_8	44,10	-42,1	96,8	42,5	0	3
Kohlendioxid	R744	CO_2	44,01	-78,4	31,1	73,7	0	1
Ammoniak	R717 ^b	NH_3	17,03	-33,3	133,0	114,2	0	0

¹ ODP bezogen auf R11, ² GWP bezogen auf CO₂ und einen Zeitraum von 100 Jahren, ^b brennbar

Gegenüber anderen Kältemitteln besitzt Ammoniak eine geringe Molmasse, die einem energetisch günstigen Verdichtungsprozeß in Hubkolbenverdichtern zuträglich ist [25], sowie eine sehr hohe kritische Temperatur, wodurch die Anwendung dieses Kältemittels in einem großen Temperaturbereich möglich wird. Mit Ammoniak steht ein Kältemittel zur Verfügung, das eine große spezifische Verdampfungswärme, eine hohe volumetrische Kälteleistung sowie einen vergleichsweise hohen Wärmeübergangskoeffizienten besitzt, wodurch bei gleicher Leistung gegenüber den fluorierten und chlorierten Kohlenwasserstoffen Apparate und Rohrleitungen von deutlich geringeren geometrischen Abmessungen und dementsprechend geringere Kältemittelmengen eingesetzt werden können. Zudem besitzt Ammoniak - ähnlich wie die Kohlenwasserstoffe - gegenüber den Halogenkohlenwasserstoffen eine nur etwa halb so große Flüssigkeitsdichte, wodurch auch die einzufüllende Kältemittelmasse gering gehalten werden kann. Gegenüber Wasser besitzt Ammoniak eine deutlich höhere Toleranz als die sonst üblichen Kältemittel. Ausfrierungen, beispielsweise am Expansionsventil, treten daher erst bei deutlich höheren Wasserkonzentrationen auf, die in der Praxis kaum erreicht werden können. Durch seinen markanten Geruch - bereits 5 ppm Ammoniak in der Luft werden vom menschlichen Geruchssinn wahrgenommen [10] - lassen sich Leckagen schneller entdecken als bei Halogenkohlenwasserstoffen, die vorwiegend geruchlos sind. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß Ammoniak leichter ist als Luft, was die Abführung ausgetretenen Kältemittels deutlich vereinfacht. Zudem ist Ammoniak preiswert und in ausreichenden Mengen verfügbar.

Nachteilig ist die Unverträglichkeit von Ammoniak mit den in der Kältetechnik üblichen Werkstoffen wie Kupfer, Messing oder anderen Buntmetallen sowie die extrem geringe Mischbarkeit mit üblichen Kältemaschinenölen [32]. Weiterhin zu beachten ist die vergleichsweise hohe Verdichtungsendtemperatur von Ammoniak. Als besonderes ungünstig gilt die Brennbarkeit und Toxizität von Ammoniak. An feuchten Hautstellen und besonders an Wahrnehmungsorganen wie Nase, Augen oder Mund hat es eine ätzende und giftige Wirkung. Der MAK-Wert von Ammoniak liegt bei 50 ppm, Konzentrationen oberhalb von 500 bis 1000 ppm werden vom Menschen als nicht mehr erträglich empfunden. Eine Aufenthaltsdauer von drei Minuten unter einer Belastung von 2000 ppm ist lebensgefährlich. Konzentrationen oberhalb von 5000 ppm haben innerhalb kürzester Zeit eine tödliche Wirkung. Besonders zu beachten ist die Panikwirkung von Ammoniak [6, 10].

Ammoniak ist prinzipiell brennbar, wird aber als schwer entzündliches Gas eingestuft, dessen Explosionsgefahr im Gemisch mit Luft verhältnismäßig gering ist und durch die Anwesenheit von Luftfeuchtigkeit weiter eingeschränkt wird. Im Freien ist die Explosionsgefahr nahezu ausgeschlossen, es sei denn, im austretenden Dampf sind neben Ammoniak weitere brennbare Stoffe enthalten [10]. Sowohl die Brennbarkeit als auch die Toxizität haben dazu geführt, daß Ammoniak gegenüber den halogenierten Kohlenwasserstoffen deutlich strengeren Sicherheitsvorschriften unterliegt.

3. SICHERHEITSVORSCHRIFTEN FÜR NH₃-KÄLTEANLAGEN

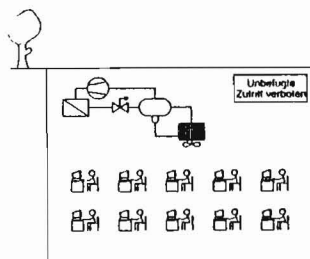
Wie alle übrigen Kältemittel unterliegt auch Ammoniak der Unfallverhütungsvorschrift (UVV) "Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen" (VBG20). Die aktuelle Fassung ist vom 1. Januar 1993 [4]. Demnach wird Ammoniak in die Gruppe II (im Entwurf der neuen DIN EN 378, Teil 3: Klassifizierung von Kälteanlagen, Kältemitteln und Aufstellungsbereichen entspricht dies der Gruppe L2b) eingestuft, die "giftige oder ätzende Kältemittel oder solche, deren Gemisch mit Luft eine untere Explosionsgrenze von mindestens 3,5 Vol. % hat" enthält. Für das Kältemittel Ammoniak besonders einschneidende Auswirkungen hat der § 16 der UVV zur Aufstellung von Kälteanlagen, in dem das zulässige Füllgewicht unter Berücksichtigung des Aufstellungsbereiches, der Kältemittelgruppe, des Kälteübertragungssystems und des Aufstellungsraums festgelegt wird.

Wesentliche Kriterien dabei sind,

1. ob der Aufstellungsbereich öffentlich oder nur für befugte Personen zugänglich ist,
2. ob es sich um ein direktes System handelt oder ein indirektes System, wo in einem Sekundärkreislauf der Energietransport mit Hilfe eines sogenannten Kälte-trägers bewerkstelligt wird, und
3. ob das System oder Teile davon in einem Maschinenraum untergebracht sind.

Der Maschinenraum darf nicht unterhalb des ersten Untergeschosses gelegen sein und muß bei Gefahr schnell verlassen werden können. Er muß so eingerichtet sein, daß freiwerdendes Kältemittel gefahrlos abgeführt werden kann. Dies kann durch eine Lüftung in die Umgebung realisiert werden, die entsprechend der vorhandenen Kältemittelmenge dimensioniert werden muß. Für sehr große Kältemittelmengen reicht ein zwanzigfacher Luftwechsel bezogen auf das Volumen des Maschinenraumes pro Stunde aus. Eine weitere Möglichkeit zur Abführung frei werdenden Kältemittels bieten Absorptionssysteme, die in der Lage sein müssen, die gesamte austretende Kältemittelmasse aufzunehmen. Für Ammoniak wird als Absorptionsmittel vorwiegend Wasser eingesetzt, wobei das Verhältnis der Kältemittelmasse zur Masse des Wassers im Absorber den Wert 0,12 nicht überschreiten darf.

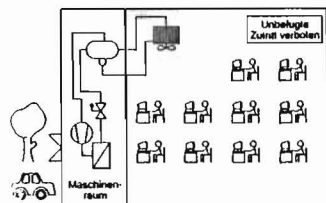
Tabelle 2: Vorschriften für Ammoniak-Systeme ohne Maschinenraum



Personal	befugt			allgemein
	Aufstellungsort	ab 1. UG aufwärts		
Aufstellungsort	unterhalb des 1. UG	ab 1. UG aufwärts		Absorptionskälteanlage in allen OG und UG
Füllmenge	< 2,5 kg	< 10 kg	< 50 kg	< 2,5 kg
zulässige Personenzahl	unbegrenzt		$\frac{1 \text{ Person}}{10 \text{ m}^2}$	unbegrenzt

Tabelle 3: Vorschriften für hochdruckseitig im Maschinenraum untergebrachte Ammoniak-Systeme

- Verdichter und Sammler im Maschinenraum

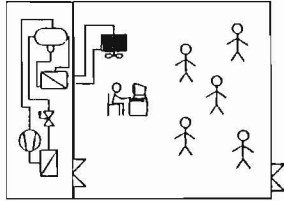


Personal	befugt		unbefugt
	NH ₃ -System	indirekt	
NH ₃ -System	direkt	indirekt	Absorptionskälteanlage
Aufstellungsort	nur Verdampfer unterhalb 1. UG	1. UG aufwärts	in allen OG +UG
Füllmenge	unbegrenzt	< 50 kg	< 2,5 kg
zulässige Personenzahl	$\frac{1 \text{ Person}}{10 \text{ m}^2}$	unbegr.	unbegrenzt

Die Bestimmungen des § 16 der UVV (VBG20) [4] sind in Abhängigkeit der o.g. Kriterien in den Tabellen 2 bis 4 dargestellt. Demnach kann unabhängig vom Aufstellungsort und den sich dort befindenden Personen nur eine Ammoniak-Absorptionskälteanlage mit einer Füllung geringer als 2,5 kg verwendet werden. Absorberaggregate einer Kälteleistung, wie sie z. B. wegen ihrer geringen Geräusentwicklung in Hotelkühlschränken oder auch im Campingbereich

eingesetzt werden, da diese befeuert angetrieben werden können, finden im hier betrachteten Leistungsbereich, der vorwiegend durch Kompressionskälteanlagen abgedeckt wird, kaum Verwendung.

Tabelle 4: Vorschriften für kältemittelseitig im Maschinenraum untergebrachte Ammoniak-Systeme



Personal	befugt	unbefugt		
		NH ₃ -System		indirekt
	direkt oder indirekt	Absorption direkt / indir.		
Aufstellungsort	1. UG aufwärts	in allen UG + OG	1. UG aufwärts → Verbindung mit Maschinenraum	
			ja	nein
Füllmenge	unbegrenzt	< 2,5 kg	< 250 kg	unbegrenzt
zulässige Personenzahl	unbegrenzt	unbegrenzt	unbegrenzt	

Die in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Kompressionskälteanlagen mit dem Kältemittel Ammoniak dürfen in öffentlich zugänglichen Bereichen nur dann aufgestellt werden, wenn sie als indirektes System ausgeführt sind, wobei alle kältemittelführenden Teile in einem Maschinenraum untergebracht sein müssen. Direkte Ammoniak-Systeme ohne Maschinenraum dürfen lediglich in nicht öffentlich zugänglichen Bereichen aufgestellt werden, in denen sich ausschließlich befugtes Personal aufhält. Dabei ist die Füllmenge für Aufstellungen unterhalb des ersten Kellergeschosses auf 2,5 kg limitiert. Ab dem ersten Kellergeschoss aufwärts dürfen unabhängig von der Personenzahl bis zu 10 kg Ammoniak verwendet werden. In Räumen mit weniger als einer Person pro 10 m² Grundfläche sind Füllmengen bis zu 50 kg zulässig. Unter Einsatz moderner Technik sollten diese Füllmengen für den hier diskutierten Leistungsbereich zwischen 2 und 20 kW jedoch ausreichend sein [27,29].

4. STAND DER FORSCHUNGSARBEITEN ZU PROJEKTBEGINN

In kleineren und mittelständischen Unternehmen werden bislang Kälteanlagen eingesetzt und hergestellt, die als Kältemittel vorwiegend halogenierte Kohlenwasserstoffe enthalten. Daß mit Ammoniak eine erfolversprechende Alternative sowohl für die Kältemittel R12, R22 als auch für R502 zur Verfügung stehen könnte, machen die intensiven Forschungsarbeiten in jüngster Zeit deutlich. Grundlegend diskutiert wurde der Einsatz von Ammoniak von Lorentzen [25]: "Ammoniak hat den Vorteil, einen größeren Temperaturbereich als die FCKW's abzudecken Um aber alle Möglichkeiten der üblichen Arbeitsmedien auszuschöpfen, sind Konstruktionsdrücke von 40 bis 50 bar erforderlich Der Druck sollte keine unverhältnismäßige

Schwierigkeiten bei der Konstruktion verursachen, wie die allgemeine Gaskompressor-technologie zeigt". Als wesentlichen Nachteil gegenüber den FCKW bezeichnet er das Risiko der Panik durch austretendes Ammoniak, das es zu vermeiden gilt. Mit Ammoniak steht ein Kältemittel zur Verfügung, das ein niedriges Molekulargewicht und eine hohe Verdampfungsenthalpie besitzt. Gegenüber den FCKW's können bei gleicher Leistung die Abmessungen von Apparaten, Rohrleitungen und Armaturen deutlich kleiner gewählt werden, wodurch sich die Anlagenkosten erheblich reduzieren lassen. Die Wärmeübertragung bei Verdampfung und Kondensation ist effektiver, die Austauschfläche kleiner. Das niedrige Molekulargewicht erlaubt bei Verdrängungsverdichtern eine Reduzierung des Hubvolumens, eine Erhöhung der Ventileinlaß- und -auslaßgeschwindigkeiten, alles Ansätze zur Steigerung des Verdichterwirkungsgrades. Für Turboverdichter ist die geringe Molmasse nicht sehr vorteilhaft. Hier ist Ammoniak nur für sehr große Leistungen konkurrenzfähig. Neben den Nachteilen, die Ammoniak im alltäglichen Handling besitzt, wie zum Beispiel die Notwendigkeit von Stahlbauteilen, die Giftigkeit, den heftigen Geruch oder die prinzipielle Brennbarkeit, besitzt es dort auch Vorteile gegenüber den FCKW-Kältemitteln. Zum Beispiel wird durch die einfache Wahrnehmung von Ammoniak die Lecksuche vereinfacht und auch die Trocknungs- und Entlüftungsvorgänge in der Anlage sind weniger aufwendig. Aus diesen Überlegungen heraus kommt Lorentzen [25] zu dem Schluß: "Wenn man alle oben erwähnten Vorteile ausnutzt, müßte es möglich sein, ein NH₃-System zu bauen, das viel billiger und gleichzeitig effizienter ist als eine entsprechende Halogenkohlenwasserstoff-Anlage, ausgenommen für Anlagen mit sehr kleinen Leistungen."

Einer der Gründe, warum Ammoniak sich gegenüber den FCKW-Kältemitteln in kleineren Anlagen bislang nicht behaupten konnte, liegt in der äußerst geringen Löslichkeit von Ammoniak mit den verwendeten Schmierstoffen, wodurch aufwendige konstruktive Maßnahmen zur Ölrückführung in den Verdichter notwendig werden. Im Rahmen des von der AiF geförderten Forschungsvorhabens "Untersuchungen von Schmierstoffen auf Löslichkeit und Anlagenverhalten mit Ammoniak" [22] konnten am IKW mit Polyglykolen Schmierstoffe ermittelt werden, die, wenn auch im technisch interessanten Temperaturbereich nicht vollständig, so doch für eine selbsttägige Ölrückführung ausreichend mit Ammoniak löslich sind. Bereits zur Internationalen Kälte- und Klima-Messe IKK, die im Oktober 1992 in Nürnberg stattfand, wurden diese Schmierstoffe von der Firma Fuchs Mineralölwerke GmbH [11] als Kältemaschinenöle für Ammoniak auf der "Basis spezieller Polyglykole" vorgestellt, "welche mit NH₃ eine sehr gute Löslichkeit aufweisen" und "neue Wege in der NH₃-Anwendung (geschlossene Kreisläufe; einfache Anlagenkonzeption)" aufzeigen.

Ein großer Teil der derzeitigen Forschungsaktivitäten um das Kältemittel Ammoniak zielt auf die Optimierung von Kälteanlagen größerer Leistung ab. Dabei soll durch den Einsatz neuer und durch die Verbesserung bislang eingesetzter Komponenten zum einen die Effektivität gesteigert und zum anderen das Anlagenvolumen verringert werden. Ziel ist es, für eine Füllmenge unterhalb von 50 kg - Anlagen mit größeren Füllmengen sind laut Vorschrift auch in nicht öffentlich zugänglichen Bereichen in separaten, zwangsbelüfteten Räumen unterzubringen - eine möglichst hohe Kälteleistung zu erzielen. Zum einen wurden die Verdichter optimiert und zum anderen Plattenwärmeübertrager als Verdampfer und Verflüssiger eingesetzt [26,33]. Diese besitzen bei deutlich geringeren Innenvolumen im Vergleich zu Rohrbündel-

wärmeübertragern eine etwa um den Faktor 5 bessere Wärmeübertragung pro Flächeneinheit, bei gleichzeitig geringerer Verschmutzungsanfälligkeit und geringeren Anschaffungskosten [34]. Durch diese Maßnahme konnte die Kälteleistung mit nur 50 kg Ammoniak auf 500 kW [26] bis 700 kW [34] gesteigert werden, wobei hier nach dem Verfahren der überfluteten Verdampfung unter Zuhilfenahme bislang üblicher, mit Ammoniak unlöslicher Öle vorgegangen wurde.

Eine deutliche Verminderung der Füllmenge bei gleicher Kälteleistung wird durch eine trockene Verdampfung ermöglicht. Voraussetzung dafür ist jedoch ein ammoniaklösliches Kältemaschinenöl, wie es in dem oben erwähnten Forschungsprojekt [22] ermittelt wurde. Im November 1991 wurde von der Gebrüder Sulzer AG in Winterthur ein Patent für "Verfahren zum Betreiben einer NH₃-Kälteanlage oder -Wärmepumpe" [12] angemeldet, wo "als Schmiermittel ein flüssiger Stoff aus der Gruppe der Polyalkylenglykole zugeführt wird". Da die Teillöslichkeit des dort verwendeten Polyalkylenglykols eine automatische Ölrückführung nicht in jedem Betriebspunkt gewährleistet, wird in der Patentanmeldung eine Anlagenschaltung vorgeschlagen, in der dieses Problem durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen gelöst wird. In einer späteren Veröffentlichung [31] erfolgt eine erste Bewertung dieser neuen Technologie. Durch den Einsatz des ammoniaklöslichen Öles wurde nicht nur die trockene Verdampfung erst ermöglicht, sondern auch der Wirkungsgrad der Wärmeübertrager verbessert. Eingesetzt wurden in diesem Fall Rohrbündelwärmeübertrager. In den bislang betriebenen Ammoniakanlagen lagerten sich die nicht ammoniaklöslichen Öle im Verdampfer ab und bildeten einen dünnen Film an den Rohrwandungen. Dadurch wurde zum einen der Wärmeübergang deutlich gemindert und zum anderen die Strömung des Ammoniaks behindert. Für Plattenwärmeübertrager dürfte dieser Effekt wegen der geringeren Massenstromdichte noch ausgeprägter in Erscheinung treten. Durch ein mit Ammoniak lösliches Öl wird dieser Effekt verringert.

Durch die trockene Verdampfung war es möglich, für eine Füllmenge von 50 kg eine Kälteleistung von etwa 1300 kW zu erzielen. Mit der gleichen Füllmenge des Kältemittels R22 wäre eine Kälteleistung von nur 300 kW möglich [31]. Eine weitere Steigerung der Kälteleistung ließe sich erreichen, wenn das Prinzip der trockenen Verdampfung auch mit Plattenwärmeübertragern realisiert werden könnte. Dazu durchgeführte Forschungsarbeiten [17] lassen erkennen, daß dazu mehr als nur ein ammoniaklösliches Öl nötig ist.

Auch in Ammoniak-Kälteanlagen kleinerer Leistung hat der Einsatz eines ammoniaklöslichen Schmierstoffes auf die Wärmeübertragung positive Auswirkungen, wie Untersuchungsergebnisse aus Kanada belegen [23]. Mit Hilfe der dadurch ermöglichten trockenen Verdampfung konnte gegenüber der vorher eingesetzten überfluteten Verdampfung die Kältemittelfüllung um nahezu 90% reduziert werden. Eingesetzt wurde in dieser Kälteanlage ein halbhermetischer Verdichter, der zum Schutz der Motorwicklungen vor dem Kältemittel Ammoniak mit einem Spaltrohr ausgerüstet war. Kurz vor Beginn des Forschungsvorhabens wurden Forschungsarbeiten an Ammoniak-Kälteanlagen kleiner Leistung aus Skandinavien bekannt [27,29]. Bis auf eine überflutete Verdampfung wurden dabei Anlagenschaltungen verwendet, wie sie für Systeme mit halogenierten Kältemitteln üblich sind. Zur automatischen Ölrückführung wurden unterschiedliche Vorrichtungen entwickelt und erprobt. Um hermetisch dichte

Systeme erstellen zu können, wurden auch in diesen Fällen halbhermetische Ammoniak-Verdichter verwendet, die mit Spaltröhrenmotoren ausgerüstet waren.

