

## Was Sie über polarisierte Additive für Kältemaschinenöle wissen sollten

**Polarisierte Additive für Kältemaschinenöle (PROA) erhöhen den Leistungsgrad von Wärmeübertragern, verringern den Verschleiß der Anlage und sparen so Energie- und Anlagenkosten. Auf den Metallteilen wird eine Schutzschicht gebildet, die die Schmierung verbessert und die Teile vor Reibungsverlusten schützt.**

Die beiden bedeutendsten Vorteile beim Einsatz von PROA sind ein verbesserter Wärmeübergang im Verdampfer und den Kühlschlangen sowie eine verbesserte Schmierfähigkeit des Kältemaschinenöls. Weiterhin gibt es verschiedene andere Vorteile, die die Lebensdauer der Anlage verlängern können. Obwohl es schwierig ist, Energieeinsparungen aus einer speziellen Anwendung abzuschätzen, weisen die Praxis-Berichte allgemein eine positive Tendenz auf und z. Z. durchgeführte unabhängige Labor- und Feldversuche sollen weiterhin verbesserte Daten ergeben. Die einzigen offensichtlichen Hindernisse für eine rasche Einführung der PROA-Technologie sind die Akzeptanz bei den Anwendern und die richtige Zugabe in das System.

### Technologischer Ausblick

Diese spezielle Gruppe von Additiven enthält ein polarisiertes Molekül. Das polarisierte Molekül hat eine starke Affinität zu Metall und bedeckt metallische Oberflächen im Verdichter mit einer monomolekularen Schicht. Diese Schicht verbessert nicht nur die Ölschmierung der beweglichen Teile im Verdichter, sondern verdrängt auch im Verflüssiger und den Verdampferschlangen angesammeltes Kältemaschinenöl, wodurch der Wärmeüber-

gang der Wärmeübertrager verbessert wird. Diese Ölsammlungen in den Schlangen des Wärmeübertragers verursachen die stärkste Reduzierung des Wärmeüberganges einer Anlage.

Die PROA-Technologie wurde als Ergebnis 20jähriger Forschungsarbeiten und zehnjähriger Versuchsarbeiten von drei Wissenschaftlern entwickelt. 1990 erhielten Charles Wilkins, Jack Hammack und Charles Thompson das US-Patent 4,963,280.

Die PROA-Technologie kann gefahrlos in Klimaanlage, Wärmepumpen, Kälteanlagen und Gefriergeräten eingesetzt werden. Weiterhin kann sie zur Anwendung kommen in Schraubenverdichtern, hermetischen und semihmetischen Hubkolbenverdichtern, Scrollverdichtern und Turbo-Kaltwassersätzen. Nicht anwendbar ist die Technologie bei Absorptions-Kaltwassersätzen. PROA kann in Kälte- und Klimaanlage aller Größen eingesetzt werden.

Um zu verstehen, wie PROA funktioniert, muß man einen kurzen Blick auf

den Aufbau eines Wärmeübertragersystems werfen. Die Kälteleistung wird durch den Einsatz eines komprimierbaren Fluides, das Wärme von einer Stelle zur anderen transportiert, erzeugt. Während des Expansions- und des Verflüssigungsvorganges wird die Wärme über eine Kupferspule (oder ähnliches Metall) aufgenommen bzw. abgegeben. Kälteanlagen enthalten ebenfalls ein Schmieröl, das ununterbrochen im Verdichter umläuft und dort die beweglichen Teile schmiert. Es kommt häufig vor, daß Öl aus dem Verdichterbereich entweicht und zusammen mit dem Kältemittel in andere Anlagenteile eindringt. Das mit dem Kältemittel transportierte Öl gelangt vom Verdichter in den Verflüssiger und den Verdampfer, wo es sich an den metallischen Oberflächen der Innenseite der Wärmeübertragerschlangen anlagert und so zu einer Isolierung derselben führt. Die Folge ist ein reduzierter Wärmeübergang, der wiederum die Leistungsfähigkeit verringert und die für einen gleichblei-

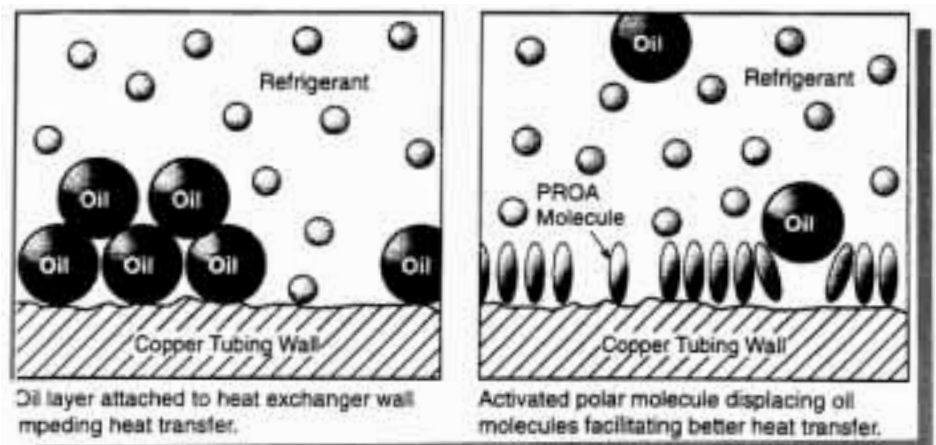


Abb. 1 Verhalten von PROA-Molekülen.

