

## Verbindungstechnologien in Kälteanlagen

# Aluminiumrohre in Ammoniak-Kälteanlagen

Michael Schmitz und Dirk Gebhardt, Hannover

Die Verwendung des umwelt-schonenden Kältemittels Ammoniak ( $\text{NH}_3$ , R 717) war bis vor kurzem fast ausschließlich Kälteanlagen großer Leistungen vorbehalten. In diesen Anlagen ist das vorherrschende Material für die mit dem Kältemittel in Kontakt geratenden Bauteile der Werkstoff Stahl. Kostengünstige Fertigungsverfahren, wie sie bei Kälteanlagen mit den vorwiegend verwendeten halogenierten Kohlenwasserstoffen angewendet werden, müssen insbesondere bei Ammoniak-Kälteanlagen kleiner und mittlerer Leistung eingesetzt werden, um bei dem starken Preisdruck im Kälteanlagenbau konkurrenzfähig zu sein.

Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, bieten Aluminiumlegierungen, da diese von Ammoniak nicht angegriffen werden und den Einsatz ähnlicher Verbindungstechniken wie bei halogenierten Kohlenwasserstoffen mit dem Werkstoff Kupfer ermöglichen.

Das Forschungsvorhaben „Aluminium in Ammoniak-Kälteanlagen“ des Forschungsrates Kältetechnik e. V. [1], das gemeinsam am *FKW*-Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH Hannover sowie dem Institut für Werkstoffkunde (IW) und dem Institut für Thermodynamik (IfT) der Universität Hannover durchgeführt wurde, hatte zum Ziel, Grundlagen für den Einsatz von Aluminium in Ammoniak-Kälteanlagen zu schaffen. Im Teilvorhaben „Verbindungstechnologien“ des *FKW* wurden die im Kälteanlagenbau üblicherweise verwendeten Kupferrohrverbindungen auf Aluminiumrohre übertragen und diese Anwendung für Ammoniak-Kälteanlagen beurteilt. Dazu wurde die Alterungsbeständigkeit von Verbindungstechnologien für Aluminiumrohre in Ammoniak-Kälteanlagen untersucht.

## zu den Autoren

**Dipl.-Ing. Michael Schmitz,**

wissenschaftlicher Mitarbeiter im *FKW* – Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Hannover



**Dipl.-Ing. Dirk Gebhardt,**

wissenschaftlicher Mitarbeiter im *FKW* – Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Hannover



Um die Alterung der Prüflinge zu simulieren, wurde am *FKW* eine Ammoniak-Versuchskälteanlage gebaut, in der die ausgewählten Rohrstreifen während 10 000 Zyklen mit einer Dauer von ca. 10 Minuten abwechselnd hohen Drücken und Temperaturen der Heißgasseite und niedrigen Drücken und Temperaturen der Verdampferseite ausgesetzt wurden. Während der gesamten Prüfung im Temperaturwechselstand standen die