Eine andere Möglichkeit zur Verwendung von NH₃ in halbhermetischen Verdichtern besteht in dem Einsatz ammoniakresistenter Materialien. Mit Motorwicklungen aus Aluminium wurde dies in Ammoniak-Kälteanlagen größerer Leistung bereits erfolgreich praktiziert [2].

5. ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS

Das Ziel dieses Forschungsvorhaben ist es, Möglichkeiten für einen wirtschaftlichen Einsatz des energetisch günstigen Kältemittels Ammoniak in Kälteanlagen kleiner und mittlerer Leistung experimentell zu untersuchen. Um langfristig mit den üblicherweise in diesem Leistungsbereich verwendeten FKW-Kälteanlagen konkurrenzfähig zu sein, sind die wesentlichen Anforderungen für Ammoniak-Kompressionskälteanlagen kleiner Leistung:

1. die Sicherheit, da kleine Anlagen vorwiegend in Bereichen zu finden sind, wo Menschen leben oder arbeiten,
2. ein automatischer, wartungsarmer Anlagenbetrieb, da im Gegensatz zu industriellen Anlagen die Anwender solcher Systeme im allgemeinen keine Techniker sind und
3. die Wirtschaftlichkeit, um auch mit anderen Systemen und Kältemitteln konkurrenzfähig zu sein.

Zur Steigerung der Sicherheit wird in diesem Forschungsvorhaben eine größtmögliche Hermetisierung der Systeme durch die Verwendung eines halbhermetischen Ammoniak-Verdichters und den vermehrten Einsatz nicht lösbarer Verbindungstechniken angestrebt. Zusätzlich soll die notwendige Kältemittelfüllung, die für Kälteanlagen mit NH₃ wegen dessen Stoffeigenschaften gegenüber denen mit halogenierten Kohlenwasserstoffen ohnehin deutlich geringer ist, durch den Einsatz kompakter Apparate, wie beispielsweise Plattenwärmeübertrager, sowie einem Anlagenbetrieb mit trockener Verdampfung weiter reduziert werden.

Für einen automatischen Anlagenbetrieb ist eine selbsttätige Ölrückführung sowie Anlagenregelung eine wesentliche Voraussetzung. Wird ein Öl verwendet, das mit Ammoniak unlöslich ist, sind der Einbau eines Ölabscheiders sowie konstruktive Maßnahmen zur Ölrückführung notwendig. Für einen ammoniaklöslichen Schmierstoff ist dies nicht notwendig. Selbst bei tiefen Temperaturen besitzt der in den Kältemittelkreislauf eingebrachte Schmierstoff bedingt durch darin gelöstes Ammoniak eine ausreichende Fließfähigkeit, um von der Kältemittelströmung mitgerissen und so vom Verdampfer zum Verdichter gefördert zu werden. Für kleine Ammoniak-Kälteanlagen bietet sich daher der Einsatz löslicher Schmierstoffe an, zumal dadurch besonders bei der trockenen Verdampfung im Vergleich zu unlöslichen Ölen ein geringerer Druckverlust sowie eine deutliche Verbesserung des Wärmeübergangs im Verdampfer erzielt werden kann [23,28,31]. Die löslichen Schmierstoffe sind Produkte auf der Basis von Polyalkylenglykolen (PAG), die gegenüber konventionell eingesetzten Kältemaschinenö-

len hygroscopisch sind. Sie besitzen hervorragende Schmiereigenschaften, die sich jedoch mit steigendem Wassergehalt drastisch verschlechtern. Daher ist ein sorgfältiger Umgang bei Verwendung dieser Schmierstoffe erforderlich [5].

Neben Sicherheit und Funktionalität ist letztlich die Wirtschaftlichkeit das maßgebende Marktregulativ. Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit umfaßt dabei sowohl die Kosten zur Erstellung als auch zum Betrieb der Anlagen. Wegen der o.g. energetisch günstigen Eigenschaften des Kältemittels Ammoniak werden NH₃-Kälteanlagen bezüglich ihrer Betriebskosten für viele Anwendungen günstiger eingeschätzt als FCKW- oder FKW-Kälteanlagen [28]. Die Anschaffungskosten für Ammoniak-Kälteanlagen sind aus verschiedenen Gründen wie z.B. den zu beachtenden Sicherheitsauflagen und -einrichtungen zur Zeit deutlich höher.

Ein weiterer Grund für die höheren Kosten ist in der Verwendung von Stahl anstatt des sonst üblichen Kupfers zu sehen. Mit dem Werkstoff Aluminium könnte eine Alternative gefunden werden, die zum einen finanziell interessant ist und zum anderen ähnlich wie die in der Kältetechnik üblichen Kupfermaterialien verarbeitet werden kann [20]. Aluminium eignet sich sowohl für Rohrleitungen, als auch für Fittings, Ventile und Behälter. Unter Verwendung eines Anlagenaufbaus, der dem der halogenierten Kohlenwasserstoffe ähnlich ist, mit Komponenten aus Aluminium, die für das Kältemittel Ammoniak dazu noch in kleinerer Baugröße ausgeführt werden können, wäre eine Reduzierung der Anlagenkosten durchaus denkbar.

6. DURCHFÜHRUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS

6.1 Teilnehmer des Forschungsprojektes

Für die Zusammenarbeit in diesem Forschungsvorhaben konnten insgesamt sechs Firmen gewonnen werden, die das Vorhaben sowohl aktiv - z.B. durch Laborarbeiten, Bereitstellung von Grundstoffen etc. - als auch beratend unterstützten. Dazu wurde ein projektbegleitender Ausschuß gebildet, dem folgende Mitglieder angehörten:

aus dem Fachgebiet der Grund- und Schmierstoffe

Herr Dr. W. Baumgärtner
Hoechst AG
Werk Glendorf
8269 Burgkirchen,

Herr Dipl.-Ing. W. Bock
Fuchs Mineralölwerke GmbH
Friesenheimer Str. 15
6800 Mannheim 1,

Herr Dipl.-Ing. R. Henrici
Hoechst AG
F & E Chemikalien, D729
65926 Frankfurt,

aus dem Bereich der Verdichterherstellung

Herr Dr. H. Kaiser
Bock Kältemaschinenfabrik GmbH
Benzstr. 7
72632 Frickenhausen,

aus der Aluminiumherstellung und -verarbeitung

Herr Dipl.-Ing. B. Vestergaard
Hydro Aluminium Automotive
Heat Transfer Tonder a.s.
Postbox 50, Hydrovej 6
DK-6270 Tonder

aus dem Fachgebiet der Lote und Flußmittel

Frau Dipl.-Chem. D. Steiner, Herr L. Gieseke
Metallochemische Fabrik
Dr. Rostowsky KG
Niedersachsenstr. 23
30853 Langenhagen,

als Kälteanlagenbauer

Herr E.U. Schmidt
Kees Klima- und Kältetechnik
Klusmann-Str. 4
3000 Hannover 91

und vom Projektträger

Herr Dr. J. Lefèvre
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2
49090 Osnabrück.

Insgesamt fanden drei Treffen, zu Anfang, in der Mitte und zu Ende der Projektlaufzeit, des projektbegleitenden Ausschusses im IKW in Hannover statt, in deren Rahmen die durchgeführten Arbeiten und das weitere Vorgehen intensiv diskutiert wurde.

Neben den Mitgliedern des Projektausschusses wurde das Forschungsvorhaben auch von weiteren Unternehmen sowohl durch die Bereitstellung von Sachmitteln als auch Know-how oder Dienstleistungen großzügig unterstützt. Ganz besonderer Dank gilt der Altenburger Armaturenwerk und Metallgießerei GmbH in Altenburg, der Degussa AG in Hanau, der Fabrik Automatischer Schaltapparate F.A.S. Hans Jörgensen GmbH in Hamburg, der GEA Ecoflex GmbH in Sarstedt, der Herl Armaturenfabrik GmbH & Co. KG in Köln, der Kenmore GMBH in Bergisch-Gladbach, der Erich Schultze KG in Berlin, der SWEP Wärmetauscher AG in Hildesheim und der Tyforop Chemie GmbH in Hamburg.

6.2 Verlauf des Forschungsvorhabens

Begonnen wurde das Forschungsvorhaben am 01. Oktober 1994. Die Projektlaufzeit betrug 18 Monate. Im Antrag zu diesem Forschungsvorhaben vorgesehen waren der Aufgabenpunkt a, die Erstellung und Erprobung eines halbhermetischen Verdichters für das Kältemittel Ammoniak, die von dem mittelständischen Verdichterhersteller Bock Kältemaschinen GmbH durchgeführt wurde, und der Aufgabenpunkt b, die Untersuchungen an einer Ammoniak-Versuchskälteanlage kleiner Leistung. Bereits auf der ersten Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses im Oktober 1994 wurde der Arbeitsplan, der im Bild 1 dargestellt ist, um den Punkt c, den Aufbau eines Ammoniak-Kalorimeters erweitert, da zur Leistungsmessung von NH₃-Verdichtern im betrachteten Leistungsbereich in Deutschland keine Versuchseinrichtung vorhanden ist, die mit einem Sekundärflüssigkeitskalorimeter als Verdampfer ausgestattet ist.

Parallel zu der Entwicklung des halbhermetischen NH₃-Verdichters wurden die Arbeiten am IKW mit der Auswahl möglicher Verbindungstechniken begonnen, die sowohl in der Versuchskälteanlage als auch dem Ammoniak-Kalorimeter verwendet wurden. Im Anschluß an den Aufbau wurden an der Versuchskälteanlage Untersuchungen zur trockenen Verdampfung in Plattenwärmeübertragern durchgeführt. Dazu wurde ein handelsüblicher, offener Verdichter verwendet.

Zur Bewertung des Betriebsverhaltens und der Stabilität des Arbeitsstoffpaares Schmierstoff/Ammoniak sowie des hier untersuchten Werkstoffes Aluminium wurden während der Versuche in regelmäßigen Zeitabständen Proben entnommen, die in den Labors der beteiligten Firmen auf Zersetzungsprodukte und sonstige Veränderungen untersucht wurden.

Zur Verdichterleistungsmessung nach DIN 8977 (ISO 917) [7] wurde ein Ammoniak-Kalorimeter mit einem Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter als Verdampfer aufgebaut. Die dazu notwendigen Mittel konnten nur zu einem Teil aus den verfügbaren Budget dieses Forschungsvorhabens entnommen werden. Dank Minimierung der Kosten, beispielweise durch den Eigenbau eines Großteils der Meßtechnik, durch die Bereitstellung zusätzlicher Gelder seitens der Universität Hannover sowie des IKW und nicht zuletzt durch die kostenlose Bereitstellung vieler Anlagenkomponenten auch von nicht in dieses Projekt involvierter Firmen war die Erstellung des Kalorimeters, wenn auch mit einer deutlichen Verzögerung, letztlich dennoch möglich. Durch Verzögerungen bei der Lieferung bzw. der Fertigung diverser Komponenten

und durch unvorhergesehene Schwierigkeiten, wie zum Beispiel dem Ausfall der Dichtungen in den Plattenwärmeübertragern oder das Auftreten von Verunreinigungen und Ablagerungen im Kältemittelkreislauf während des Probetriebs, konnte die vollständige Fertigstellung des Ammoniak-Kalorimeters erst kurz vor dem Abschluß des Forschungsvorhabens erreicht werden.

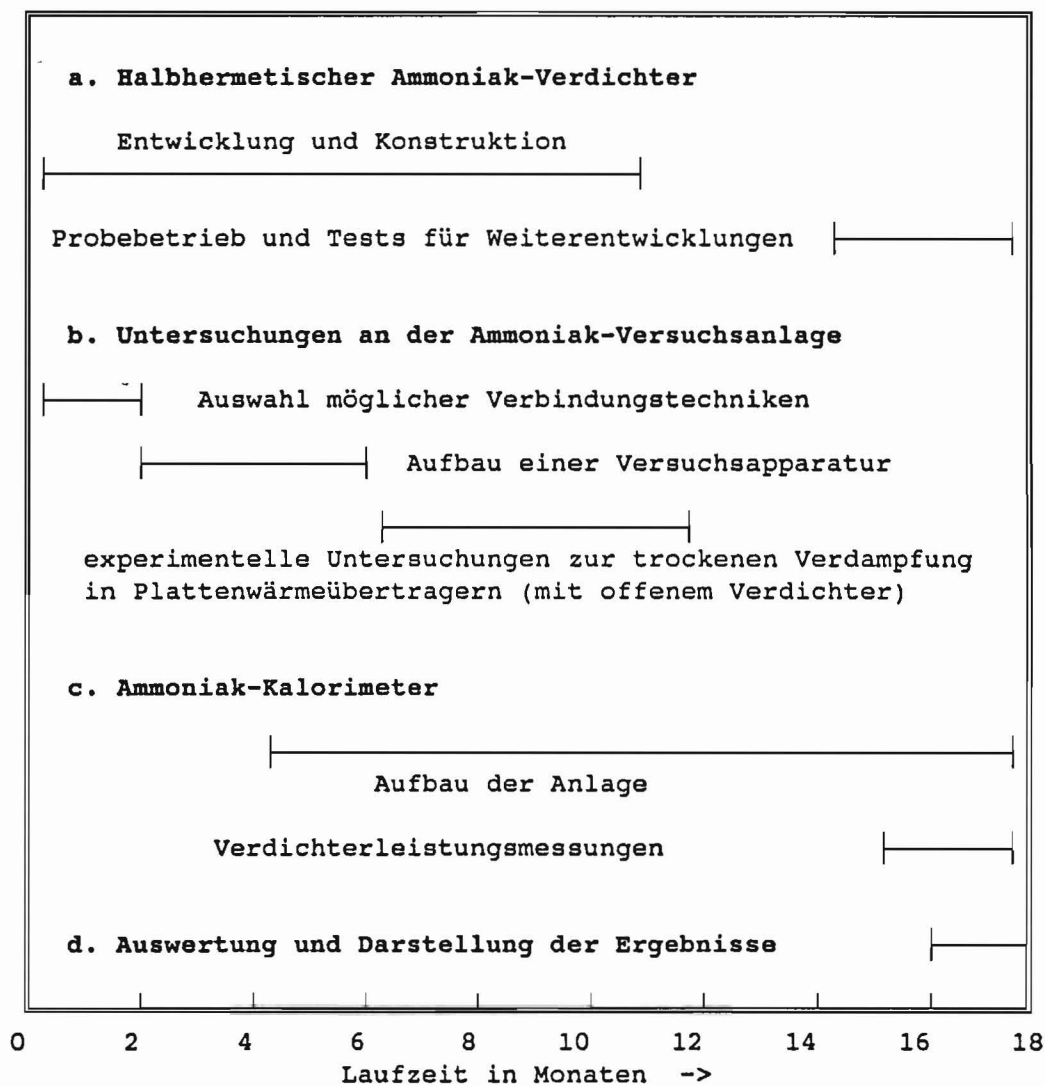


Bild 1: Arbeitsplan

Mit den ersten Versuchen an dem noch nicht vollständigen Ammoniak-Kalorimeter konnte etwa drei Monate vor dem Projektende begonnen werden. Die noch verbliebene Zeit wurde zur experimentellen Untersuchung der Verdichterleistung, die nicht immer unter Einhaltung aller in DIN 8977 geforderten Bedingungen durchgeführt werden konnten, und zum Öltransport in der Kälteanlage genutzt.

Zum Abschluß des Forschungsvorhabens wurden die erzielten Erfahrungen und Ergebnisse im hier vorliegenden Abschlußbericht zusammengefaßt.

7. ERGEBNISSE DES FORSCHUNGSVORHABENS

7.1 Aufbau der Ammoniak-Versuchskälteanlage

Für die Versuchskälteanlage, die für eine Kälteleistung von 10 kW bei einer Verdampfungstemperatur von -10°C und einer Verflüssigungstemperatur von 40°C ausgelegt war, wurde zu Beginn des Forschungsvorhabens ein offener Zweizylinder-Hubkolbenverdichter AM3/233-4-NH₃ der Firma Bock Kältemaschinen gewählt, der als Motorverdichter ausgeführt ist und ein geometrisches Hubvolumen von $19,84\text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Drehzahl von 1450 min^{-1} besitzt. Mit Hilfe eines Frequenzumrichters konnte die Drehzahl des Verdichters stufenlos variiert werden.

Der luftgekühlte Verflüssiger der dänischen Firma tt coil mit der Typenbezeichnung CD-TR-2-600-600-11R-2-S-Al/Al, der mit einem drehzahlregulierten Ventilator ausgestattet wurde, ist komplett aus Aluminium gefertigt, wodurch er trotz seiner relativ großen Abmessungen von $600\text{ mm} * 600\text{ mm}$ nur ein geringes Gewicht besitzt. Die Rohre des Wärmetauschers haben einen Außendurchmesser von 16 mm und eine Wandstärke von 1 mm. Das Innenvolumen beträgt 12 dm^3 .

Die Anlage wurde mit einem bereits vorhandenen Kältemittelsammler aus Stahl ausgestattet, der in Eigenbau mit einem Innenvolumen von etwa 8 dm^3 erstellt wurde und wahlweise im Bypass betrieben werden konnte.

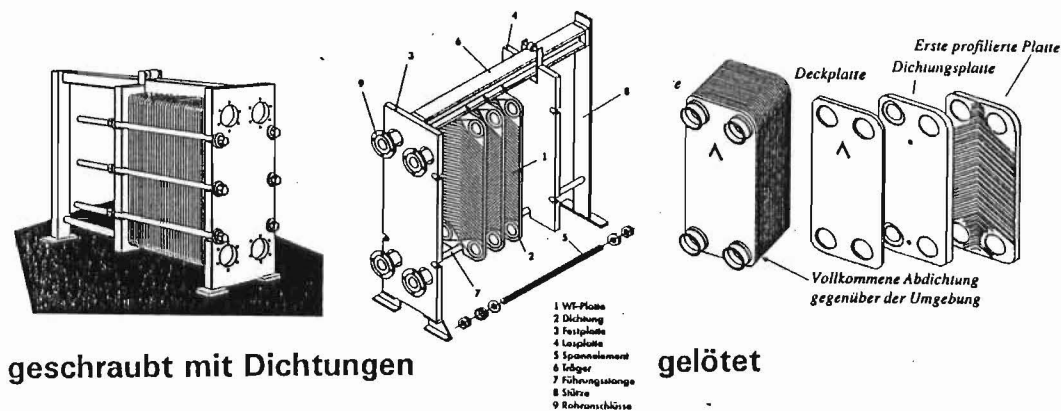


Bild 2: Schematische Darstellung von Plattenwärmeübertragern in geschraubter und gelöteter Ausführung

Als Verdampfer diente ein Plattenwärmeübertrager der Baureihe B25 der Firma SWEP in gelöteter Ausführung. Dabei handelt es sich um einen Prototyp, dessen Platten aus Stahl gefertigt und durch ein spezielles Silberlot dicht miteinander verbunden sind. Für den Wärmeaustausch stehen acht profilierte Platten zur Verfügung, die durch Deckplatten an den Enden gestützt werden. Der maximal zulässige Betriebsdruck beträgt 16 bar. Der Plattenwärmeübertrager wird im Gegenstrom betrieben, wobei drei Kanäle vom Ammoniak und vier Kanäle vom Kälteflüssiger durchströmt werden. Gegenüber gedichteten Plattenwärmeübertragern sind die gelöteten Ausführungen deutlich kompakter und besitzen aufgrund der nicht notwendigen

Haltevorrichtungen ein deutlich geringeres Gewicht. Durch den Einsatz der Löttechnik können zum einen Dichtungsprobleme umgangen und zum anderen das Risiko einer Leckage minimiert werden.

Zur Verdampferregelung wurde zunächst ein thermostatisches Expansionsventil der Firma ALCO vom Typ TG3 AZ verwendet. Zur Beheizung des Plattenwärmetauschers diente ein separater Kälte-trägerkreislauf, der für tiefe Temperaturen mit Tieftemperaturkälte-träger Tyfoxit der Firma Tyforop betrieben wurde. Aufgrund des offen ausgeführten Kälte-trägerkreislaufs wurde wegen des hohen pH-Wertes und der damit verbundenen, unangenehmen Handhabung dieses Kälte-trägers, für dessen Umgang eine Schutzbrille und Handschuhe empfohlen werden, dieser für Verdampfungstemperaturen oberhalb von -15°C gegen ein Glykol/Wasser-Gemisch ausgetauscht.