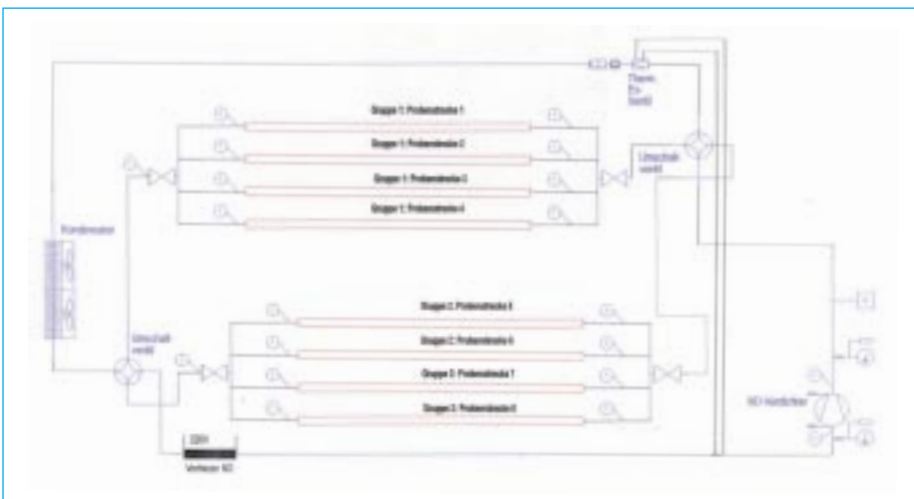


Bild 1 Schema des Kältemittelkreislaufes für den Wechselfestigkeitsprüfstand

Bild 2 Position der Probenstrecken im Wechselfestigkeits-Prüfstand



Proben mit dem Kältemittel Ammoniak und dem eingesetzten Kältemaschinenöl in Kontakt. Die Zuverlässigkeit der Rohrverbindungen im Prüfstand sowie die Dichtigkeit der gealterten Proben im Vergleich zu neuen Prüflingen wurden vom *FKW* untersucht. Ebenso wurden die mechanischen Eigenschaften der gealterten Prüflinge am Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover (IW) im Vergleich zu neuen Prüflingen untersucht.

### Temperaturwechselfestigkeits-Prüfstand

Zur Realisierung der angestrebten hohen Druck- und Temperaturwechsel mit dem Kältemittel Ammoniak wurde die in Bild 1 schematisch dargestellte Versuchsanlage ausgeführt. Für die Versuchsanlage wurde ein Zweizylinder-Hubkolbenverdichter offener Bauart vom Typ Bock F2-NH<sub>3</sub> mit 121 cm<sup>3</sup> Hubvolumen verwendet.

In der Versuchsanlage wird das flüssige Ammoniak über ein thermostatisches Expansionsventil auf Verdampfungsdruck entspannt und der als Verdampfer geschalteten Gruppe von 4 Probenstrecken zugeführt. Nach der Verdichtung wird das Heißgas der zweiten Probengruppe zugeführt, so daß diese der hohen Temperatur bei Hochdruck ausgesetzt wird. Nach Verlassen der Probengruppe 2 wird das Ammoniak wiederum im luftgekühlten Kondensator verflüssigt. Der Wechselfestigkeitsprüfstand ist somit zur Aufnahme von insgesamt acht Rohrsegmenten ausgelegt (Bild 2), von denen je vier parallel erwärmt bzw. abgekühlt werden können.

Zur wechselnden Beaufschlagung der jeweils vier Rohrsegmente wurden zwei Umschaltventilgruppen in die Anlage eingebaut. Diese Umschaltventilgruppen, die prinzipiell die Funktion eines Vier-Wege-Kreislauf-Umkehrventils haben, wurden aus einzelnen Magnetventilen durch eine entsprechende Anordnung von Ventilen

mit Normal Open (NO)- bzw. Normal Close (NC)-Funktion sowie dem Einsatz von Rückschlagventilen zusammengestellt, wie es im Bild 3 dargestellt ist. Die Dauer der jeweiligen Warm/Kalt-Zyklen konnte mit Hilfe eines Zeitrelais eingestellt werden.

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit und zur Überwachung eines einwandfreien Betriebes wurde der Wechselfestigkeitsprüfstand mit der notwendigen Meßtechnik ausgerüstet. Sowohl der Hochdruck, der durch ein Überströmventil eingestellt werden kann, als auch der Niederdruck, der mit Hilfe eines Verdampfungsdruckreglers konstant gehalten werden kann, wurden mit Hilfe von Druckaufnehmern bestimmt. Die Temperaturen am Ein- und Austritt des Verdichters und

am Ein- und Austritt der zu prüfenden Rohrsegmente wurden mit Hilfe von NiCr/Ni-Thermoelementen erfaßt. Alle Signale wurden von einer rechnergestützten Meßwerterfassung aufgezeichnet. Parallel zu den Meßwerten wurde die Anzahl der Betriebsstunden sowie die Anzahl der Warm/Kalt-Zyklen separat elektronisch erfaßt und angezeigt.

### Untersuchte Verbindungen

Parameter der Versuchsmatrix für die Wechselfestigkeitsuntersuchungen von Rohrverbindungen waren

- Art der Rohrverbindung,
- Art der Aluminiumlegierung und
- Art der Werkstoffpaarung.

Die im Rahmen der Untersuchungen ausgeführten Rohrverbindungen sind schematisch in Tabelle 1 zusammengestellt. In den Korrosionsuntersuchungen von Al-Legierungen in Ammoniak/Öl-Atmosphäre des IW wurden die Legierungen AlMn1 und AlMg1 als gut korrosionsbeständig bewertet [1, Heft 1]. Beide Legierungen sind als Rohr verfügbar. Bevorzugt wurde die Legierung AlMn1 eingesetzt, da sie bei den Korrosionsuntersuchungen insgesamt ein positiveres Verhalten erbracht hatte. Es wurden grundsätzlich Rohre Ø 12 × 1 mm verwendet. Als Verbindungsart wurde insbesondere die Lötverbindung betrachtet. Bezüglich der Werkstoffpaarung wurden

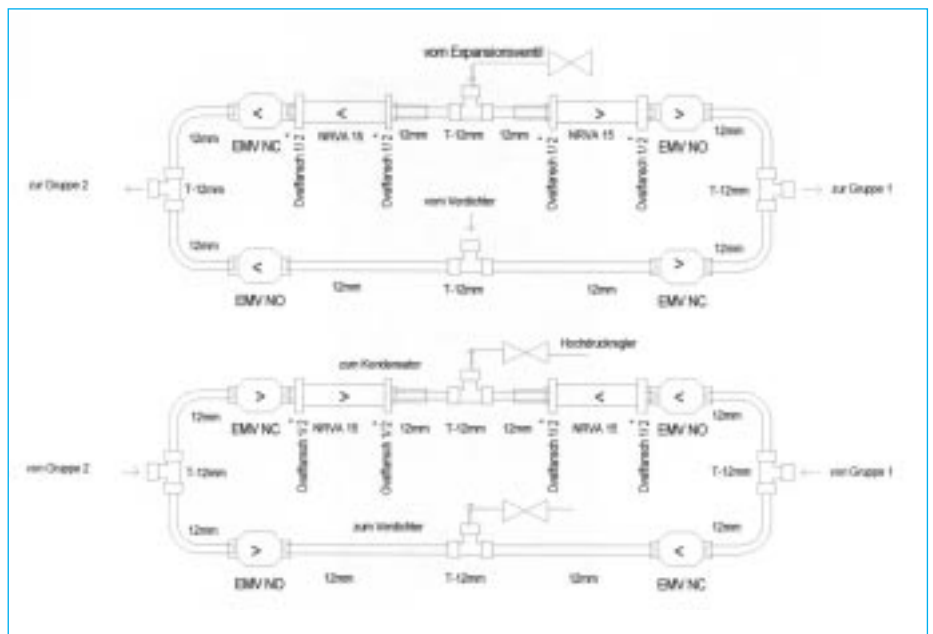


Bild 3 Schematische Darstellung der Umschaltventilgruppen

Lötverbindungen sowohl von Aluminium mit Aluminiumrohren als auch Aluminium mit Stahlrohren untersucht. Als Stahl wurde generell ein austenitischer Edelstahl 1.4571 (V4A) verwendet. Dieser Stahl weist zum einen das größte Korrosionspotential gegenüber Aluminium auf, so daß die Gefährdung dieser Werkstoffpaarung durch Kontaktkorrosion am geringsten ist. Zum anderen ist er durch die entsprechende Legierung gegen Kornzerfall beim Löten geschützt. Zur Fertigung der Lötverbindungen wurde das vor allem zum Aluminium-Flammlöten von Hand häufig eingesetzte Hartlot AlSi12 (Schmelzintervall 575 °C bis 590 °C) verwendet. Als Flußmittel kam das nicht hygroskopische NOKOLOK Flux der Solvay Fluor und Derivate GmbH zum Einsatz.