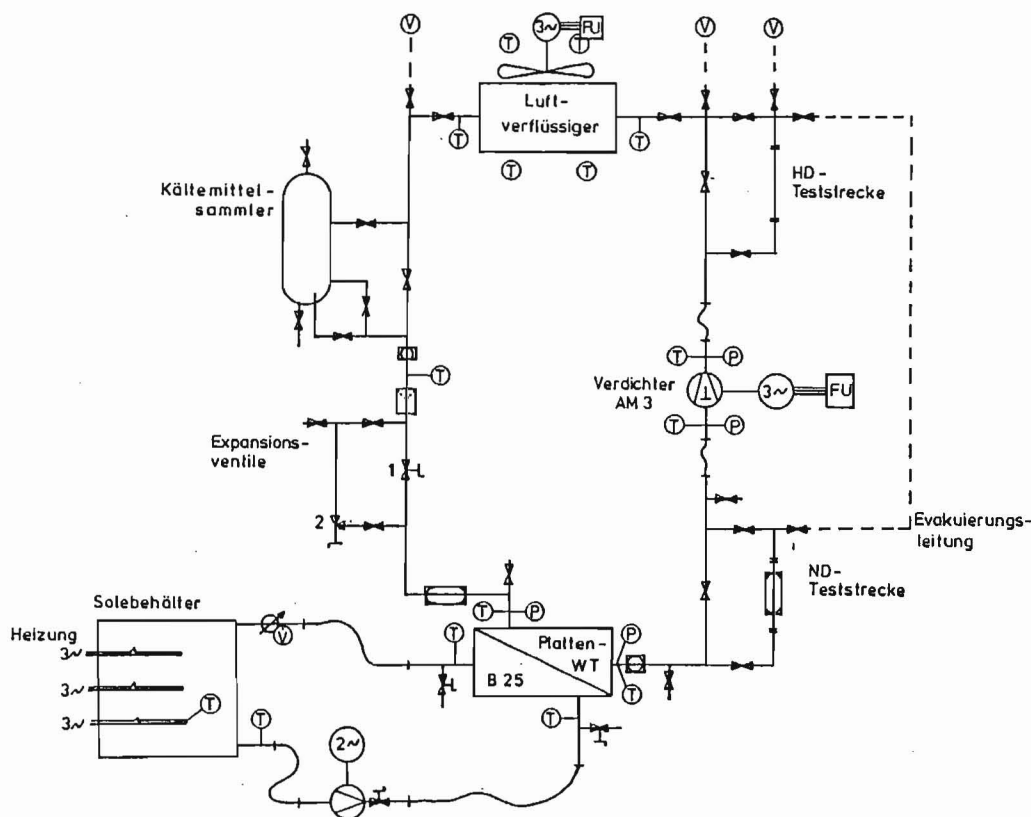


Bild 3: Anlagenschema der Ammoniak-Versuchskälteanlage

Der schematische Aufbau der Versuchskälteanlage ist im Bild 3 dargestellt. Sowohl auf der Saugseite als auch auf der Heißgasseite des Verdichters sind im Bypass sogenannte Teststrecken vorgesehen, die zur Aufnahme von Rohrleitungen mit neuen Verbindungselementen vorgesehen waren. Sowohl am Eingang als auch am Ausgang des Plattenwärmetauschers wurden einsehbare Rohrstrecken von 150 mm Länge angebracht, um so zusätzliche Informationen zur trockenen Verdampfung und zum Öltransport in der Kälteanlage zu gewinnen.

Die Rohrleitungen wurden soweit wie möglich in Aluminium ausgeführt. Die Abmessungen der Rohrleitungen betragen in der Eisgasleitung 12 * 1 mm, in der Flüssigkeitsleitung 6 * 1 mm, in der Einspritzleitung 10 * 1 mm und in der Saugleitung zum Verdichter 22 * 1,5 mm.

Die Füllmenge der Kälteanlage betrug etwa 3,5 kg Ammoniak. Gegen Ende der Projektlaufzeit wurde die Kälteanlage um einen gedichteten Plattenwärmeübertrager vom Typ G12 der Firma SWEP erweitert, der als wassergekühlter Verflüssiger eingesetzt wurde. Dabei handelt es sich um einen geschraubten Plattenwärmeübertrager mit insgesamt 12 Platten, wie er schematisch im Bild 2 dargestellt ist. Zur Verwendung als Verflüssiger wurde der Plattenwärmeübertrager um vier zusätzliche Verschraubungen in den Halteplatten verstärkt, um den maximal zulässigen Druck, der ursprünglich 16 bar betrug, zu erhöhen. Der so modifizierte Plattenwärmeübertrager wurde anschließend mit einem Prüfdruck von 30 bar beaufschlagt, um dessen Druckfestigkeit und Dichtigkeit zu überprüfen. Durch den Einbau des Plattenwärmeübertragers konnte die notwendige Füllmenge von ursprünglich 3,5 kg auf etwa 1,5 kg Ammoniak reduziert werden.

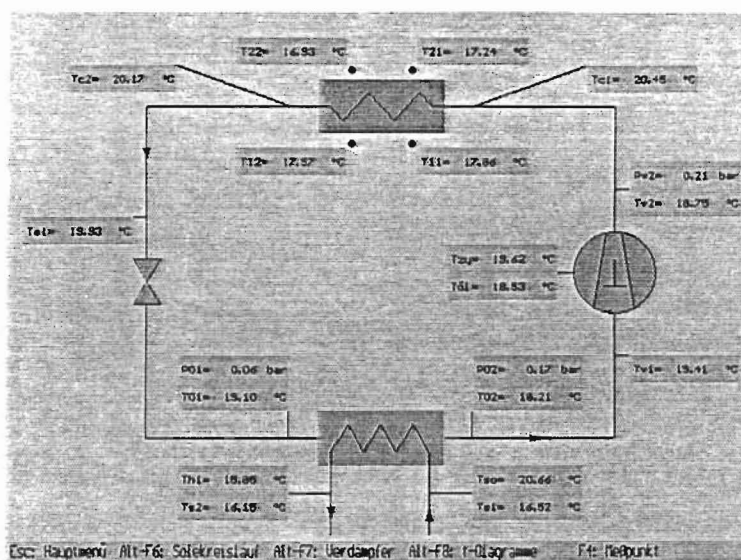


Bild 4: Darstellung der Meßwerte mit dem Meßwernerfassungsprogramm

Zur Bewertung des Anlagenverhaltens wurde der Kältemittelkreislauf mit Druck- und Temperaturmeßtechnik versehen, wie es im Bild 3 dargestellt ist. Die Temperaturmessung erfolgte mit Ni/CrNi-Thermoelementen, die vor den Messungen mit Hilfe von geeichten Thermometern, deren Ablesegenauigkeit 0,02 K betrug, im Temperaturbereich zwischen -50 und +100°C auf eine Meßgenauigkeit von 0,1 K kalibriert wurden. Zur Auswertung von höheren Temperaturen wurde die Normalspannungsreihe nach DIN 43710 [8] zugrundegelegt. Zur Druckmessung wurden Dünnfilmdruckaufnehmer der Genauigkeitsklasse 0.1 verwendet, die vor den Messungen ebenfalls mit Hilfe einer Druckwaage auf 0,1 bar Genauigkeit kalibriert wurden. Die Meßwernerfassung erfolgte über eine Data Acquisition als Schnittstelle mit einem PC. Dazu wurde ein Meßwernerfassungs- und -auswertungsprogramm erstellt, welches eine übersichtliche Darstellung der momentanen Meßwerte erlaubt, wie es im Bild 4 dargestellt ist.

Zusätzlich bietet dieses Programm die Möglichkeit, die zeitlichen Verläufe der Signale jeder einzelnen Meßstelle wiederzugeben, womit eine Möglichkeit zur Kontrolle des Anlagenverhaltens über einen längeren Zeitraum ermöglicht wird.

Aus Stabilitätsgründen wurden Ventile und sonstige Armaturen in Baugruppen zusammengefaßt, die mit Hilfe von Stahlleitungen verbunden wurden. An diese Baugruppen wurde auch die Meßtechnik plaziert, die mit Hilfe speziell gefertigter Adapter aus Edelstahl angebracht wurde. Die Verbindung der Adapter mit den Rohrleitungen geschah durch Löten. Dazu wurde ein hochsilberhaltiges Speziallot der Bezeichnung 7291 und das Flußmittel h-spezial der Firma Degussa verwendet. In vorangegangenen Untersuchungen zeigte sich dieses Lot als resistent gegenüber Ammoniak. Da es in Gegenwart von Luft und Feuchtigkeit zur Oxidation neigt, wurde die Oberfläche der Lötstelle durch einen Anstrich mit Klarlack geschützt.

7.2 Werkstoff Aluminium und gewählte Verbindungstechniken

7.2.1 Aluminium

Bereits in den 30er Jahren wurden Aluminiumrohre in Wärmeaustauschern von Ammoniak-Kälteanlagen eingesetzt [24]. Bislang zugelassen sind 99,5%ig reines Aluminium sowie die Legierungen AlMgSi1 und AlMn1 [13,35]. Hier wurde die Legierung AlMn1 verwendet, die sich aus 95 - 95,5 % Aluminium, 1 - 1,5 % Mangan, 0,7 % Eisen, 0,5 % Silicium, 0,2 % Zink, 0,1 % Kupfer, 0,1 % Chrom und 0,1 % Titan zusammensetzt [18]. Gegenüber reinem Aluminium gewinnt diese Legierung durch den Zusatz von Mangan an Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, wobei die Formbarkeit und Schweißbarkeit vergleichbar bleiben. Diese nicht aushärtbaren Legierung ist ähnlich wie Kupfer formbar, magnetisch neutral und gegen trockenes Ammoniak sowie reines Wasser beständig [20]. Im Gemisch mit Ammoniak sind sogar bis zu 10 % Wasser zulässig [15]. Ungeklärt ist bislang der Einfluß von ammoniaklöslichem PAG-Schmierstoff im Gemisch mit Ammoniak und Wasser auf das Verhalten von Aluminium. Bekannt ist, daß PAG in Verbindung mit Wasser auf einige Aluminiumlegierungen stark korrosiv wirkt.

Tabelle 5: Vergleich der physikalischen Daten von Aluminium, Kupfer und Eisen

Eigenschaft	Einheit	AlMn1	Cu	Fe
Dichte	[g/cm ³]	2,73	8,96	7,87
spez. Wärmekapazität	[kJ/kg · K]	0,89	0,39	0,47
Wärmeleitfähigkeit	[W/m · K]	160-200	384	81
Wärmeausdehnungskoeff.	[10 ⁻⁶ /K]	23,5	17	12
Schmelztemperatur	[°C]	645-655	1083	1536
Preis pro kg ¹	[%]	100	120	35

¹ Durchschnittlicher Preis laut Auskunft verschiedener Großhändler

In der Tabelle 5 sind die physikalischen Daten von Aluminium (AlMn1) im Vergleich zu Kupfer (Cu) und Eisen (Fe) dargestellt. Gegenüber diesen Stoffen besitzt Aluminium eine deutlich geringere Dichte, eine niedrigere Schmelztemperatur, eine höhere spezifische Wärmekapazität sowie einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ist höher als die der Eisenwerkstoffe, jedoch deutlich niedriger als die von Kupfer. Neben den technischen Daten ist ferner die Tatsache interessant, daß Aluminiumrohre im Vergleich zu Kupferrohren etwa 50 % preiswerter sind [20].

7.2.2 Nicht lösbare Verbindungstechniken

Das Verbinden von Aluminiumrohren ist sowohl durch Schweißen, Löten als auch durch sogenannte Preßfittings möglich, die bereits im Handel angeboten werden. Die linke der beiden im Bild 5 dargestellten Varianten ist bereits in Aluminium erhältlich und wird in Kühlschränken oder PKW-Klimaanlagen bereits verwendet. Die Dichtheit wird in der linken Variante der Klemmringverbindungen durch eine Dicht- bzw. Klebmasse, in der unteren durch Formschluß gegenüber einer Stützhülse gewährleistet. Da über beide Verbindungstechniken mit dem Kältemittel Ammoniak zu Projektbeginn noch keine Erfahrungen vorlagen, wurde die nicht lösbare Verbindungstechnik im hier beschriebenen Forschungsvorhaben zunächst auf das Löten beschränkt, das in der Kältetechnik übliche Verbindungsverfahren.

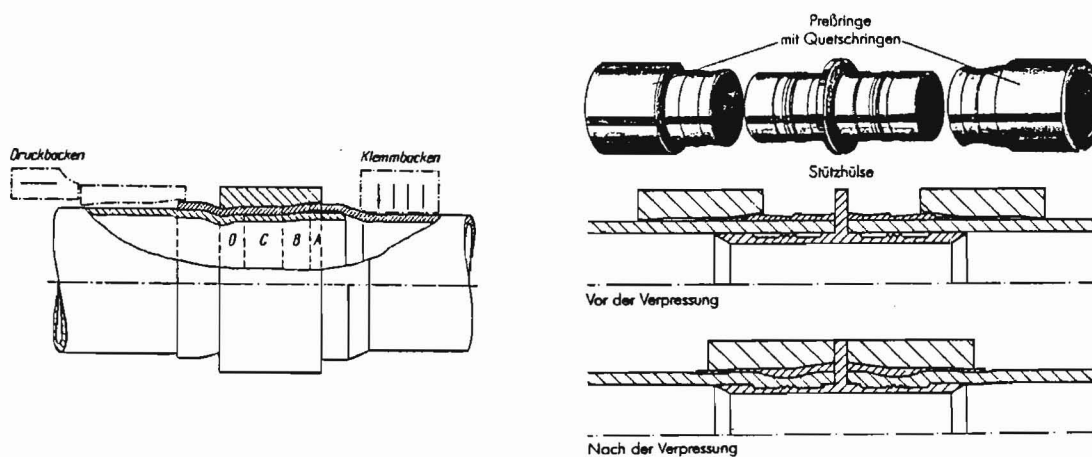


Bild 5: Klemmringverbindungen

Dazu wurde ein Lot der Legierung AlSi12 (88 % Aluminium, 12 % Silizium) verwendet, dessen Schmelzbereich zwischen 575°C und 590°C liegt. Die Differenz zwischen der Arbeitstemperatur des Lotes von 590°C und dem unteren Schmelzpunkt des Grundstoffs AlMn1 beträgt nur etwa 50 K, was ein sorgfältiges Arbeiten mit der Gasflamme erfordert. Erschwerend kommt die Tatsache hinzu, daß Aluminium auch bei steigenden Temperaturen keine Farbänderung aufweist und ohne vorherige Glüherscheinungen zu schmelzen beginnt. Als Indikator für das Erreichen des Arbeitspunktes dient das Flußmittel mit der Bezeichnung LH1 (Platra 251), das bei dieser Temperatur seine Konsistenz ändert. Es handelt sich dabei um ein hygroskopisches Flußmittel, dessen Reste nach dem Löten sorgfältig entfernt werden sollten.

Die Reinigung der Lötstelle kann beispielsweise mit Wasser vorgenommen werden. An Lötstellen, an denen eine anschließende Reinigung nicht möglich war, wurde daher die Flußmittelmenge möglichst sparsam dosiert, um so die in den Kältekreislauf eingebrachte Flußmittelmenge möglichst gering zu halten.

In Gegenwart von Wasser können diese Flußmittelreste hoch korrosiv wirken. Sowohl im Kältemittel Ammoniak als auch im löslichen PAG-Schmierstoff ist in geringen Mengen Wasser enthalten, wodurch die korrosive Wirkung der Flußmittelreste ausgelöst werden kann. Durch die Möglichkeit der Korrosion an der Lötstelle besteht die Gefahr, daß hygroskopisches Flußmittel von der Strömung abgetragen wird und sich an anderen Stellen der Kälteanlage niederschlägt und dort ebenfalls zur Korrosion führt. Abhilfe könnte ein nicht hygroskopisches Flußmittel schaffen, das sich z. Z. in der Entwicklung befindet.

Erste Proben dieses Flußmittels standen gegen Ende des Projektes zur Verfügung. Gegenüber den hygroskopischen Flußmitteln war der Lötprozeß mit Hilfe des nicht hygroskopischen Flußmittels deutlich schwieriger, da die Standzeit, in der das Flußmittel aktiv ist, deutlich kürzer ist. Auch ein Nacharbeiten unsauberer Lötstellen oder ein nochmaliges Erwärmen schwer zugänglicher Lötstellen ist nur bedingt möglich, da sich das bereits einmal erhitzte Flußmittel nicht immer ein zweites Mal aktivieren läßt.

In den erstellten Versuchskälteanlagen wurde daher ausschließlich das hygroskopische Flußmittel LH1 sowie das Lot AlSi12 verwendet. Die Lötverbindungen wurden dabei sowohl für die Werkstoffpaarungen Aluminium/Aluminium als auch Aluminium/Stahl ausgeführt. Die Aluminium/Stahl-Verbindungen waren notwendig, um Aluminiumrohrleitungen mit Ventilen oder anderen Fittings zu verbinden, die zur Zeit nur in Stahl verfügbar sind. Gegenüber einer reinen Aluminiumverbindung ist das Löten einer solchen Verbindung auch wegen der unterschiedlichen Wärmeabfuhr beider Materialien deutlich aufwendiger und schwieriger.

7.2.3 Lösbare Verbindungstechniken

Zur Montage und Demontage der Komponenten wurden in der Versuchskälteanlage neben den unlösbaren Lötverbindungen auch lösbare Verbindungen eingesetzt. Von den im Bild 6 dargestellten Verbindungstechniken bieten sich prinzipiell besonders die Bördel- und die Schneidringverschraubungen für einen Übergang von Aluminium- auf Stahlrohrleitungen an. Sowohl die Börderverschraubung, eine in Kälteanlagen mit Kupferleitungen übliche Art der Verbindung, als auch die Schneidringverschraubung, die vorwiegend in hydraulischen und pneumatischen Systemen Verwendung findet, sind formschlüssige Verbindungen, die sich nicht beliebig häufig lösen und schließen lassen. Gerade die Schneidringverbindungen, in denen die Aluminiumrohre mit Stützhülsen versehen sind, können im eigentlichen Sinne nicht als lösbare Verbindungen angesehen werden, da diese häufig bereits nach zwei- bis dreimaligem Lösen Undichtigkeiten aufwiesen. Die Börderverschraubungen hingegen behielten auch nach mehrmaligem Lösen ihre Dichtigkeit, wobei jedoch die geringere Elastizität von Aluminium im Vergleich zu Kupfer zu beachten ist.

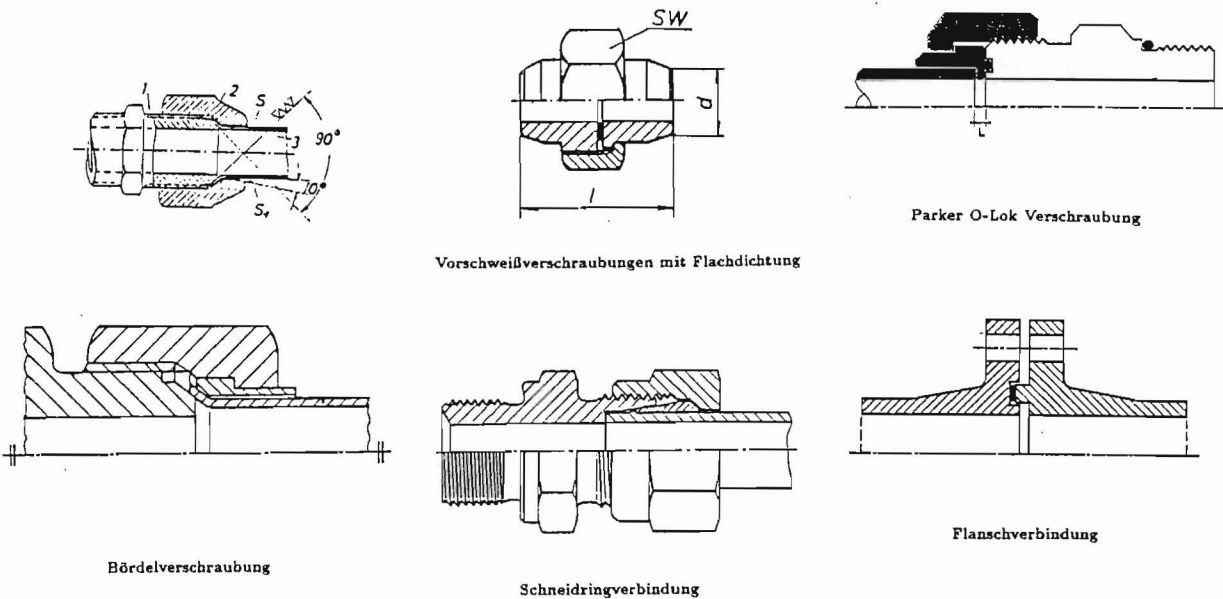


Bild 6: Lösbare Verbindungen

Als weitere lösbare Verbindungen wurden Vorschweißverschraubungen mit Flachdichtungen, Flanschverbindungen sowie Verschraubungen mit der Bezeichnung O-Lok der Firma Parker verwendet, die allesamt nur in Stahlausführungen erhältlich sind. Die O-Lok-Verschraubung wird für pneumatische bzw. hydraulische Zwecke verwendet und gilt dort als besonders sicher gegen Schwingungen. Das Dichtprinzip ist ähnlich wie bei der Vorschweißverschraubung, indem eine Muffe mit Hilfe einer Überwurfmutter stirnseitig gegen eine Dichtfläche verspannt wird. Die Abdichtung erfolgt mit Hilfe eines O-Rings. Gegenüber einer Flachdichtung besitzt die Verwendung eines O-Ringes den Vorteil, daß die über die Verschraubung zur Abdichtung aufzubringenden Kräfte deutlich geringer sind. Eingesetzt wurde die O-Lok-Verschraubung in der erstellten Kälteanlage zur Verbindung von Aluminiumrohren mit Stahlbauteilen. Dazu wurde zunächst das Aluminiumrohr in die Muffe der Verschraubung eingelötet. Diese Art der Verbindung erwies sich im Laufe des Projektes als sehr zuverlässig und praktisch in der Handhabung. Die Handhabbarkeit dieser Verbindung ließe sich dadurch noch verbessern, wenn die Muffe, die mit dem Aluminiumrohr zu verlöten ist, nicht aus Stahl, sondern ebenfalls aus Aluminium bestehen würde.