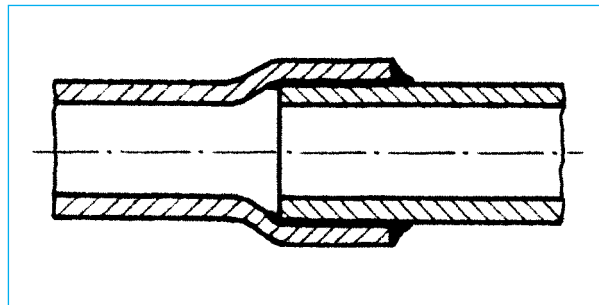
Für die weiteren Verbindungen wurden lediglich Paarungen aus Aluminium und Stahl untersucht. Im Hinblick auf die Aluminium-Stahl-Verbindung war die Untersuchung von Klemmverbindungen (Vulkan LOKRING) von praktischem Interesse. Um ebenso eine lösbare Rohrverbindung in das Versuchsprogramm aufzunehmen, wurde die 90°-ORFS (O-Ring Face Sealed)-Verschraubung (Parker O-Lok) gewählt. Als besondere Verbindungsart wurden neben den Rohrverbindungen die Einwalzverbindung von Rohren in Rohrböden untersucht. Die Einwalzverbindungen wurden bei der Sulzer-Escher Wyss GmbH gefertigt.

### Untersuchte Kältemaschinenöle

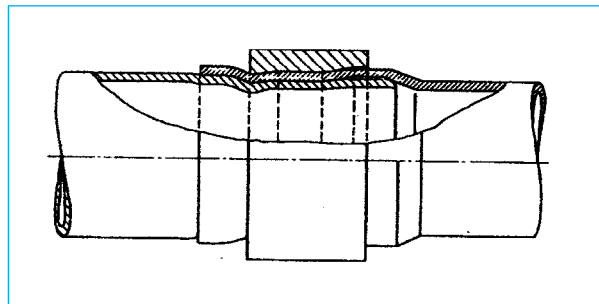
Als weiterer Parameter für die Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens wurde im Vorfeld das zu verwendende Kältemaschinenöl definiert. In Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuß wurden zwei in das Vorhaben einzubeziehende Kältemaschinenöle der Fuchs DEA GmbH für Ammoniak festgelegt. Es wurden das Polyglykol-Öl RENISO PGP 70 als mit Ammoniak teillösliches Öl und das nicht lösliche Alkylbenzol RENISO SP 68

gewählt. Da die vom Institut für Werkstoffkunde durchgeführten Korrosionsuntersuchungen an Aluminiumlegierungen ergaben, daß das Polyglykol aufgrund seiner Löslichkeit und Polarität einen stärkeren Beitrag zu Korrosionserscheinungen liefert [1, Heft 1] und dieses teillösli-

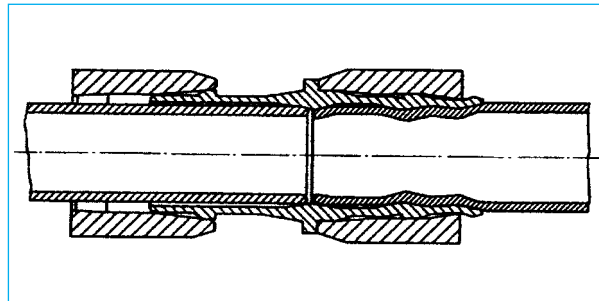
che Öl anwendungstechnisch vorteilhaft ist, wurden die Temperaturwechselfestigkeits-Untersuchungen vorwiegend mit diesem Öl durchgeführt (Versuchsreihe 1 und 2). In Versuchsreihe 3 wurden Referenzuntersuchungen mit dem Alkylbenzol durchgeführt.