Flanschverbindungen gelten seit jeher als sehr zuverlässig und robust. Ein wesentlicher Nachteil bei der Verbindung von Aluminiumrohren ist das hohe Gewicht der Flansche, die gewöhnlich aus Stahl gefertigt sind. Am luftgekühlten Aluminiumverflüssiger wurden daher Flanschverbindungen getestet, die aus Aluminium hergestellt wurden. Anstelle der sonst üblichen Technik mit einer Flachdichtung, Nut und Feder wurde ähnlich wie bei der O-Lok-Verschraubung die Dichtigkeit mit Hilfe eines O-Ringes erzielt. Auch nach mehrmaligem Lösen erwies sich diese Art der Verbindung als sehr zuverlässig. Auch die Vorschweißverschraubungen wurden in einigen Anlagenteilen derart verändert, daß anstelle der ursprünglichen Pappdichtung ein O-Ring, für den die Stirnseite mit einer Nut versehen wurde, zur Abdichtung vorgesehen wurde. Dadurch konnte das notwendige Anzugsmoment deutlich verringert werden, das gerade für Aluminiumrohrleitungen als kritisch anzusehen ist.

7.2.4 Ergebnis der metallurgischen Untersuchungen

Metallurgische Untersuchungen von Aluminiumrohren und Lötverbindungen, die der Versuchskälteanlage während und zu Ende der Projektlaufzeit entnommen wurden, belegten einen insgesamt guten Zustand des verwendeten Materials, wobei jedoch an einigen Stellen eine geringfügige Korrosion diagnostiziert wurde. Diese Korrosion wurde vorwiegend an den Stellen ermittelt, an denen Aluminium/Stahl-Verbindungen eingesetzt wurden. In diesen Bereichen wurden neben der Aluminium-Korrosion vermehrt Rostpartikel der eingesetzten Stahlelemente beobachtet.

Zur Bewertung dieser Ergebnisse ist die kurze Lebensdauer von weniger als 1 1/2 Jahren sowie die geringe Anzahl von Betriebsstunden der Versuchskälteanlage zu berücksichtigen. Die innerhalb dieser kurzen Zeit vermehrt auftretenden Korrosionserscheinungen an den gelöteten Aluminium/Stahl-Verbindungen sowie die erschwerte Handhabbarkeit geben Anlaß, diese Art der Verbindungstechnik möglichst zu vermeiden. Mit Hilfe von Armaturen und Fittings aus dem Werkstoff Aluminium wäre dies zudem ohne weiteres möglich.

7.3 Reinigung der Kälteanlage

Bereits bei der Inbetriebnahme der Kälteanlage zeigten sich besonders in der Schaustrecke am Eintritt in den Verdampfer dunkelfarbige, pastöse Ablagerungen. Als Ursache wurden herstellungsbedingte Verunreinigungen wie Korrosionsschutz- und Ziehöl in den Rohrleitungen der Kälteanlage identifiziert. Die Entfernung dieser Verunreinigungen konnte mit Hilfe eines sogenannten Spülöles erreicht werden. Dabei handelt es sich ähnlich wie das verwendete Kältemaschinenöl um ein Polyalkylenglykol (PAG) mit der Bezeichnung T01/35 der Firma Hoechst. Im Gegensatz zum verwendeten Kältemaschinenöl Reniso PG68, das als nicht mischbar mit Mineralölen eingestuft wird, ist das Spülöl T01/35 mit mineralischen und vielen synthetischen Schmierstoffen gut mischbar.

Für den Spülvorgang wurde anstelle des Kältemaschinenöls die Kälteanlage mit dem Spülöl und Ammoniak betrieben. Dabei war zu berücksichtigen, daß dieser Schmierstoff eine deutlich geringere Mischbarkeit mit dem Kältemittel Ammoniak besitzt, wie es den Ergebnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens [22], die im Bild 7 dargestellt sind, zu entnehmen ist. Der Schmierstoff mit der Bezeichnung P4, der dem Spülöl T01/35 entspricht, besitzt nur bei Temperaturen oberhalb von 20°C eine Mischbarkeit mit Ammoniak. Das hier eingesetzte Kältemaschinenöl Reniso PG 68 der Firma Fuchs Mineralölwerke, dessen Löslichkeitseigenschaften den Schmierstoffen mit den Bezeichnungen P3 bzw. P6 entsprechen, zeigt auch bei tiefen Temperaturen eine ausreichende, wenn auch nicht vollständige Mischbarkeit mit dem Kältemittel Ammoniak.

Dieses Reinigungsverfahren wurde unter normalen Betriebsbedingungen der Kälteanlage bei 0°C Verdampfungstemperatur und 40°C Verflüssigungstemperatur für eine Dauer von etwa drei Stunden durchgeführt.

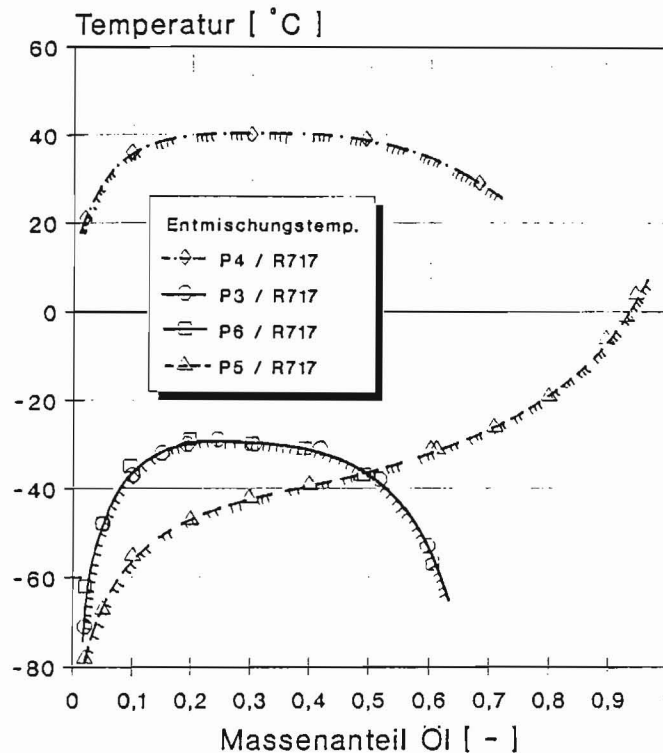


Bild 7: Mischbarkeit von Ammoniak mit Polyalkylenglykolen [22]

Da das Spülöl und das Kältemaschinenöl miteinander gut verträglich und mischbar sind, ist ein in der Anlage verbleibender Rest an Spülöl durchaus tolerierbar und muß nicht durch aufwendige Verfahren entfernt werden. So wurde das Spülöl dem Verdichter nach Beendigung des Reinigungsvorganges entnommen und durch das ursprüngliche Kältemaschinenöl PG 68 ersetzt. Die Reinigungswirkung konnte mit Hilfe der Schaustrecken sowohl optisch als auch durch eine anschließende Analyse des Spülöls, die einen Mineralölgehalt von 3500 ppm ergab, bestätigt werden. Eine gleichzeitige Entfernung von Flußmittelrückständen ist mit diesem Spülöl jedoch nicht möglich. Laboruntersuchungen ergaben nur ein äußerst geringes Lösungsvermögen mit dem verwendeten Flußmittel.

7.4 Untersuchung zur trockenen Verdampfung in Plattenwärmetauschern

Die ersten Versuche zur trockenen Verdampfung im gelöteten Plattenwärmeübertrager wurden mit dem thermostatisch geregelten Expansionsventil durchgeführt. Damit war ein stationärer Anlagenbetrieb nur bei Überhitzungen oberhalb etwa 20 K möglich. Für die weiteren Versuche wurde daraufhin ein eigens angefertigtes, handgeregeltes Expansionsventil verwendet. Ein stationärer Anlagenbetrieb konnte jedoch auch damit nur bei Überhitzungen oberhalb von 15 K realisiert werden. Ähnlich wie mit dem thermostatischen Expansionsventil wurde während der gesamten Versuchsdauer eine unregelmäßige Ölrückführung vom Verdampfer zum Verdichter beobachtet. Zeitweise blieb der Ölrückfluß sogar völlig aus, was ein

Absinken des Ölstandes im Kurbelgehäuse unterhalb der Schauglashöhe zur Folge haben konnte. In unregelmäßigen Zeitabständen verließ ein regelrechter Flüssigkeitsschwall den Verdampfer, der dann im Kurbelgehäuse des Verdichters zum Aufschäumen des Öles führte, was auf einen nicht unerheblichen Anteil im Öl gelösten Kältemittels hindeutet. Die un stetige Ölversorgung und vor allem die aus der großen Überhitzung resultierenden, extrem hohen Druckgastemperaturen am Verdichteraustritt führten zum Ausfall des Verdichters, so daß die Versuche abgebrochen wurden.

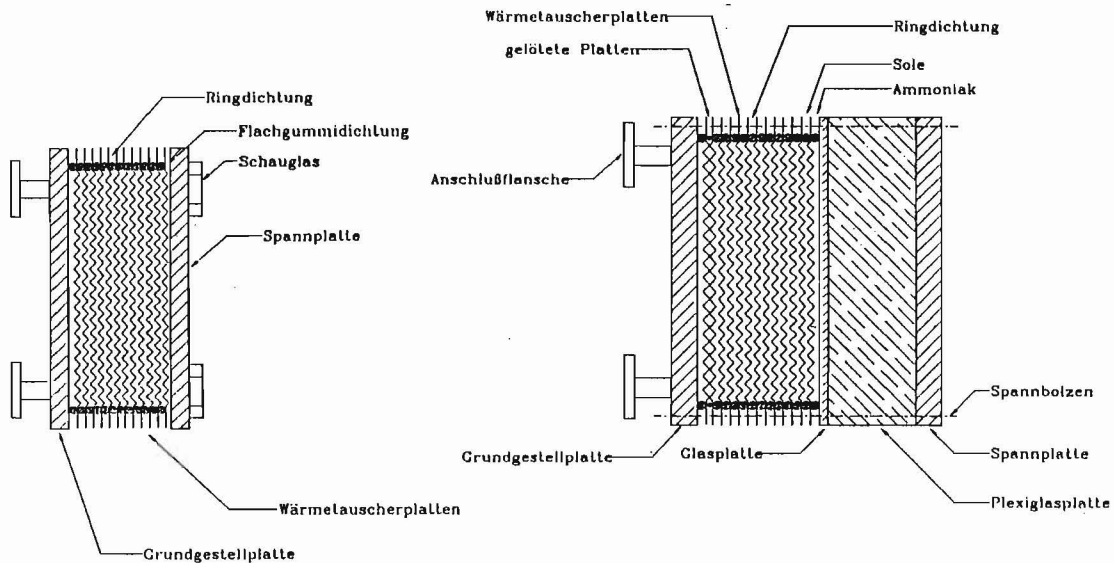


Bild 8: Umbau des Plattenwärmeübertragers

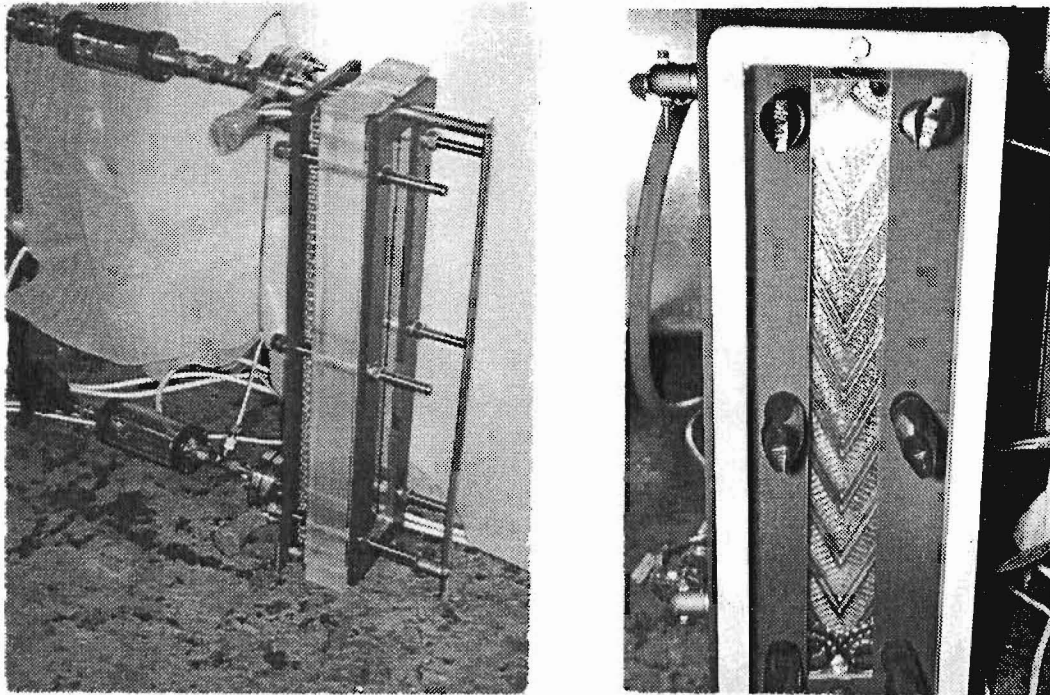


Bild 9: Einsehbarer Plattenwärmeübertrager

Zur Untersuchung des Ölumlaufs wurde anschließend ein gedichteter Plattenwärmeaustauscher in geschraubter Ausführung derart konstruktiv verändert, daß der letzte von Ammoniak durchströmte Kanal vollständig von außen einsehbar war. Für 10 kW Kälteleistung ausgelegt, war dieser Plattenwärmeübertrager, der durch eine ausgesprochen lange und schmale Bauweise gekennzeichnet ist, mit 14 Platten ausgestattet, wobei 7 Kanäle vom Kälteträger und 6 vom Ammoniak durchströmten wurden. Wie im Bild 8 dargestellt, mußte zunächst die Plattenanordnung durch ein beidseitig dichtendes Element, das durch Verlöten zweier Platten erstellt wurde, modifiziert werden, um mit der letzten Platte des Wärmeübertragers eine Möglichkeit zur Abdichtung gegenüber der Glasscheibe zu schaffen. Da im Rahmen vorheriger Untersuchungen kein durchsichtiger Kunststoff ermittelt werden konnte, der gegenüber Ammoniak ausreichend resistent ist, sieht die hier ausgeführte Lösung eine Glasscheibe von 4 mm Dicke als Schutzschild gegen das Ammoniak vor. Die auf das Glas wirkenden Druckkräfte werden von einer 60 mm starken Plexiglasplatte aufgefangen. In die eigentliche Spannplatte konnte so auf einer Länge von 675 mm und einer Breite von 80 mm ein Sichtfenster eingelassen werden, wodurch die gesamte Fläche des letzten von Ammoniak durchströmten Kanals von außen einsehbar wird. In der Seitenansicht des Plattenwärmeübertragers im Bild 9 sind auch die einsehbaren Schaustrecken am Verdampfein- und -austritt zu erkennen.

Im Rahmen erster Untersuchungen konnte die Druckbeständigkeit und die Dichtigkeit des modifizierten Plattenwärmeübertragers bestätigt werden. Bereits beim Anfahren der Kälteanlage zeigte sich, daß der letzte Strömungskanal des Verdampfers, der durch das Sichtfenster beobachtet wurde, nicht von Ammoniak durchströmte war. Durch die Verspannung des Plattenpaketes wurde die Glasplatte scheinbar dicht auf die Profilstruktur der letzten Wärmetauscherplatte gedrückt, was zum Verschuß dieses Kanals führte. Als Abstandshalter reichte demnach die Ringdichtung zwischen der letzten Wärmetauscherplatte und der Glasscheibe nicht aus.

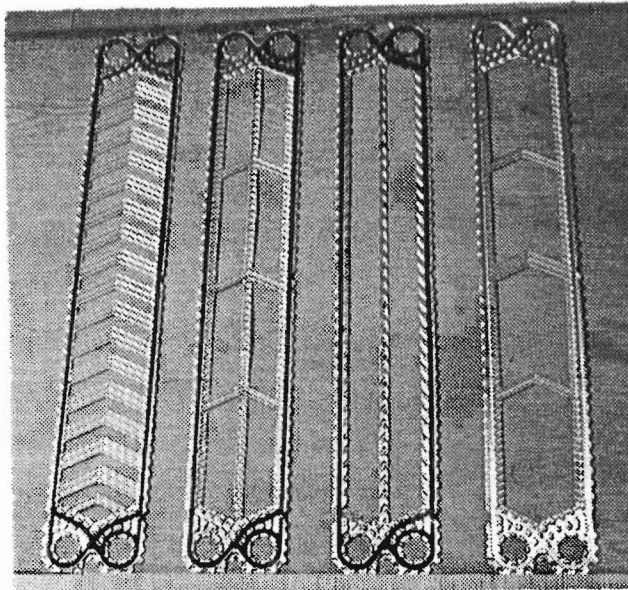


Bild 10: Untersuchte Abstandhalter für den einsehbaren Plattenwärmeübertrager

Daher wurden, wie im Bild 10 dargestellt, Wärmetauscherplatten, in die verschiedenartige Aussparungen hineingeschnitten wurden, als Abstandhalter zur Glasscheibe erprobt. Für die

Untersuchungen wurden letztlich die beiden Abstandshalter mit nur geringen Aussparungen gewählt, um die Strömungsverhältnisse im einsehbaren Kanal nicht mehr als notwendig zu verfälschen. Neben der geänderten Geometrie des einsehbaren Kanals ist bei der Bewertung der erzielten Ergebnisse ferner dessen lediglich einseitige Beaufschlagung mit dem Kälte Träger zu berücksichtigen.

Die Versuche mit dem so modifizierten Plattenwärmeübertrager zeigten, daß bei Überhitzungen oberhalb von 10 bis 12 K das Kältemaschinenöl sich auf der Überhitzungsstrecke im Verdampfer festsetzte. In unregelmäßigen Abständen wurde dieses Öl von einem Schwall flüssigem Ammoniak aus dem Verdampfer gespült, wie es bereits bei dem gelöteten Plattenwärmeübertrager beobachtet wurde. Durch manuelle Regelung des Expansionsventils nach "optischen" Gesichtspunkten konnte unter Verringerung der Verdichterdrehzahl ein stationärer Betrieb mit Überhitzungen zwischen 5 und 10 K bei akzeptablen Verdichtungsendtemperaturen realisiert werden. Unter diesen Bedingungen wurde auch die angestrebte Kälteleistung von 10 kW erreicht und konnte teilweise sogar übertroffen werden. Mit sinkender Überhitzung wurde beobachtet, daß der Anteil des ausgetragenen bzw. des im Öl gelösten Ammoniaks am Verdampferaustritt anstieg. Ein Aufschäumen des Öls im Kurbelgehäuse des Verdichters konnte unter diesen Bedingungen nicht festgestellt werden.

Mit Hilfe der Einsichtmöglichkeit konnten experimentelle Untersuchungen im Auslegungspunkt der Kälteanlage bei unterschiedlichen Überhitzungen durchgeführt werden, wobei die Kälteleistung so weit wie möglich konstant gehalten wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Bild 11 aufgetragen, das die zur Verdampfung benötigten Flächenanteile im Verdampfer als Funktion der Überhitzung darstellt. Die im Bild 11 dargestellten Ergebnisse basieren auf Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,9 kW/m²K für die Verdampfung und 0,1 kW/m²K für die Überhitzung, die vom Hersteller des Plattenwärmeübertragers für die während der Messungen vorherrschenden Bedingungen angegeben wurden.

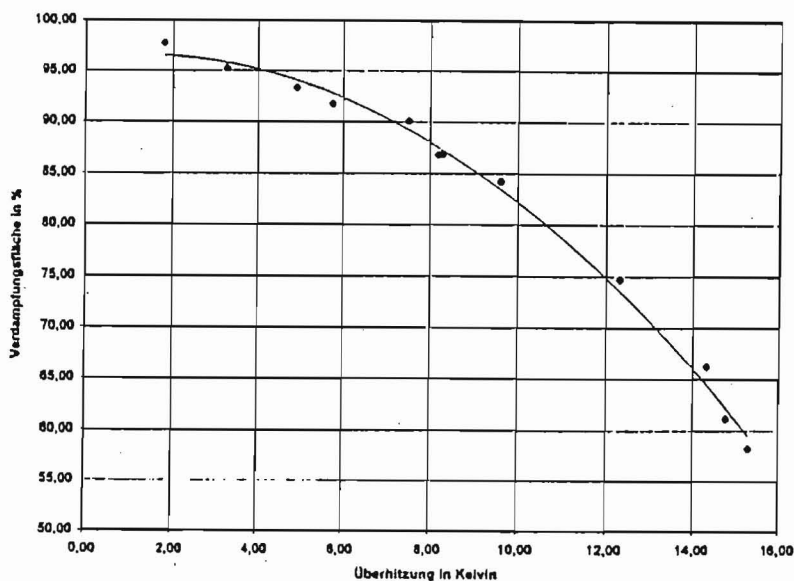


Bild 11: Zur Verdampfung benötigte Fläche in Abhängigkeit der Überhitzung

Die Ergebnisse belegen, daß mit steigender Überhitzung der Anteil der zur Verdampfung genutzten Fläche des Wärmeübertragers überproportional abnimmt. Während bei einer Überhitzung von etwa 7 K noch etwa 90 % der Fläche für die Verdampfung benötigt werden, beträgt dieser Anteil bei einer Erhöhung um weitere 7 K nur noch etwa 60 %. Die Überhitzung sollte daher auch unter diesen Gesichtspunkten möglichst gering gehalten werden.

7.5 Ammoniak-Kalorimeter

Mit Hilfe des Ammoniak-Kalorimeters sollten neben den Untersuchungen zum Öltransport vorwiegend Verdichterleistungsprüfungen nach DIN 8977 (ISO 917) [7] durchgeführt werden. Die Auslegung der Anlage erfolgte nach dem aktuellen Entwurf der DIN 8977 vom Juli 1992. Zweck der Leistungsmessung ist die Bestimmung der Kälteleistung, der Leistungsaufnahme, des isentropen Gütegrades, des Liefergrades und der Kälteleistungszahl des Verdichters. Zur Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse werden in der DIN 8977 grundlegende Prüfbedingungen festgelegt. Diese beinhalten den absoluten Druck am Verdichterein- und -austritt, die Ansaugtemperatur am Verdichtereintritt sowie die Drehzahl des Verdichters. Werden Motorverdichter geprüft, wird anstelle der Drehzahl die Spannung und die Frequenz an den Anschlußklemmen als grundlegende Prüfbedingung festgelegt. Die grundlegenden Prüfbedingungen sind während der gesamten Prüfzeit, die bei Aufnahme der Meßwerte mit registrierenden Prüfgeräten 30 Minuten beträgt, einzuhalten. Die zulässigen Abweichungen von den grundlegenden Prüfbedingungen betragen für die Drücke 1 %, für die Ansaugtemperatur 3 K, für die Drehzahl 1 %, für die Frequenz 1 % und für die Spannung 3 %. Der arithmetische Mittelwert der Messungen gilt als Ergebnis der Prüfungen. Die empirische Standardabweichung der Messungen muß dabei den Vorgaben im Anhang A der DIN 8977 genügen.

Zur Bestimmung der Verdichter-Kälteleistung schreibt die DIN 8977 zwei Meßverfahren X und Y zur Ermittlung des Kältemittelmassenstroms vor, die gleichzeitig durchgeführt auf unterschiedlichen Wegen und unabhängig voneinander erzielt werden müssen. Die nach den Verfahren X und Y gemessenen Kältemittelmassenströme dürfen um nicht mehr als 4 % voneinander abweichen. Dazu ist der Ölwurf des Verdichters bzw. der Ölumlau im Kältemittelkreislauf zu bestimmen. Als Ölwurf wird der Massenanteil des Kältemaschinenöls im Kältemittel bezeichnet, der den Verdichter verläßt. Der Ölumlau ist der Massenanteil des Kältemaschinenöls im Kältemittel, das im Kältemittelkreislauf zirkuliert. Der Ölumlau in der Kälteanlage ist durch Probenentnahme zu bestimmen. Beträgt der Ölumlau mehr als 1,5 %, so ist die Kälteanlage mit einem Ölabscheider zu betreiben. In dem Fall sind der Ölwurf und der Ölumlau nicht mehr identisch.

In der DIN 8977 werden für die Einzelprüfungen neun mögliche Verfahren mit den Bezeichnungen A bis K zur Bestimmung des Kältemittelmassenstroms vorgeschlagen. Im hier zu erstellenden Ammoniak-Kalorimeter sollen die Kältemittelmassenströme durch Bilanzen am Verflüssiger und Verdampfer nach dem Prüfverfahren G mit wassergekühltem Verflüssiger und Prüfverfahren A mit einem Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter unabhängig voneinander bestimmt werden. Alternativ zum Prüfverfahren A wurde auch das Prüfverfahren C zur Bestimmung des Kältemittelmassenstroms bei trockener Verdampfung in dem Ammoniak-Kalo-

rimeter vorgesehen. Im Gegensatz zum Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter mit elektrischer Heizung kann das sogenannte trockene Kältemittel-Kalorimeter nach dem Prüfverfahren C mit Hilfe einer Flüssigkeit beheizt werden.

7.5.1 Aufbau des Sekundärflüssigkeitskalorimeters

Als Verdampfer des Ammoniak-Kalorimeters sollte ein Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter erstellt werden, das nach dem Prinzip der Kompensation arbeitet. Das Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter besteht aus einem Primärverdampfer, der als Rohrschlange zur Verdampfung des Kältemittels dient und im oberen Teil des druckfesten Kalorimeterkessels angeordnet ist. Zur Kompensation der Verdampferleistung sind im unteren Teil des Behälters elektrische Heizungen zur Beheizung bzw. Verdampfung der Sekundärflüssigkeit eingebaut. Der erzeugte Dampf des Sekundärfluides kondensiert an der Verdampferschlange des Kältemittelkreislaufs und tropft von dort wieder in Flüssigkeit zurück, um erneut zu verdampfen. Durch eine geeignete Wahl der Heizleistung stellt sich im Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter ein Gleichgewichtszustand zwischen der siedenden Sekundärflüssigkeit und dem verdampfenden Kältemittel ein. Ist dieser Gleichgewichtszustand erreicht, entspricht die Leistungsaufnahme der Heizelemente der Kälteleistung des verdampfenden Ammoniaks. Eventuell vorhandene Wärmeverluste des Kalorimeterkessels zur Umgebung sind dabei zu berücksichtigen.

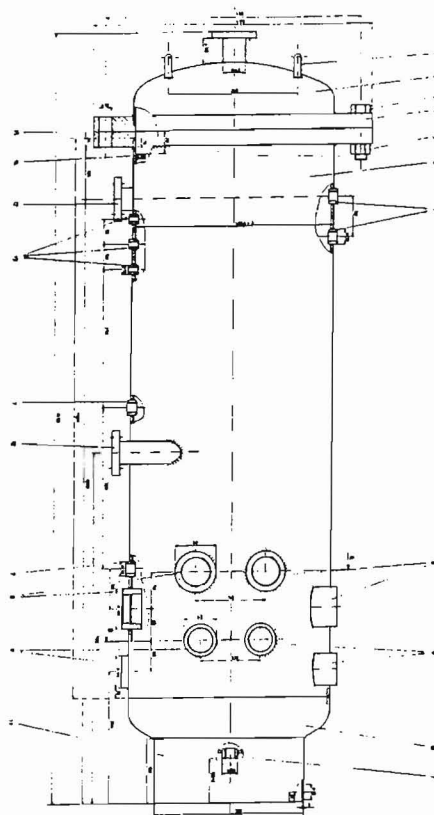


Bild 12: Technische Zeichnung des Kalorimeterkessels

Ausgelegt wurde das Sekundärflüssigkeits-Kalorimeter für Kälteleistungen zwischen 2 und 20 kW im Bereich von Verdampfungstemperaturen zwischen -40 und 0°C. Für eine Verdampfungstemperatur von +5°C sollte zusätzlich eine Kälteleistung von 30 kW ermöglicht werden. Als Sekundärflüssigkeit wurde das Kältemittel R227ea (Heptafluorpropan, CF₃-CHF-CF₃) gewählt, da es weder toxisch noch brennbar ist und im Anwendungsbereich des Kalorimeters moderate Dampfdrücke aufweist. Der Normalsiedepunkt von R227ea liegt bei -17°C.

Zur Erstellung des Sekundärflüssigkeits-Kalorimeters wurde der im Bild 12 dargestellte Kalorimeterkessel zunächst konstruiert und anschließend bei der Körting AG in Hannover gefertigt. Zur Minimierung der Kosten wurden sämtliche Flanschen, Buchsen und Kleinteile am IKW hergestellt. Entsprechend der Druckbehälterverordnung [30] wurde der Kessel einer Vor- und Hauptprüfung durch den Technischen Überwachungsverein unterzogen.

Der Kalorimeterkessel, der komplett aus Edelstahl gefertigt wurde, besitzt eine Wandstärke von 3 mm und ist für Absolutdrücke zwischen 0 und 11 bar ausgelegt. Dies entspricht dem Sättigungsdruck des Kältemittels R227ea bei einer Temperatur von 57°C. Zur Einhaltung des maximal zulässigen Druckes ist ein Sicherheits-Überdruckventil vorgeschrieben, das am Kopf des Kessels angebracht wurde. Die Verdampferschlange, die komplett aus Aluminium gefertigt werden sollte, wird durch die seitlichen Flansche in den Kessel eingeführt. Zur Beheizung des Kessels wurden insgesamt 12 Einschraubheizkörper verwendet, die waagrecht in vier Ebenen je drei Heizkörper in den Kessel eingeschraubt wurden. Der waagrechte Einbau der Heizkörper wurde gewählt, um für geringe Kälteleistungen die Masse des Sekundärfluides und somit die Trägheit des Systems reduzieren zu können. Wie in der Tabelle 6 aufgeführt, wurden die Heizelemente mit den geringeren Leistungen in den unteren Ebenen plaziert. Die Heizung mit einer Leistung von 1 kW in der unteren Ebene ist stufenlos regelbar. Die Aufteilung der Leistungen der einzelnen Heizelemente wurde so gewählt, daß durch wahlweises Zuschalten der Heizelemente im Bereich zwischen 0 und 30 kW eine stufenlose Regelung der Heizleistung möglich ist.

Tabelle 6: Aufteilung der Heizelemente im Kalorimeterkessel (R=regelbar)

Ebene	HK-Leistung [kW]	Betriebsbereich [kW]	Flüss.-Volumen R227 [dm ³]
4	4; 4; 4	>19 - 31	ca. 60
3	4; 4; 4	>7 - 19	ca. 50
2	1,0; 2,0; 2,0	>2 - 7	ca. 40
1	0,5; 0,5; 1,0R;	0 - 2	ca. 30

Für den sicheren Betrieb des Kalorimeterkessels sollte ein Flüssigkeitsstand von etwa 100 mm oberhalb der verwendeten Heizkörperebenen eingehalten werden. Der Kalorimeterkessel mit einem Innenvolumen von etwa 160 l benötigt beim Vollastbetrieb ein Flüssigkeitsvolumen von etwa 60 l des Sekundärfluides. Die notwendigen Mengen im Teillastbetrieb sind in der Tabelle 6 aufgeführt. Im Betrieb des Kessels kann der Flüssigkeitsstand mit Hilfe einer Füllstandsanzeige kontrolliert werden.

Zur elektrischen Versorgung des Sekundärflüssigkeits-Kalorimeters wurde ein Schaltschrank erstellt, in dem ebenfalls die notwendige Meß- und Sicherheitstechnik untergebracht ist. Neben dem Sicherheitsventil wurde der Kessel mit einem Pressostaten ausgestattet, der bereits bei Erreichen eines Druckes von 10,5 bar anspricht, wodurch eine weitere Zufuhr von Heizleistung unterbunden wird. Gemessen wird die elektrische Heizleistung mit Hilfe von Wirkleistungsmeßumformern, deren Ausgangssignale von der Meßwerterfassung aufgenommen werden.



Bild 13: Verdampferschlange aus Aluminium

Die in den Kessel eingebrachte Verdampferschlange, die im Bild 13 dargestellt ist, ist einflüchtig ausgeführt und besitzt eine Gesamtlänge von 19 m, von denen 12 m in 12 x 1 mm und 3 m in 28 x 1,5 mm Aluminiumrohren bestehen. Die Verdampferschlange besitzt über ihre gesamte Länge ein Gefälle, wodurch ein sicherer Öltransport gewährleistet wird. Mit Hilfe von modifizierten Kleinstflanschen, wie sie in der Vakuumtechnik üblich sind, wurde die Verbin-

dung des Verdampferrohres mit den Rohren der Kälteanlage realisiert. Diese Art der Verbindung ermöglicht einen problemlosen Ein- und Ausbau der Verdampferschlange und zugleich auch den Austausch dieses Verdampfers mit anderen Bauarten.

7.5.2 Aufbau und Inbetriebnahme des Ammoniak-Kalorimeters

Der Aufbau der Versuchskälteanlage, der schematisch im Bild 14 dargestellt ist, erfolgte parallel zur Erstellung des Sekundärflüssigkeits-Kalorimeters. Der prinzipielle Aufbau gleicht dem der Versuchskälteanlage, die im Kapitel 7.1 beschrieben ist. Zusätzlich enthalten in dieser Kälteanlage sind ein Ölabscheider vom Typ OS-42FL der Firma Erich Schulze, ein Filtertrockner vom Typ K70-7 der Firma Kenmore sowie ein Flüssigkeitsabscheider in der Saugleitung, der in Eigenbau erstellt wurde.

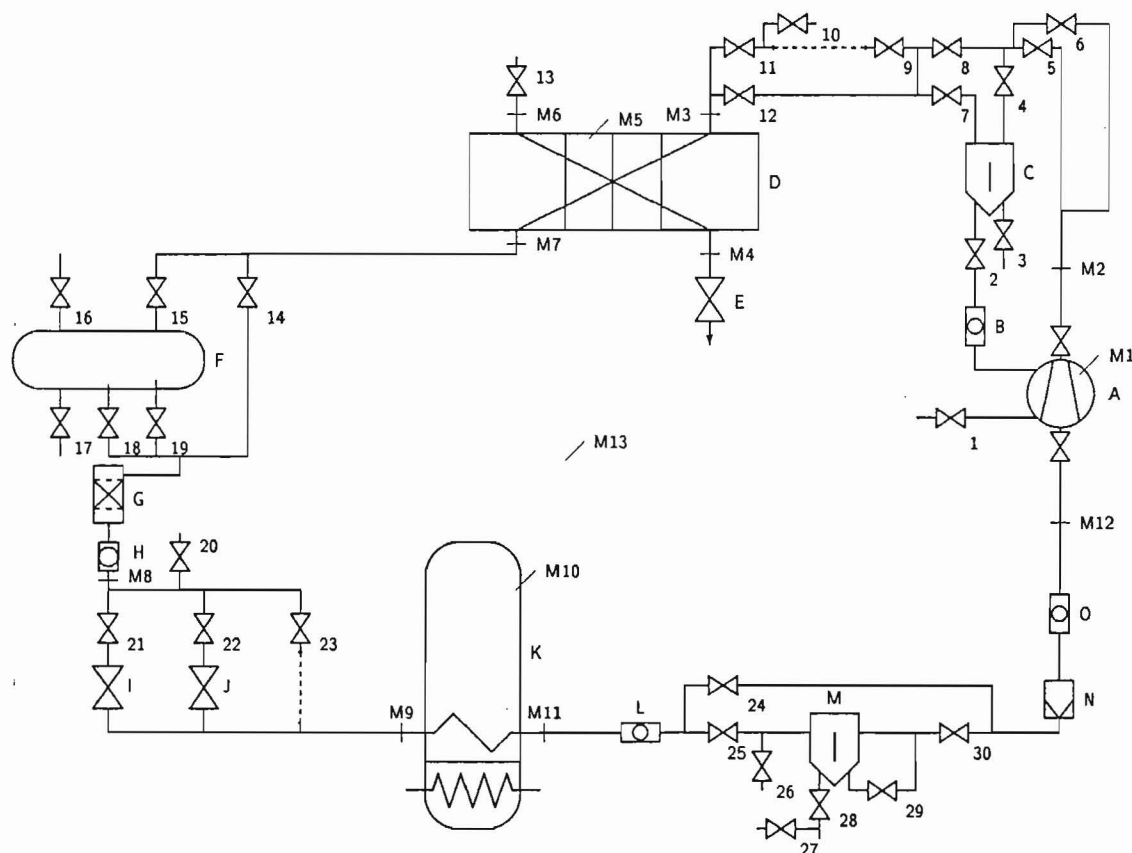


Bild 14: Schematischer Aufbau des Ammoniak-Kalorimeters

Auch in dieser Anlage wurden Ventile und Armaturen in Gruppen zusammengefaßt, die mit Hilfe von Stahlrohren verbunden wurden. Die Verbindung der einzelnen Gruppen erfolgte durch Aluminiumrohre. Die Auslegung der Kälteanlage ergab Innendurchmesser für die Heißgasleitung von 15 mm, für die Flüssigkeitsleitungen von 10 mm, für die Einspritzleitung von 10 mm und die Sauggasleitung von 25 mm. Die steigend verlegte Heißgasleitung wurde zum problemlosen Öltransport im Teillastbetrieb mit einer Bypassleitung versehen, die einen Innendurchmesser von 7,6 mm besitzt. Sowohl für den Verflüssiger als auch - bis zur Fertig-

stellung des Sekundärflüssigkeitskalorimeters - für den Verdampfer wurden Plattenwärmeübertrager vom Typ VT10 der Firma GEA Ecoflex verwendet. Dabei handelt es sich um gedichtete Plattenwärmeübertrager mit 40 Platten im Verdampfer und 70 Platten im Verflüssiger.