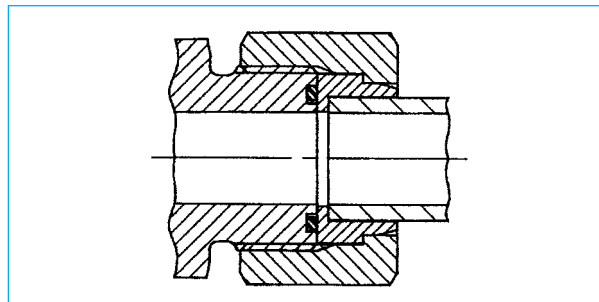
Lötverbindung  
Lot: AlSi12  
Flußmittel:  
Solvay Nocolok Flux



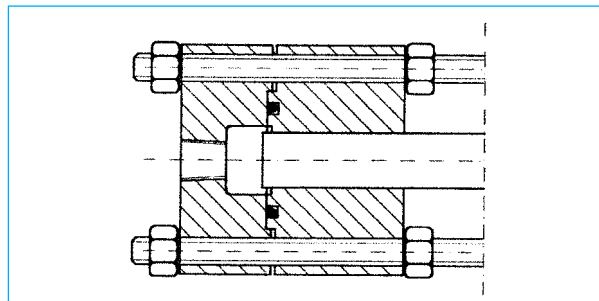
Klemmring (Ein-Ring)  
(Vulkan Lokring)  
Dichtmittel:  
Vulkan Lokprep 61



Klemmring (Kupplung)  
(Vulkan Lokring)  
Dichtmittel:  
Vulkan Lokprep 61



90°-ORFS-Verschraubung  
(Parker O-Lok)



Einwalzverbindung  
Dichtmittel: Loctite 640

Tabelle 1 Untersuchte Verbindungen

Versuchsreihe	1	2	3
Öl	RENISO PGP 70	RENISO PGP 70	RENISO SP 68
Verbindungen der Probestrecken	1) Flammlötung AlMn1/AlMn1 2) Flammlötung AlMn1/St 1.4571 3) Lokring Ein-Ring AlMn1/St 1.4571 4) Lokring Kupplung AlMn1/St 1.4571	1 u. 2) Einwalzverbindungen AlMn1/St 37 3) Flammlötung AlMg1/AlMg1 4) 90°-ORFS-Verschraubung AlMn1/St 1.4571	1) Flammlötung AlMn1/AlMn1 2) Flammlötung AlMg1/AlMg1 3) Flammlötung AlMn1/ St 1.4571 4) Lokring Ein-Ring AlMn1/St 1.4571

Tabelle 2 Durchgeführte Versuchsreihen

### Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden drei Versuchsreihen mit jeweils acht Rohrstrecken durchgeführt (Tabelle 2). Diese Rohrstrecken enthielten jeweils zwei bis drei der ausgewählten Verbindungen. Als Betriebsbedingungen wurde eine Wechselbelastung der Probestrecken zwischen den Prüftemperaturen -20 °C und 130 °C und den Prüfdrücken 1 bar (Verdampfungstemperatur NH<sub>3</sub> t<sub>0</sub> = 33 °C) und 18 bar (Kondensation bei t<sub>c</sub> = 45 °C) eingestellt. Während der Versuchsreihe wurden die Probestrecken einem Temperatur-/Druckwechsel von 10 000 Zyklen unterworfen, wobei die Zyklendauer 10 Minuten betrug. Diese Schaltzeit des Versuchsstandes von zunächst 5 Minuten wurde in Abhängigkeit vom Betriebsverhalten der Anlage, d. h. der zu erreichenden Probestemperatur, angepaßt. In Bild 4 und 5 sind hier beispielhaft der Temperatur- bzw. der Druckverlauf der beiden im Wechsel geschalteten Probestrecken des ersten Versuches für eine Dauer von etwa 3 Zyklen wiedergegeben.