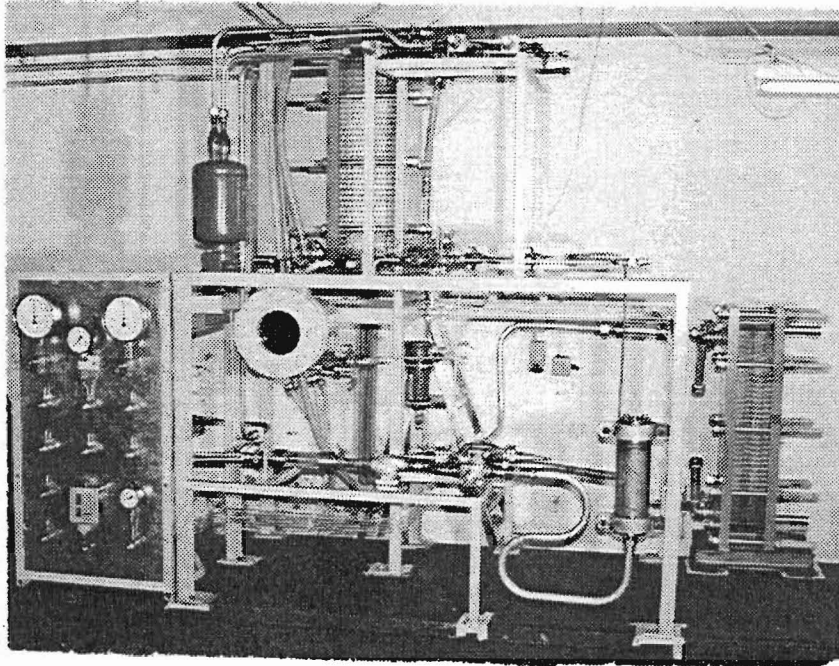


Bild 15: Frontansicht auf das Ammoniak-Kalorimeter

Der liegend ausgeführte Kältemittelsammler, der ein Volumen von etwa 8 l faßt, wurde im Eigenbau erstellt. Wie im Bild 15 dargestellt, ist er frontseitig durch eine Glasscheibe komplett einsehbar, wodurch Verunreinigungen in der Kälteanlage oder Entmischungserscheinungen von Kältemittel und Öl beobachtet werden können. Die Regelung der Kälteanlage erfolgte mit zwei Nadelventilen der Firma Danfoss mit der Bezeichnung 6F, die parallel betrieben und von Hand bedient wurden. Ein Ventil, dessen Spindel vorher modifiziert wurde, diente zur Grobregelung, das andere wurde zur Feinregelung verwendet.

Am Ausgang des Verdampfers wurde zum Schutz des Verdichters ein Flüssigkeitsabscheider in Form eines Zyklons installiert, der im Bypass betrieben werden kann. Durch eine Glasscheibe am Kopf kann auch der Flüssigkeitsabscheider eingesehen werden. Durch eine Verbindungsleitung vom Boden des Abscheiders zur Saugleitung besteht die Möglichkeit, beispielsweise abgeschiedenes Öl zum Verdichter zurückzuführen. Daneben besteht die Möglichkeit, den Zyklon mit Hilfe einer Heizmanschette zu beheizen, um so in der Flüssigkeit gelöstes Kältemittel auszutreiben.

Zur Beobachtung des Ölulafs bzw. eventuell durchspritzenden Kältemittels wurden am Austritt des Verdampfers sowie am Eintritt des Verdichters einsehbare Rohrstrecken installiert. Der Ölwurf aus dem Verdichter bzw. der Ölulaf im Kältemittelkreislauf konnte durch Probeentnahmen am Austritt des Verflüssigers, aus der Flüssigkeitsvorlage des Kältemittelsammlers und aus der Flüssigkeitsleitung zwischen Schauglas und Expansionsventilen ermit-

telt werden. Zusätzlich wurden Möglichkeiten zur Probeentnahme am Boden des Flüssigkeitsabscheiders, des Ölabscheiders sowie aus dem Kurbelgehäuse des Verdichters vorgesehen.

Ausgerüstet wurde die Kälteanlage zunächst mit einem offenen Verdichter der Bezeichnung F4-NH₃ der Bock Kältemaschinenfabrik, dessen Bauart als Vierzylinder-Hubkolbenverdichter mit einem geometrischen Hubvolumen von 40,54 m³/h bei einer Drehzahl von 1450 min⁻¹ dem im Rahmen dieses Projektes entwickelten halbhermetischen Ammoniak-Verdichter fast identisch ist. Angetrieben wird der offene Verdichter mit Hilfe eines pendelnd gelagerten Gleichstrommotors, dessen Drehzahl stufenlos eingestellt werden kann. Die Drehzahl des Motors wird mit Hilfe einer auf der Welle aufgebrachten Schnittscheibe und einer Gabellichtschranke bestimmt. Zur Messung des Drehmomentes wurde am Gleichstrommotor ein Hebelarm angebracht, dessen Reaktionskraft in einem definierten Abstand von der Drehachse ermittelt wurde. Durch eine stufenlose Verschiebung der verwendeten Kraftmeßdose am Hebelarm ließ sich die Vorrichtung an die jeweiligen Lastzustände des Verdichters anpassen.

Für den elektrischen Anschluß des halbhermetischen Verdichters wurde ein separater Schaltschrank erstellt, der mit einem Frequenzumrichter ausgerüstet war, der optional verwendet werden konnte. Für die Messung der elektrischen Größen standen Starkstrom-Meßumformer der Firma Hartmann und Braun zur Verfügung: Für die Klemmenspannung der Typ ETV25, für den Strom ETA25, für den Leistungsfaktor des Verdichtermotors der Typ ETL30, für die Wirkleistung des Verdichters der Typ ETP30 und für die Wirkleistung des Lüftermotors der Typ ETP. Die Netzfrequenz konnte mit Hilfe eines Zungenfrequenzmessers abgelesen werden.

Gemäß der DIN 8977 wurden die Temperaturen und Drücke an den entsprechenden Meßstellen, die im Bild 14 mit "M" gekennzeichnet sind, mit Hilfe von gemantelten NiCr/Ni-Thermoelementen und Dünnschichtdruckaufnehmern gemessen. Zusätzlich wurden die Temperaturen im Ölsumpf sowie am Ventilsplatt des Verdichters, im Ölabscheider sowie im Flüssigkeitsabscheider aufgenommen. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen wurden zur Steigerung der Genauigkeit die Temperaturen des Kühlwassers am Ein- und Austritt des Verflüssigers sowie des Kälte-trägers am Ein- und Austritt des Verdampfers mit Hilfe von Pt100-Fühlern ermittelt. Gegenüber den Thermoelementen, deren Ungenauigkeit nur 0,1 K betrug, besaßen die Platin-Widerstandsthermometer eine Meßgenauigkeit von 0,05 K.

Die Volumenströme des Kühlwassers sowie des Kälte-trägers wurden mit Wasserzählern bestimmt, die vor den Versuchen durch Auslitern kalibriert wurden. Bis auf den Volumenstrom des Kälte-trägers und der Frequenz des elektrischen Netzes, die über Tastatur in das Meßwerterfassungsprogramm eingegeben wurden, wurden alle Meßsignale von der Meßwerterfassung und -auswertung aufgenommen.

Vor Inbetriebnahme ist die gesamte Kälteanlage mit Pentan gespült worden, um herstellungs- bzw. fertigungsbedingte Rückstände zu entfernen. Zum Probetrieb und für vergleichende Messungen wurde die Kälteanlage zunächst mit R22 und dem Schmierstoff auf der Basis eines Alkylbenzols Reniso SP 32 der Fuchs Mineralölwerke befüllt.

Im Rahmen dieser Versuche zeigte sich die Notwendigkeit zum Aufbau eines separaten Wasserkreislaufes zur Regelung und Einhaltung eines konstanten Verflüssigungsdrucks, weil die Temperatur des Wassers aus dem öffentlichen Versorgungsnetz um bis zu 1 K schwankte. Dadurch wurde die Einhaltung der zulässigen Abweichungen der grundlegenden Prüfbedingungen nahezu unmöglich. Daher wurde das Kühlwasser mit Hilfe einer Pumpe aus einem Behälter mit einem Volumen von etwa 100 l im Kreislauf durch den Verflüssiger gefördert. Die Temperatur der Wasservorlage wurde mit Hilfe eines Überlaufs und eines thermostatisch geregelten Ventils, welches den Zufluß von Kaltwasser aus dem Netz entsprechend regelt, konstant gehalten. Die Regelung der Verdampferleistung erfolgte mit dem in Kapitel 7.1 beschriebenen externen Kälte-trägerkreislauf.

Nach Abschluß der Untersuchungen mit R22 wurden das Öl und das Kältemittel der Anlage entnommen und ein erneuter Spülvorgang mit Pentan durchgeführt. Um eine vollständige Entfernung des vorher eingefüllten Schmierstoffes SP 32 zu gewährleisten, wurde die Kälteanlage anschließend mit Ammoniak und dem Spülöl T01/35 befüllt. Nach einer Laufzeit von etwa vier Stunden wurde das Spülöl durch das Kältemaschinenöl Reniso PG 68 ausgetauscht. Eine Analyse des Spülöls ergab einen Massenanteil von etwa 2,8 % des vorher eingefüllten Schmierstoffes SP 32.

Während der anschließenden Untersuchungen mit NH₃ wurden in den Schaustrecken der Saugleitung und im Flüssigkeitsabscheider weiße Ablagerungen beobachtet. Auch im Kältemittelsammler bildeten sich kristalline Ausfällungen. Daraufhin wurden die Versuche abgebrochen, die Kälteanlage entleert und geöffnet. Besonders auf der Niederdruckseite der Kälteanlage waren die Wandungen mit einem weißen bis grauen Film benetzt, der eine pastöse Konsistenz aufwies und zudem kleine, weißliche Feststoffe enthielt. An einigen Unterschneidungen von Ventilen oder Flanschen hatten sich kristalline Feststoffe niedergeschlagen. Einige Bauteile aus schwarzem Stahl waren mit einem bläulichen Belag überzogen, der auf das Vorhandensein von Kupfer hindeuten könnte. Geringe Mengen dieser Beläge und Ausfällungen konnten der Anlage entnommen und chemisch analysiert werden. Auch der Schmierstoff, der ebenfalls mit den Verunreinigungen behaftet war, wurde einer chemischen Analyse unterzogen. Dazu wurden eine Probe aus dem Kurbelgehäuse des Verdichters sowie eine Probe des im Verdampfer verbliebenen Schmierstoffes entnommen.

Versuche zur Reinigung der Kälteanlage mit Pentan und Isopropanol schlugen fehl. Auch das Reinigungsverfahren mit Ammoniak und dem Spülöl T01/35 war nicht erfolgreich. Nach Absprache mit dem chemischen Labor des Flußmittelherstellers wurde die Kälteanlage zur Reinigung mit dem Kältemaschinenöl PG 68 und dem Kältemittel Ammoniak betrieben, dem ein Massenanteil von etwa 10 % Wasser beigemischt wurde. Damit wurde die Kälteanlage etwa drei Stunden bei Verdampfungstemperaturen von 0°C und Verflüssigungstemperaturen von 30°C betrieben, wobei eine deutliche Abnahme der Ablagerungen in den einsehbaren Komponenten der Kälteanlage zu verzeichnen war. Der Spülvorgang wurde insgesamt zweimal mit jeweils frischem Öl und Kältemittel durchgeführt. Anschließend wurde mit Hilfe eines zweifachen Öl- und Ammoniak-Wechsel sowie einer mehrstündigen Evakuierung des Verdampfers, der dazu auf eine Temperatur von 60°C aufgeheizt wurde, der Kältemittelkreislauf ge-

trocknet. Zur Kontrolle wurde der Kältemittelkreislauf an verschiedenen Stellen geöffnet, wobei jedoch keine Verunreinigungen mehr festzustellen waren.

Die chemischen Analysen, die erst nach Ablauf des Projektes abgeschlossen wurden, ergaben, daß alle untersuchten Feststoffproben vorwiegend Chlor und Eisen, aber auch Zink und Kalium enthielten. In Spuren wurde auch Aluminium, Silicium, Schwefel und Chrom nachgewiesen. Der im Öl des Verdichters ermittelte Wassergehalt von 384 ppm sowie die Ergebnisse einer eigens durchgeführten IR-Spektren-Übersicht belegten bis auf einen unerklärlichen Anteil von 380 ppm Phenol keine weiteren Unregelmäßigkeiten. Der Schmierstoff, der dem Verdampfer entnommen worden ist, wies mit 9900 ppm Wasser unzulässig hohe Werte auf. Zudem wurde ein Restgehalt von 7,8 % des vorher verwendeten Alkylbenzol-Schmierstoffes SP 32 ermittelt. Die Herkunft der im Öl enthaltenen Feststoffpartikel konnte auch mit Hilfe aufwendige Analysen nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Auch eine Beteiligung der Materialien des Filtertrockners an den chemischen Reaktionen war nicht zweifelsfrei auszuschließen.

Das Auftreten dieser Erscheinungen konnte auch durch die aufwendigen, chemischen Analysen letztlich nicht vollständig geklärt werden. Einige Gründe sprechen jedoch dafür, daß nicht verbrauchte Reste des verwendeten, hygroskopischen Flußmittels eine auslösende Wirkung gehabt haben könnten. Auffällig war zum einen, daß die Verunreinigungen vorwiegend im kalten Teil der Kälteanlage aufgetreten sind, in dem ein erhöhter Wasseranteil nachgewiesen wurde. Zum anderen traten diese Erscheinungen bei den anschließenden Versuchen mit dem Kältemittel Ammoniak nicht wieder auf, obwohl die Anlage bis auf den Ausbau des Filtertrockners, der vor den Reinigungsversuchen noch ohne Kenntnis der chemischen Analysen wegen der Ähnlichkeit seines Bestandteile mit den im Schmierfilm beobachteten Partikel vorgenommen wurde, nicht weiter modifiziert wurde. Es deutet somit darauf hin, daß die Substanz, welche diese chemischen Reaktionen auslöste, durch die Reinigungsverfahren aus der Anlage entfernt oder bei den chemischen Reaktionen passiviert bzw. verbraucht wurde.

7.5.3 Vergleich des Anlagenverhaltens von Ammoniak und R22

Der Vergleich der Kältemittel Ammoniak und R22 wurde mit dem offenen Verdichter F4-NH₃, der mit wassergekühlten Zylinderköpfen ausgestattet war, und dem Plattenwärmeübertrager als Verdampfer bei Verdampfungstemperaturen von -10°C und Verflüssigungstemperaturen von 39°C durchgeführt. Da die Heizleistung des Kälte trägerkreislaufes zum Zeitpunkt der ersten Versuche auf 13,5 kW begrenzt war, wurde eine Reduzierung der Verdichterdrehzahl auf 980 min⁻¹ notwendig.

Erste Unterschiede zwischen den Kältemitteln traten bereits bei der Befüllung der Kälteanlage auf, bei der für R22 eine Füllmenge von 11 kg nötig war, wohingegen für NH₃ schon 4 kg ausreichten. Weitere Unterschiede traten wie erwartet für die Druckrohrtemperaturen auf, die beim den Versuchen mit R22 unabhängig von der Überhitzungen immer unterhalb von 100°C lagen. Für den Betrieb mit Ammoniak war der Einsatz der Zylinderkopfkühlung notwendig,

um die Druckrohrtemperatur auf 130°C zu begrenzen. Messungen der Ein- und Austrittstemperaturen sowie des Volumenstromes ergaben eine an das Kühlwasser abgegebene Leistung von etwa 0,9 kW.

Der Verdampfer war für die geringen Kälteleistungen, die bei den reduzierten Verdichterdrehzahlen erzielt werden konnten, deutlich überdimensioniert. Wegen der dadurch vorhandenen Flächenreserve war es möglich, die Messungen von minimalen bis hin zu Überhitzungen von 20 K durchzuführen. Die Ergebnisse der Verdichterleistungsmessungen sind in den Bildern 16 bis 18 dargestellt.

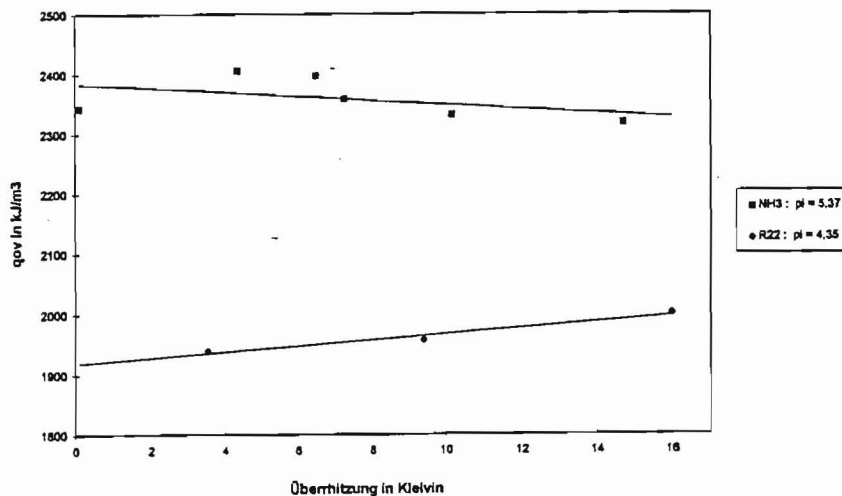


Bild 16: Vergleich der volumetrischen Kälteleistung von Ammoniak und R22

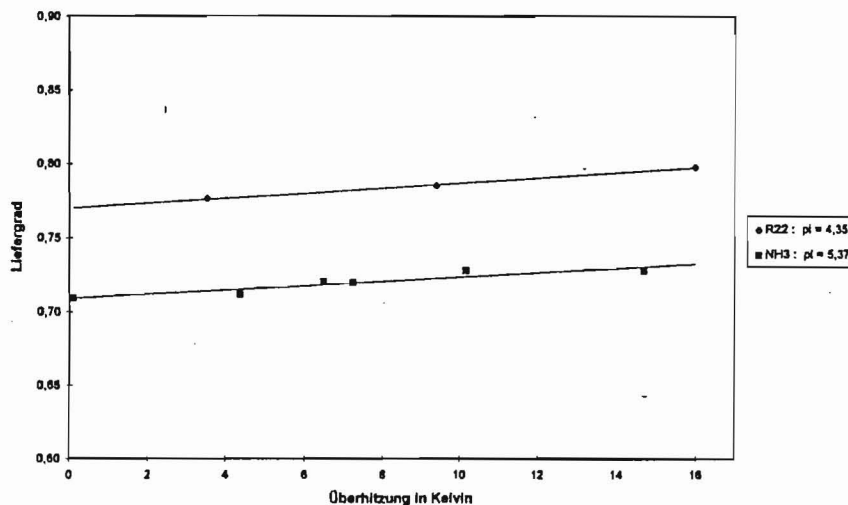


Bild 17: Vergleich der Liefergrade von Ammoniak und R22

Ammoniak besitzt auf Grund der höheren Verdampfungsenthalpie eine entsprechend größere volumetrische Kälteleistung q_{0V} , wie der Vergleich im Bild 16 belegt. Im Gegensatz zu R22, dessen volumetrische Kälteleistung mit steigender Überhitzung zunimmt, sinkt q_{0V} für Ammoniak. Der Liefergrad λ nimmt für R22 etwas höhere Werte an als für Ammoniak. Der

Grund ist in dem höheren Druckverhältnis beim Betrieb mit NH₃ zu sehen. Beide Funktionen verlaufen nahezu parallel. Mit steigender Überhitzung nimmt der Liefergrad beider Kältemittel geringfügig zu. Trotz des etwas geringeren Liefergrades zeigt das Kältemittel Ammoniak ein energetisch günstigeres Verhalten. Die gemessene Kälteleistungszahl ist, wie im im Bild 18 in Abhängigkeit der Überhitzung aufgetragen, für Ammoniak etwa 8 bis 9% höher als für R22.

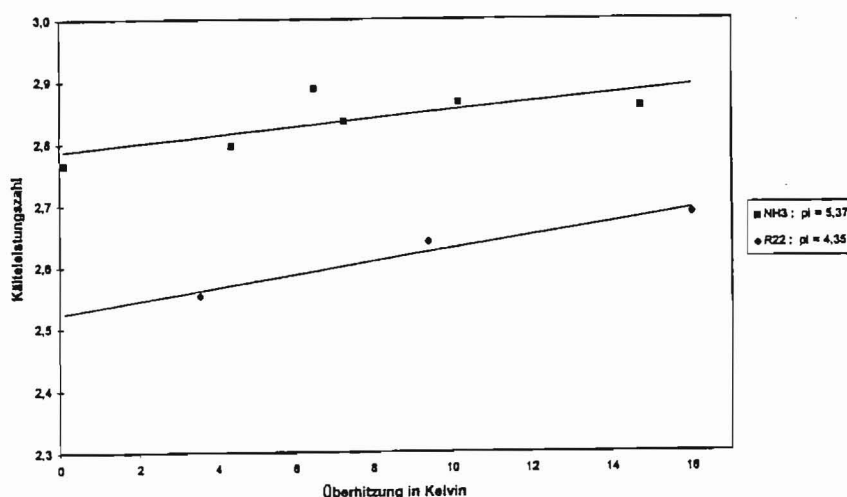


Bild 18: Vergleich der Kälteleistungszahlen von Ammoniak und R22

Neben den energetischen Aspekten beider Kältemittel wurden auch deren Ölverhalten in der Versuchskälteanlage experimentell untersucht. Dazu wurde zum einen dem Verdichter aus dem Kurbelgehäuse Öl entnommen, um in Abhängigkeit des Ansaugdruckes p_{v1} und der Öltemperatur $t_{öl}$ den darin gelösten Kältemittelanteil zu bestimmen. Zum anderen wurde im Zyklon das aus dem Verdampfer austretende Öl/Kältemittel-Gemisch über einen Zeitraum von etwa einer Stunde aufgefangen und dessen Zusammensetzung bestimmt. Da die thermophysikalischen Stoffdaten der Systeme R22/SP 32 [16] und R717/PG 68 [11] aus vorangegangenen Forschungsarbeiten bekannt sind, konnte anhand der Zusammensetzung und der am Verdampferaustritt bzw. im Flüssigkeitsabscheider herrschenden Temperaturen mit Hilfe von Berechnungsmodellen die Flüssigkeitsviskosität der ermittelten Gemische berechnet werden.

Die Massenanteile des im Öl des Verdichters gelösten Kältemittels sind im Bild 19 als Funktion der Öltemperatur dargestellt. Gegenüber dem Kältemittel R22 wurden für den Anlagenbetrieb mit Ammoniak zum Teil deutlich höhere Öltemperaturen registriert. Andererseits war unabhängig von den im Kurbelgehäuse vorliegenden Drücken und Temperaturen deutlich mehr R22 im Schmierstoff gelöst, was vorwiegend auf die um einen Faktor von etwa 5 geringe Molmasse von R717 mit 17,03 kmol/kg gegenüber R22 mit 86,48 kmol/kg zurückzuführen ist. Den Gesetzen der Thermodynamik entsprechend stellt sich der Gleichgewichtszustand zwischen dem Öl und dem Kältemittel bei vorgegebenen Drücken und Temperaturen proportional der Molanteile der Gemischkomponenten ein, wodurch sich für das Kältemittel Ammoniak im Vergleich zu R22 geringere Massenanteile ergeben.

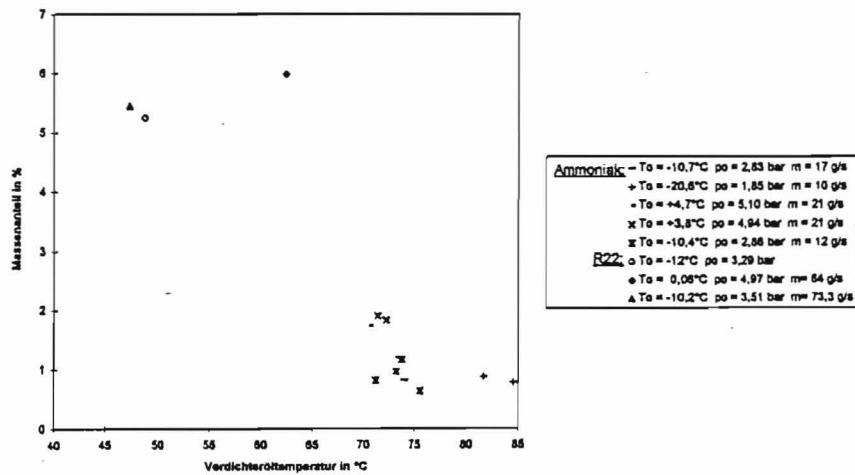


Bild 19: Vergleich des im Öl gelösten Kältemitteanteils

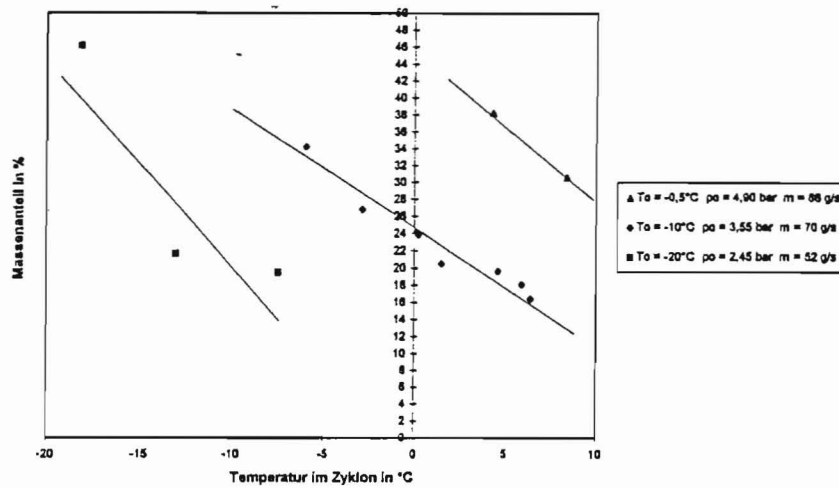


Bild 20: Zusammensetzung der R22/Öl-Gemische am Verdampferaustritt

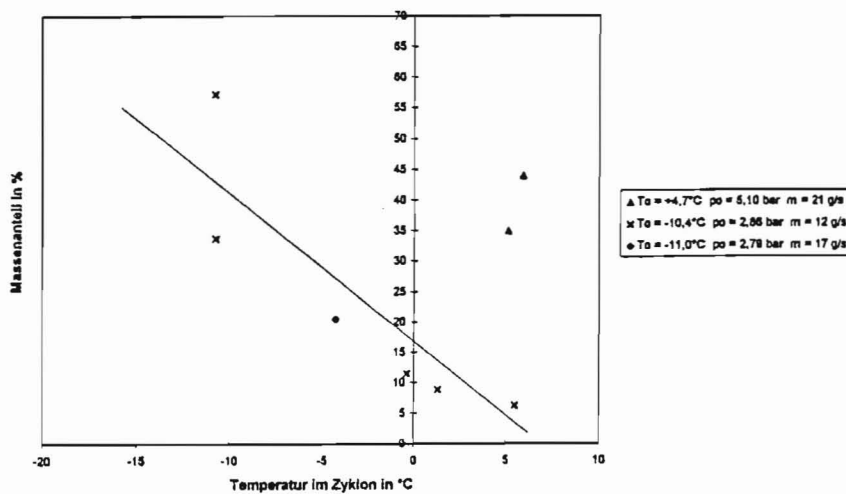


Bild 21: Zusammensetzung der Ammoniak/Öl-Gemische am Verdampferaustritt

Die Ergebnisse der Messungen zur Bestimmung der Öl/Kältemittel-Zusammensetzung am Austritt des Verdampfers sind für das Kältemittel R22 im Bild 20 für Verdampfungstemperaturen von -20°C, -10°C und 0°C in Abhängigkeit der Überhitzung dargestellt. Auffällig ist, daß der Massenanteil des im Öl gelösten Kältemittels für alle Verdampfungstemperaturen die gleiche Größenordnung besitzt. Für geringe Überhitzungen beträgt er etwa 40 %. Mit steigender Überhitzung nimmt der Kältemittelanteil erwartungsgemäß ab.

Die Untersuchungen mit dem Kältemittel Ammoniak konnten nicht wie oben für R22 beschrieben durchgeführt werden, da der Ölumlauf im Kältemittelkreislauf derart gering war, daß auch nach einer Versuchsdauer von mehreren Stunden die im Flüssigkeitsabscheider gesammelte Menge des Öl/Kältemittel-Gemisches zur Bestimmung dessen Zusammensetzung nicht ausreichte. Um dennoch zumindest einen Anhaltswert für dieses Gemisch zu erhalten, wurde im Rahmen der Messen eine Überflutung des Verdampfers provoziert und anschließend die Kälteanlage drei bis vier Stunden im stationären Zustand betrieben, so daß sich ein Gleichgewichtszustand im Flüssigkeitsabscheider einstellen konnte. Aufgrund dieses aufwendigen Verfahrens mußte gegenüber den Versuchen mit R22 die Anzahl der Meßpunkte reduziert werden. Die im Bild 21 dargestellten Ergebnisse der Messungen bei einer Verdampfungstemperatur von -10°C entsprechen tendenziell denen, die mit R22 erzielt wurden.

Die mit Hilfe des modifizierten Modelles von Grunberg und Nissan [14] berechneten Flüssigkeitsviskositäten der Öl/Kältemittel-Gemische, deren Ungenauigkeit mit Hilfe von Vergleichsrechnungen auf etwa 20 % abgeschätzt werden konnte, sind für R22 im Bild 22 als Funktion der Überhitzung aufgetragen. Die Ergebnisse machen deutlich, daß die Viskositätsniedrigung mit steigendem Anteil im Öl gelösten Kältemittels deutlich größer ist als die des Öles bzw. Öl/Kältemittel-Gemisches bei steigender Temperatur. Dieses Verhalten wird auch durch die Ergebnisse mit dem Kältemittel Ammoniak bestätigt, die im Bild 23 dargestellt sind. Gegenüber den Ergebnissen mit R22 ist der Anstieg der Viskosität mit zunehmender Überhitzung etwas stärker, was in der höheren Viskosität des Schmierstoffes PG 68 gegenüber SP 32 oder den o.g. Schwierigkeiten bei den Messungen mit Ammoniak bedingt sein könnte.

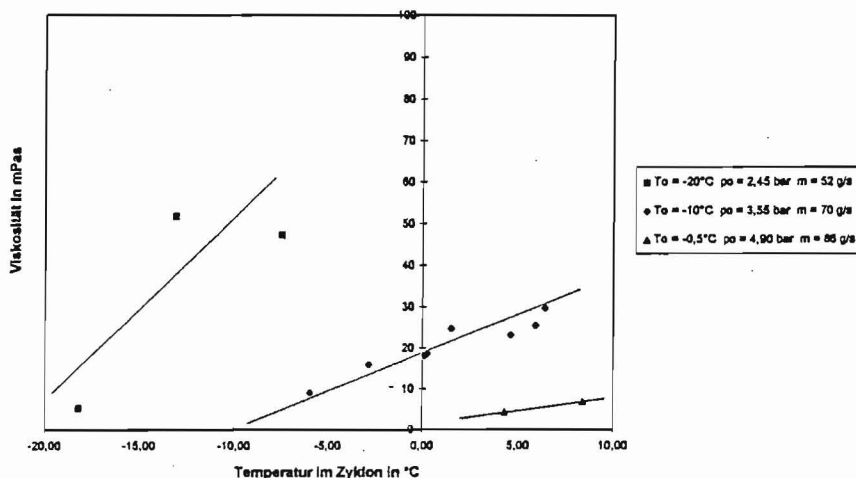


Bild 22: Berechnete Viskosität der R22/Öl-Gemische

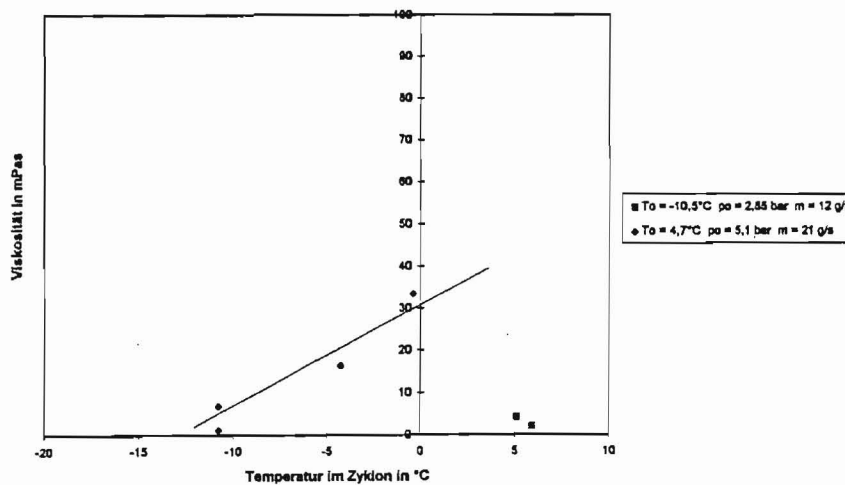


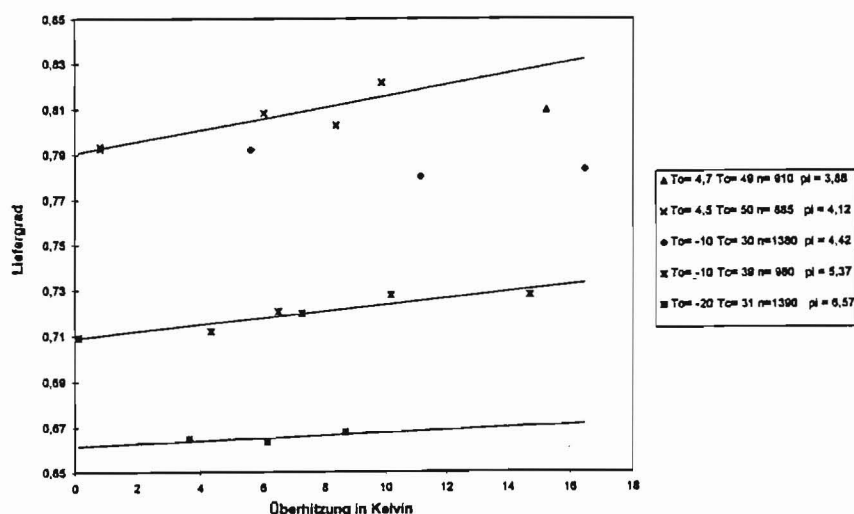
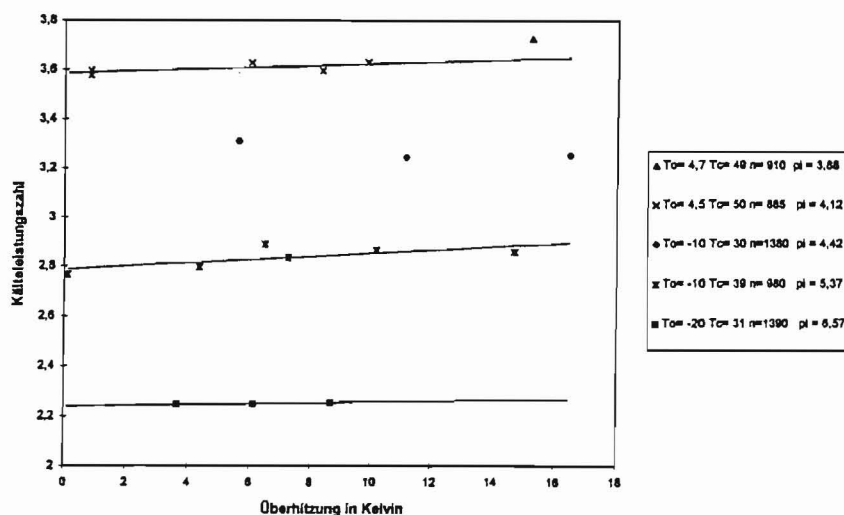
Bild 23: Berechnete Viskosität der Ammoniak/Öl-Gemische

Im Rahmen der im anschließenden Kapitel beschriebenen Messungen, die unter Vollast bei 1450 min^{-1} , wobei der Ölwurf des Verdichters etwas angestiegen war, durchgeführt wurden, zeigte sich bei der Verdampfung im Plattenwärmeübertrager ein ähnliches Verhalten, wie es bereits im einseharen Verdampfer aufgetreten war. Oberhalb einer Überhitzung von 15 K wurde auch im Plattenwärmeübertrager des Ammoniak-Kalorimeters in unregelmäßigen Zeitabständen ein Flüssigkeitsschwall ausgetragen. Auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem Bild 23 entspräche dieses bei einer Verdampfungstemperatur von -10°C einer Grenz-Flüssigkeitsviskosität zwischen 40 und 50 mPa s. Intensivere Untersuchungen zur Öl/Kältemittel-Zusammensetzung am Verdampferaustritt bei einem erhöhten Ölumlau und unter Verwendung des einseharen Plattenwärmeübertragers wären zur Abstützung solcher Grenzwerte sehr nützlich gewesen, konnten jedoch aus zeitlichen Gründen innerhalb der Projektlaufzeit nicht durchgeführt werden.

7.5.4 Verdichterleistungsmessungen mit Ammoniak

Da der halbhermetische Ammoniak-Verdichter erst kurz vor Abschluß des Forschungsvorhabens zur Verfügung stand, wurden weitere Verdichterleistungsmessungen am offenen Verdichter vorgenommen. Die Ergebnisse sind für verschiedene Betriebszustände in den Bildern 24 bis 25 dargestellt.

Parallel zu den Messungen wurde, wie im Kapitel 7.5.1 beschrieben, die vollständige Fertigstellung des Ammoniak-Kalorimeters vorangetrieben. Die Heizleistung des Kälte-trägerkreislaufes wurde um 9 kW auf 22,5 kW gesteigert und der Verflüssiger wurde mit einem vom Versorgungsnetz unabhängigen Kühlwasserkreislauf ausgerüstet.

Bild 24: Liefergrad des offenen Verdichtes mit NH₃Bild 25: Kälteleistungszahl des offenen Verdichtes mit NH₃

Als sehr aufwendig stellte sich der Aufbau des Sekundärflüssigkeitskalorimeters heraus. Während der Inbetriebnahme zeigte sich, daß die eingesetzte Verdampferschlange einer neuen Auslegung bedarf, da für hohe Kälteleistungen die Druckverluste des verdampfenden Ammoniaks oberhalb von 1 bar lagen. Auf die Funktionsfähigkeit des Sekundärkalorimeters hat der Druckverlust jedoch keine negativen Auswirkungen, lediglich die Handhabung wird dadurch unnötig erschwert. Nachdem die Funktionsfähigkeit des vollständig fertiggestellten Ammoniak-Kalorimeters durch die Aufnahme eines Meßpunktes belegt werden konnte, wurden die Versuche am offenen Verdichter beendet und das Kalorimeter auf die Untersuchungen am Prototyp des semihermetischen Verdichters vorbereitet.

7.6 Halbhermetischer Ammoniakverdichter

Zur Hermetisierung von Ammoniak-Verdichtern wurden bislang zwei unterschiedliche Lösungsansätze diskutiert [19]. Zum einen besteht die Möglichkeit, das Ammoniak vom Elektromotor fernzuhalten, zum anderen, die nicht ammoniakresistenten Werkstoffe des Motors zu schützen oder ammoniakresistente Werkstoffe im Motor einzusetzen. Eine hermetische Trennung kann mittels eines sogenannten Spaltrohres geschehen. Durch das Spaltrohr, das zwischen dem Rotor und dem Stator des Elektromotors angebracht ist, wird das Ammoniak von den Kupferwicklungen ferngehalten [23]. Diese Technik ist jedoch mit einer Verschlechterung des Motorwirkungsgrades verbunden, da das Spaltrohr den Abstand zwischen Stator und Rotor erhöht. Durch den Einsatz ammoniakresistenter Materialien können die Motorverluste gegenüber der hermetischen Trennung von Stator und Rotor mittels eines Spaltrohres geringer gehalten werden. Mit Motorwicklungen aus Aluminium wurde dies in Ammoniak-Kälteanlagen größerer Leistung bereits erfolgreich praktiziert [2].

Eine andere Variante der Kraftübertragung vom Motor zum Verdichter kann mit Magneten realisiert werden, die nahezu schlupffrei und mit einem sehr hohen Wirkungsgrad arbeiten können. Dagegen spricht der momentan sehr hohe Preis dieser Technik.

Im hier durchgeführten Forschungsvorhaben wurde eine energetisch günstigere Variante untersucht. Dabei wurde ein Elektromotor eingesetzt, dessen Kupferwicklungen mit einer ammoniakresistenten Masse dicht vergossen und somit vor dem Ammoniak geschützt sind. Diese Lösung bietet die Möglichkeit einer kompakten Bauweise bei hohem Motorwirkungsgrad. Problematisch ist bislang die Herstellung eines solchen Motors. Zudem könnte sich infolge einer schlechteren Wärmeabfuhr des eingegossenen Stators eine Einschränkung des Anwendungsbereichs dieses halbhermetischen Verdichters ergeben [19].