Die im Prüfstand gealterten Proben wurden zur werkstoffkundlichen Untersu-

chung (Zugversuch, Metallographie) an das Institut für Werkstoffkunde übergeben. Zudem wurden von allen Verbindungstechniken des Versuchsprogramms jeweils mehrere Prüflinge angefertigt, die im ungealterten Zustand im Zugversuch

und metallographisch untersucht wurden. Alle Proben wurden nach der Herstellung vom FKW mit Hilfe eines Helium-Lecksuchers einer Helium-Dichtigkeitsprüfung unterzogen, die für die im Wechselfestigkeits-Prüfstand eingesetzten Proben anschließend wiederholt wurde.

### Dichtigkeit der Verbindungen

Der Vakuum-Lecktest im ungebrauchten Zustand ergab für alle im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Rohrverbindungen eine Helium-Leckrate von 10<sup>-8</sup> mbar · l/s. Dies entspricht einer auf die Betriebsbedingungen einer Ammoniak-Kälteanlage umgerechnete Ammoniak-Leckrate von weniger als 1 g/a. Während der Temperatur- und Druckwechsel-Belastung im Prüfstand wurden bei 7 der 16 eingesetzten LOKRING-Klemmring-Verbindungen Un-

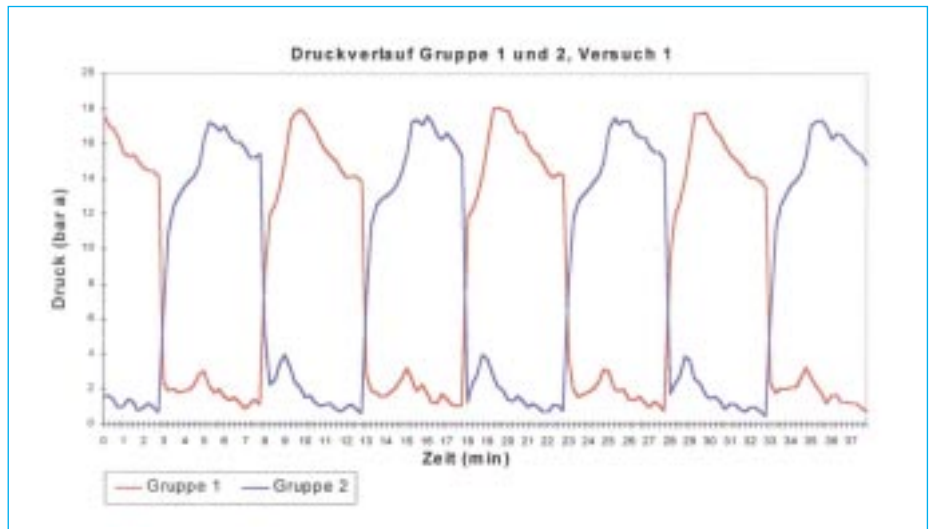


Bild 5 Druckverlauf während Versuch 1 (Ausschnitt)