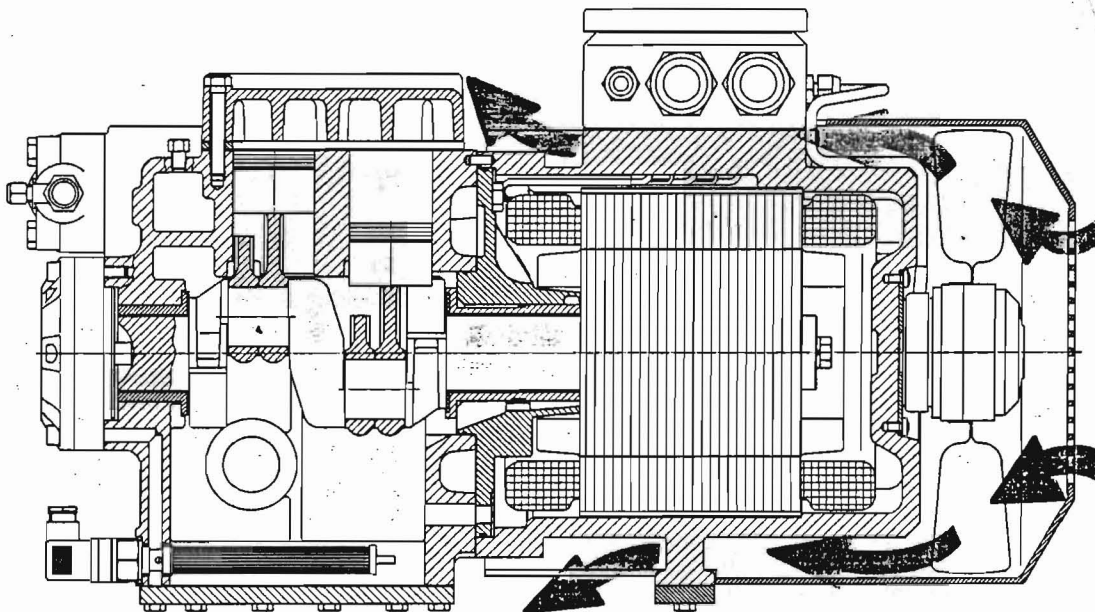


Bild 26: Prototyp des halbhermetischen Ammoniak-Verdichters

Der erstellte Prototyp des halbhermetischen Ammoniak-Verdichters, der im Bild 26 schematisch dargestellt ist, besitzt einen noch nicht optimierten Elektromotor. Wegen der erwarteten schlechteren Wärmeabfuhr des eingegossenen Motors und der hohen Verdichtungsendtemperaturen des Kältemittels Ammoniak wurde für den hier entwickelten Verdichter anstelle des sonst üblichen Prinzips der Sauggaskühlung eine Luftkühlung vorgesehen. Mit Hilfe eines unabhängigen Ventilators wird die zur Kühlung benötigte Luft zunächst um das Gehäuse des Elektromotors und anschließend durch Führungskanäle zu den Zylindern des Verdichters geführt. Durch diese Art der Kühlung wird eine zusätzliche Aufheizung des angesaugten Ammoniakgases vermieden, die eine zusätzliche Begrenzung des Anwendungsbereiches des halbhermetischen Ammoniak-Verdichters durch Erreichen unzulässig hoher Verdichtungsendtemperaturen bedeuten würde.

Der Verdichter verfügt über vier Zylinder mit einem theoretischen Hubvolumen von 40,54 m³/h bei der Nenndrehzahl von 1450 min⁻¹. Der Elektromotor des Kältemittelverdichters ist mit Hilfe einer Thermistorenschaltung vor unzulässiger Erwärmung abgesichert. Die Thermistoren reagieren, sobald die Temperatur der Motorwicklungen 130°C übersteigt.

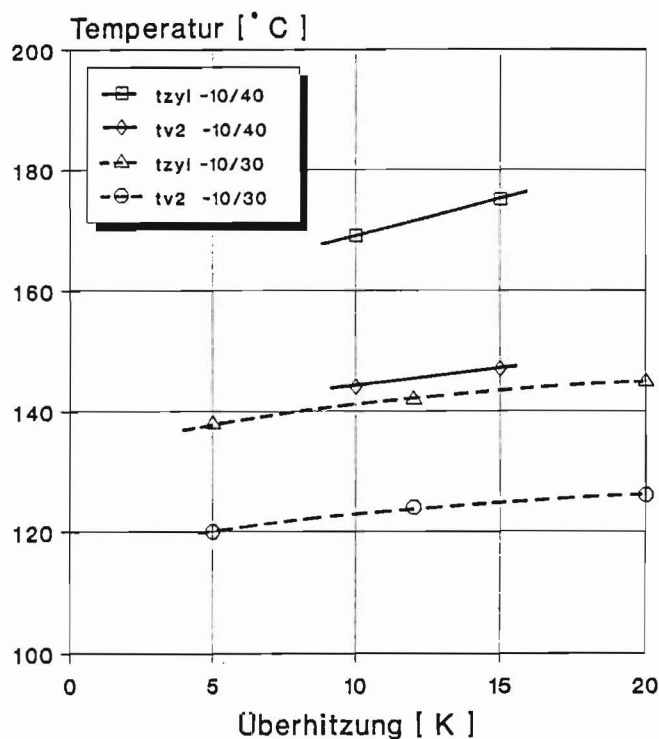


Bild 27: Verdichtungsendtemperaturen des halbhermetischen NH₃-Verdichters

Begonnen wurden die Untersuchungen des halbhermetischen Ammoniak-Verdichters mit der experimentellen Ermittlung des Einsatzbereiches, der durch die maximal zulässige Verdichtungsendtemperatur von 140°C am Druckstutzen begrenzt ist. Neben der Temperatur am Druckstutzen wurden für diese Untersuchungen zusätzlich die Temperaturen an zwei der insgesamt vier Auslaßventile des Zylinders mit Hilfe von Thermoelementen gemessen. Die Ergebnisse sind im Bild 27 für Verdampfungstemperaturen von -10°C und Verflüssigungstemperaturen von 30°C bzw. 40°C in Abhängigkeit der eingestellten Überhitzung dargestellt.

Begonnen wurden die Versuche bei einer Verflüssigungstemperatur von 30°C und Überhitzungen zwischen 5 K und 20 K. Die Temperaturen am Druckstutzen waren mit 120°C bis 125°C sehr moderat. Die am Ventilsplatt gemessenen Temperaturen lagen um etwa 20 K höher. Eine Erhöhung der Verflüssigungstemperatur bei gleichbleibender Verdampfungstemperatur auf 40°C hatte eine deutliche Erhöhung der Verdichtungsendtemperaturen zur Folge. Die Verdichtungsendtemperaturen am Druckstutzen oberhalb von 140°C für Überhitzungen von 10 und 15 K und sind bereits als kritisch anzusehen. Auch die Temperaturen am Druckspalt befanden sich deutlich oberhalb von 160°C, die vom Hersteller des Schmierstoffes als dessen Belastungsgrenze ausgewiesen ist. Die Aufnahme eines Meßpunktes bei einer Überhitzung von 5 K war nicht mehr möglich, da der Elektromotor während dieser Messungen ausfiel. Als Grund ist ein Wicklungsschluß wahrscheinlich, die genaue Ursache wird derzeit beim Hersteller des Verdichters geprüft. Da innerhalb der noch zur Verfügung stehenden Zeit, die lediglich eine Woche betrug, kein Ersatzverdichter zur Verfügung gestellt werden konnte, wurden die Untersuchungen am halbhermetischen Ammoniak-Verdichter an dieser Stelle beendet. Eine Fortführung der Versuche sollte im Rahmen des anschließenden Forschungsvorhabens nach einer Untersuchung der Fehlerursache unternommen werden.

8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Sowohl der Einsatz von Aluminium in NH₃-Kälteanlagen [24], als auch der Einsatz des Kältemittels Ammoniak in diesem Anwendungsbereich sind nicht neu [3], wie es der Tabelle 7 zu entnehmen ist. Nachdem die sogenannten natürlichen Kältemittel im Laufe der Zeit durch die FCKW aus Kälteanlagen kleiner Leistung nahezu vollständig verdrängt worden sind, gewinnen im Zuge umfassenderer Betrachtungen zur Umweltverträglichkeit, die neben der Ozonproblematik vermehrt die direkten und indirekten Beiträge der Kältemittel zum Treibhauseffekt berücksichtigen, diese Kältemittel wie Kohlenwasserstoffe, CO₂ oder auch Ammoniak als mögliche Ersatzkältemittel wieder an Bedeutung.

Tabelle 7: Einsatz der verschiedenen Kältemittel im Jahr 1953 [3]

Jahr	Kältemittel	Industrielle Anlagen	Kleinkälteanlagen	Schiffskühlanlagen	Kühlschränke	Klimaanlagen
1953	NH ₃	80%	30%	10%	10%	15%
	SO ₂	3%	10%	-	45%	-
	CH ₃ Cl	-	15%	-	10%	5%
	C ₂ H ₅ Cl	-	5%	-	10%	5%
	CO ₂	12%	10%	60%	-	-
	FCKW	-	30%	25%	25%	70%
	H ₂ O	5%	-	-	-	8%
	Luft	-	-	5%	-	-

Am Institut für Kältetechnik und Angewandte Wärmetechnik der Universität Hannover (IKW) wurden dazu im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Untersuchungen zum wirtschaftlichen Einsatz des Kältemittels Ammoniak in Kälteanlagen kleiner Leistung unter Einsatz neuartiger Technologien und moderner Apparate durchgeführt. Dazu wurde eine Versuchsanlage mit einer Kälteleistung von 10 kW erstellt, in der neben den sonst üblichen Stahlwerkstoffen Rohre aus Aluminium verwendet wurden, die sich ähnlich den in der Kältetechnik üblichen Kupferrohren handhaben lassen. Neben dem Werkstoff Aluminium konnten als neuartige Verbindungstechniken für Ammoniak-Kälteanlagen insbesondere hermetisch dichte Lötverbindungen sowie Bördel- und einige Spezialverschraubungen für Aluminiumrohre erfolgreich getestet werden.

Mit Hilfe eines ammoniaklöslichen Schmierstoffes wurden Untersuchungen zur Trockenexpansionsverdampfung in einem Plattenwärmeübertrager durchgeführt. Dazu wurde ein Apparat in geschraubter Ausführung mit einer geringen Plattenanzahl, in dem keine zusätzlichen Maßnahmen zur Kältemittelverteilung notwendig war, und einer schmalen, länglichen Bauform derart modifiziert, daß der letzte vom Kältemittel Ammoniak durchströmte Kanal vollständig einsehbar war. Unter Verwendung eines handgeregelten Expansionsventils konnte mit diesem Versuchsaufbau ein stationärer Anlagenbetrieb bei moderaten Überhitzungen zwischen 5 und 10 K erzielt werden.

Neben dem Einsatz vermehrt nicht lösbarer Verbindungen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Verringerung des Leckagerisikos von dem deutschen Verdichterhersteller Bock Kältemaschinen der Prototyp eines halbhermetischen Ammoniak-Verdichters entwickelt und gefertigt. Für die Untersuchungen und die Leistungsmessungen an diesem Verdichter wurde ebenfalls unter Verwendung des Werkstoffes Aluminium am IKW ein Kalorimeterprüfstand entsprechend den Anforderungen nach DIN 8977 mit einem Sekundärflüssigkeitskalorimeter als Verdampfer für Kälteleistungen bis 30 kW aufgebaut. Als Sekundärflüssigkeit wurde das Kältemittel R227ea verwendet. Die Funktionsfähigkeit des Prüfstandes wurde zunächst durch Messungen an einem offenen Verdichter belegt.

Der semihermetische Verdichter wurde unter Berücksichtigung der hohen Verdichtungsendtemperaturen, die aufgrund des steilen Verlaufes der Isentropen von Ammoniak auftreten, mit einer externen Luftkühlung ausgestattet, die mit Hilfe eines Ventilators mit separatem Antriebsmotor realisiert wurde. Dadurch konnte eine weitere Aufheizung des Dampfes bereits vor dem eigentlichen Verdichtungsprozeß durch die Abwärme des Antriebsmotors bei der sonst üblichen Sauggaskühlung, die für viele halogenierte Kältemittel energetische Vorteile besitzt, für das Kältemittel Ammoniak aber eine zusätzliche Einschränkung des Anwendungsbereiches vom halbhermetischen NH₃-Verdichter darstellen würde, vermieden werden. Zum Schutz der Kupferwicklungen des Motors vor dem Ammoniak wurde ein neuartiges, technisch aufwendiges Verfahren gewählt, bei dem die Wicklungen mit Hilfe eines ammoniakresistenten Materials dicht vergossen wurden. Gegenüber den bislang üblichen Ausführung des Elektromotors mit einem Spaltrohr oder mit Aluminiumwicklungen verspricht dieses Konzept einen höheren Motorwirkungsgrad und somit letztlich einen geringeren Energieaufwand.

Die Untersuchungen des halbhermetischen Verdichters wurde mit der Bestimmung dessen Einsatzgrenzen begonnen. Dabei kam es zum Ausfall des Verdichtermotors. Da innerhalb der Projektlaufzeit kein Ersatzmotor zur Verfügung gestellt werden konnte, mußten die Versuche abgebrochen werden.

Da gerade zur Einführung von Kälteanlagen kleiner Leistung für das Kältemittel Ammoniak, das bereits in geringsten Konzentrationen vom menschlichen Geruchssinn wahrgenommen wird, eine vollständige Hermetisierung des Systems von entscheidender Bedeutung ist, sollte die Erprobung des halbhermetischen Verdichters am erstellten Kalorimeterprüfstand sowie dessen Weiterentwicklung im geplanten Anschluß-Forschungsvorhaben einen der Aufgabenschwerpunkte bilden. Mit dem Werkstoff Aluminium konnte bereits im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein erster Beitrag sowohl zur Senkung der Herstellungskosten als auch zur weiteren Hermetisierung durch die Einführung des in der Kältetechnik zur Verbindung üblichen Lötverfahrens auch für Ammoniak-Kälteanlagen geleistet werden. Die Verwendung eines nicht hygroskopischen Flußmittels sowie weiterführende Untersuchungen zum Materialverhalten von Aluminium in NH₃-Anlagen beispielsweise gegenüber Schwingungen sollen in einem separaten Forschungsvorhaben [1] untersucht werden, das an verschiedenen Forschungseinrichtungen in Hannover in Kürze begonnen wird.

Neben der Hermetisierung ist gerade für Ammoniak-Kälteanlagen kleinerer Leistung eine sichere und automatische Regelung der Direktverdampfung, die derzeit noch nicht verfügbar ist, von besonderer Bedeutung. Aufbauend auf die Ergebnisse der Untersuchungen zur trockenen Verdampfung im Plattenwärmeübertrager soll im geplanten Anschlußvorhaben in Zusammenarbeit mit einem der führenden Hersteller eine entsprechende Regelung- und Steuerungstechnik entwickelt und erprobt werden. Damit wäre eine praktische Umsetzung der erzielten Ergebnisse möglich, die durch Feldversuche bei Einsatz unter realen Bedingungen bestätigt werden soll.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AiF-Forschungsvorhaben: Untersuchung des Einsatzes von Aluminium als Werkstoff für Rohre in Kaltdampf-Kompressionskälteanlagen mit dem Kältemittel Ammoniak. Durchgeführt an den Instituten für Thermodynamik und Werkstoffkunde der Universität Hannover und dem Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen, Hannover, 1996.
- [2] Ammoniak-Träume werden wahr - Hermetische Ammoniak-Flüssigkeitskühlanlage für Klima- und gewerbliche Kältetechnik. *kk* 2(1991), S. 110-122.
- [3] M. Bäckström: Kältetechnik. 1. Auflage. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1953.
- [4] Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten: Unfallverhütungsvorschrift (VBG20) "Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen" in der Fassung vom 01. Januar 1993.
- [5] W. Bock: NH₃-lösliche Kältemaschinenöle. *ki* 7 (1994), S. 330-333.
- [6] F.V. Boldvig: Ammonia as Refrigerant. International Institute of Refrigeration, Paris 1993.
- [7] DIN 8977: Entwurf zur Leistungsprüfung von Kältemittelverdichtern (ISO 917). Beuth-Verlag Berlin, 1992.
- [8] DIN 43710: Elektrische Temperaturnaßnehmer, Grundwerte der Thermospannung für Thermopaare Typ U und Typ L. Beuth-Verlag Berlin, 1985.
- [9] Deutsches Umweltbundesamt: Umweltforschungskatalog 1992. 9. Auflage. Erich Schmidt Verlag Berlin, 1992.
- [10] H. Dölz, D. Otto: Ammoniak-Verdichter-Kälteanlagen. Band 1. Verlag C.F. Müller Karlsruhe, 1992.
- [11] Fuchs Mineralölwerke GmbH: Reniso Kältemaschinenöle. Technische Mitteilung N.12D, 1992.
- [12] Gebrüder Sulzer AG: Verfahren zum Betreiben einer NH₃-Kälteanlage oder -Wärmepumpe. Europäische Patentanmeldung, Anm.-Nr.: 918100887-9, November 1991.
- [13] A. Görlitz: Gefrierstraße mit Horizontal-Platten-Gefrierapparaten. *ki* 7(1994), S. 338-340.
- [14] L. Grunberg, A. H. Nissan: Mixture law for viscosity. *Nature* 164 (1949), S. 799-800.
- [15] Guidelines for the Use of Ammonia With Food and Chemicals. 6th Edition Aluminium Association USA, 1994.
- [16] U. Hesse: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Eigenschaften binärer und ternärer Öl-Kältemittel-Gemische. DKV-Forschungsbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 29, 1989.
- [17] I. Heyer, G. Trenkowitz, H. Wulf: Entwurf, Bau und sicherheitstechnische Untersuchung eines Flüssigkeitskühlers mit dem Kältemittel NH₃ (R717) für eine Kälteleistung von ca. 350 kW. DKV-Statusbericht Nr. 10, 1992.

- [18] W. Hufnagel: Aluminiumtaschenbuch. 14. Auflage, Aluminiumverlag Düsseldorf 1983.
- [19] H. Kaiser: Ammoniak-Verdichter mittlerer und kleinerer Leistung. Dresdner Kolloquium "Neue Wege zum Arbeitseinsatz in der Kältetechnik", ILK Dresden, 1995.
- [20] M. Kauffeld: Aluminium in der Kälte- und Klimatechnik. ki 10(1994), S. 488-492.
- [21] H. Kruse: Grundlagen der Kälte- und Wärmepumpentechnik. Teil 1. Skriptum zur Vorlesung. Universität Hannover, Mai 1992.
- [22] H. Kruse: Untersuchungen von Schmierstoffen auf Löslichkeit und Anlagenverhalten mit Ammoniak. Abschlußbericht des AiF-Forschungsvorhabens Nr. 161D, Hannover, 1993.
- [23] V. Lampugnano, N. Kawamura: New Approaches to Ammonia System Designs. IIR 15th Annual Meeting in Vancouver, Canada, March 1993.
- [24] G. Lenk: Aluminiumrohre für Wärmeaustauscher. Aluminium 30 (1954) 8/9, S. 346-354.
- [25] G. Lorentzen: Ammoniak, eine hervorragende Alternative. ki 12(1991), S. 500-504.
- [26] D. Mosemann: Ammoniak, ein Substitut für R22? kk 2 (1992), S.73-82.
- [27] O.M. Nesje: Ammonia in Small Refrigeration Plants, System Design - Practical Experience. International Conference of the IIR Commission B2 in Hannover, Mai 1994.
- [28] NH₃-lösliches Öl ermöglicht Trockenexpansion und Füllmengenreduzierung. kk 11(1992), S. 868-874.
- [29] O.R. Nielsen, J. Nyvad, L.B. Moller, G. Minds: Demands on and Development of Small Ammonia Plants for Direct and Indirect Cooling. International Conference of the IIR Commission B2 in Hannover, Mai 1994.
- [30] M. Nötlichs: Druckbehälterverordnung. Ergänzender Kommentar und Textsammlung. Erich Schmidt Verlag Berlin, 1989.
- [31] A. Reinhart: Ammoniak in Kältesätzen. Ammoniak als klassisches Kältemittel. ki 11(1992), S. 434-436.
- [32] J.G. Romijn: An Oil-Free Refrigeration Plant. 17th International Congress of Refrigeration, Wien 1987.
- [33] J. Venner, P. Jung: NH₃-Flüssigkeitskühler. ki 3 (1992), S.74-76.
- [34] E. Wagemann: Trends bei Kälteanlagen mit Ammoniakfüllung. Verfahrenstechnik 25 (1991) 4, S. 74-75.
- [35] E. Wobst, B. Otto: Sicherheit von Ammoniak-Kälteanlagen: - Erfassung und Bewertung von Vorschriften sowie die Zusammenstellung von Anwendungsgrenzen. Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 9404b, Heft 1, Forschungsrat Kältetechnik e.V., Frankfurt/Main 1994.