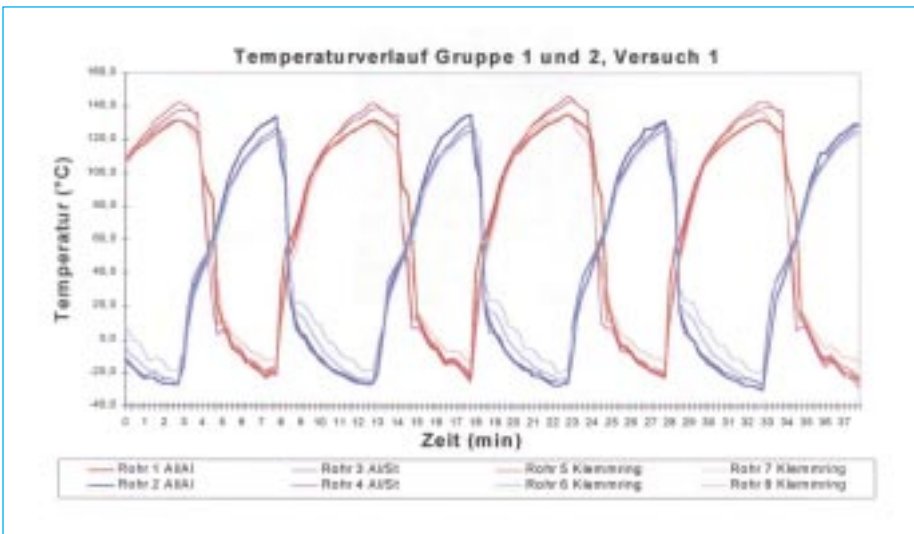
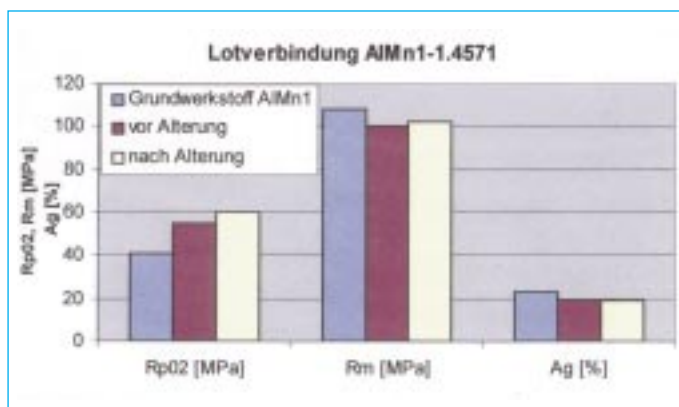


Bild 4 Temperaturverlauf während Versuch 1 (Ausschnitt)

dichtigkeiten in Form von Ölaustritt beobachtet. Alle anderen Rohrverbindungen blieben im Verlauf der Wechselbelastung dicht. Die Undichtigkeiten der Klemmring-Verbindungen entstanden durch die Wärmedehnung während des Temperaturwechsels, so daß sich die gefügten Teile der Verbindung relativ zueinander bewegten. Nach dem Temperaturengleich blieben die LOKRING-Verbindungen jedoch dicht, so daß kein dauerhaftes Leck mit stetem Kältemittelaustritt beobachtet wurde. Der Lecktest der Rohrverbindun-

Bild 6 Mechanische Eigenschaften der Lotpaarung AlMn1-1.4571



gen im gebrauchten Zustand ergab grundsätzlich wie die Voruntersuchung im ungebrauchten Zustand wiederum eine auf Betriebsbedingungen umgerechnete Ammoniak-Leckrate von weniger als 1 g/a. Eine Ausnahme stellte eine unbrauchbar gewordene Klemmring-Kupplungs-Verbindung dar.

### Mechanische Eigenschaften der Verbindungen

Die am Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover durchgeführten metallographischen Untersuchungen haben gezeigt, daß die Lötungen durch die Temperaturwechselbelastung in ihren Haftungseigenschaften und in der Werkstoffstruktur unverändert blieben [1, Heft 1]. Als mechanische Kennwerte wurden die Spannungen 0,2-Dehngrenze  $R_{p02}$  und Zugfestigkeit  $R_m$  sowie die Gleichmaßdehnung  $A_g$  (Dehnung bis zur Einschnürung in % der Anfangslänge) ermittelt. Bild 6 zeigt repräsentativ für die Lötverbindungen die Kennwerte der Lotpaarung AlMn1-1.4571. Die mechanischen Eigenschaften der Lötverbindungen und der O-Lok-Verbindungen sind vom Verhalten des Lotes abhängig, so daß sich diese dementsprechend nicht verändert haben. Bei den Verbindungen mit Klemmringen und der Einwalzverbindung sind die mechanischen Eigenschaften wie die Dichtigkeit der Verbindung maßgeblich von der Pressung der Kontaktflächen bestimmt. Die Ein-Ring-Verbindung (Bild 7) und die Einwalz-

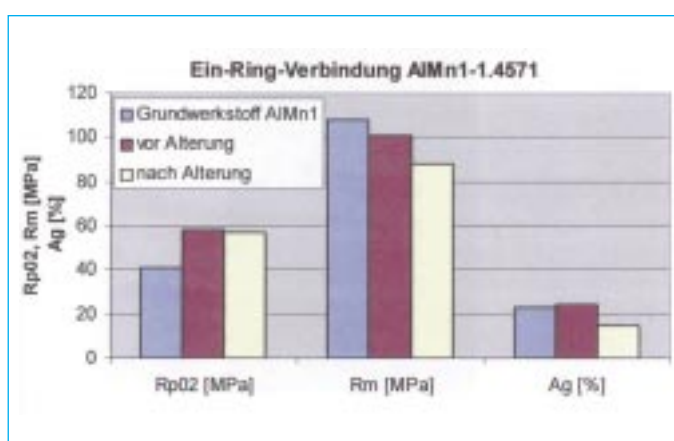


Bild 7 Mechanische Eigenschaften der Ein-Ring-Verbindung AlMn1-1.4571

verbindung mit jeweils einem Paarungspartner von hoher Festigkeit und hoher 0,2-Dehngrenze liefern auch nach der Alterung im Temperaturwechselfestigkeitsprüfstand zufriedenstellende mechanische Kennwerte. Die vorliegende Konstruktion der Kupplungsverbindung erfüllt nicht die gestellten Anforderungen.

### Zusammenfassung

In experimentellen Untersuchungen wurde die Beständigkeit von Aluminiumrohrverbindungen durch Lötten, Klemmringe, Verschraubungen sowie durch Einwalzen in Ammoniak-Kälteanlagen geprüft. Als geeignete Aluminiumlegierungen wurden AlMn1 und AlMg1 identifiziert. Jedoch kann bei Anwendung des hier benutzten Flußmittels ein Magnesiumanteil der Aluminiumlegierung von mehr als 0,5 % die Löteigenschaften negativ beeinflussen. Neben Verbindungen von Rohren dieser Legierungen wurde die Werkstoffpaarung mit Stahl untersucht. Für die Untersuchung wurde am *FKW* eine Ammoniak-Versuchskälteanlage gebaut, in der die Prüflinge während drei Dauerlaufversuchen durch eine wechselnde Belastung im Temperatur- und Druckniveau gealtert wurden.

Die Prüfung wurde mit einem Polyglykol- und einem Alkylbenzol-Öl für Ammoniak durchgeführt. Die Bewertung der Verbindungen wurde vom *FKW* zum einen anhand der Zuverlässigkeit im Prüfstand, zum anderen durch die Dichtigkeitsprüfung der ungebrauchten und der im Wechselfestigkeitsprüfstand gealterten Proben vorgenommen. Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Verbindungen fand am Institut für Werkstoffkunde statt. Die erzielten Ergebnisse zeigen, daß Aluminiumrohrverbindungen für den Einsatz in Ammoniak-Kälteanlagen durch Lötten, durch das sich auch lösbare Rohrver-

schraubungen fertigen lassen, und durch das Verfahren des Einwalzens dauerhaft zuverlässig hergestellt werden können. □

### Literatur

- [1] Untersuchung des Einsatzes von Aluminium als Werkstoff für Rohre in Kaldampf-Kompressionskälteanlagen mit dem Kältemittel Ammoniak, Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 10 798, Forschungsrat Kältetechnik e. V., Frankfurt 1999  
 Heft 1: Werkstoffauswahl, Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde  
 Heft 2: Verbindungstechnologien, Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, Hannover  
 Heft 3: Wärmeübertragung, Universität Hannover, Institut für Thermodynamik  
 Das Forschungsvorhaben (AiF-FV-Nr. 10 798) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.