Linkes Bild: Ölschicht am Wärmeübertrager behindert Wärmeübergang.

Rechtes Bild: Polarisierte Moleküle verdrängen Ölmoleküle und ermöglichen einen besseren Wärmeübergang. – Kältemittel, – Öl, – PROA-Moleküle, – Kupferrohr.

benden Wärmeübergang notwendige Betriebszeit erhöht.

Die Zugabe von PROA zum Kältemaschinenöl im Verdichter setzt ein Olefin-Molekül – ein chloriertes Paraffin – zu, das im flüssigen Zustand bleibt, während es mit dem Kältemaschinenöl in der Anlage zirkuliert. Das polarisierte Molekül wird in einer vollgelösten Öl-basis (ohne Feststoffe) transportiert, die mit dem Kältemaschinenöl gut mischbar ist. Jedes Molekül besitzt einen negativ geladenen Bereich und versucht, sich an die metallischen Oberflächen in der Kälteanlage anzulagern. Dieses Molekül verdrängt andere Moleküle einschließlich Verunreinigungen, Rußablagerungen und Öl und bildet dann eine dünne Schicht auf dem Metall. Da die polarisierten Moleküle untereinander keine Affinität besitzen, entsteht lediglich eine monomolekulare Schicht. Abb. 1 zeigt eine Darstellung dieses Vorgangs.

### Vorteile

Die beiden bedeutendsten Vorteile des Einsatzes von PROA sind ein verbesserter Wärmeübergang im Verdampfer und den Kühlschlangen sowie eine verbesserte Schmierfähigkeit des Kältemaschinenöls. Diese führen zu weiteren Vorteilen:

- Erhöhte volumetrische Kälteleistung. Eine stabile Schutzschicht auf allen beweglichen Teilen verbessert die Abdichtung zwischen denselben und verringert die Leckagen entlang des Kolbenhemdes und durch die Ein- und Auslaßventile.
- Verringerte Laufzeit. Durch eine Verbesserung der Wärmeübergangsrate im Verdampfer und Verflüssiger wird die Anlagenleistung erhöht. Bei einer erhöhten Leistung benötigt der Verdichter eine geringere Laufzeit zur Bereitstellung desselben Wärmeübergangs und spart so Energiekosten.
- Reduzierte mechanische Reibung. Durch die Schutzschicht auf den metallischen Oberflächen der beweglichen Teile des Verdichters wird die mechanische Reibung zwischen den Teilen reduziert. Eine verbesserte Schmierung verringert den Verschleiß der Teile und den anfallenden Wärmeüberschuß.
- Verlängerte Lebensdauer der Anlage. Verringerung der mechanischen Reibung, des Verschleißes der beweglichen Teile und des Wärmeüberschusses tragen zur Verlängerung der Anlagenlebensdauer bei.

● Ruhigerer Betrieb. Feldversuche haben gezeigt, daß der Einsatz von PROA häufig einen glatteren, ruhigeren Betrieb der Anlage mit sich bringt.

### Zugabe des PROA

Die Zugabe des PROA ist einfach; die Beachtung einiger Vorsichtsmaßnahmen erhöht die Effektivität erheblich. PROA sollte immer von einem geprüften Fachmann gehandhabt werden, um ein unbeabsichtigtes Entweichen von Kältemittel in die Atmosphäre zu vermeiden.

#### Inspektion der Anlage vor Einsatz von PROA

Ein qualifizierter Techniker sollte vor der Zugabe von PROA in eine Kälteanlage eine Standard-Wartung durchführen. Bei dieser Inspektion sollte sichergestellt werden, daß folgende Bedingungen vorliegen:

- Verdichtungsdruck und Saugdruck liegen innerhalb der Auslegungsgrenzen
- Kein Öl und keine Kältemittelleckagen in der Anlage
- Saubere Leitungen und Filter
- Ordnungsgemäße Funktion von Thermostaten oder Regelsystemen
- Die Berippung des Wärmeübertragers ist frei von Staub, Verunreinigungen und Korrosion.

Diese Überprüfung vor der Zugabe von PROA ist wichtig, da all diese Punkte die Anlagenleistung beeinflussen. Zusätzlich ist es wichtig, eine ordnungsgemäße Funktion sicherzustellen, um den Aufwand, der vor Zugabe des PROA anfällt zu vermeiden, falls die Anlage bereits vor Verteilung des

PROA im System ausfällt oder Öl bzw. Kältemittel verliert.

Die Menge des zuzusetzenden PROA ergibt sich aus der Ölmenge im Verdichter. Das Verhältnis von PROA zu Öl ist 95 % Öl (im Verdichter) und 5 % PROA. Am einfachsten ist es, 5 % des Öls aus dem Verdichter zu entfernen und dies durch dieselbe Menge PROA zu ersetzen. Es ist wichtig, daß die empfohlene Menge PROA nicht überschritten wird.

Das grundsätzliche Vorgehen bei der Zugabe von PROA sieht wie folgt aus:

1. Die Anlage wird angelassen und bleibt während der gesamten Zugabeprozedur von PROA im Betrieb.
2. Das PROA wird über das Schrader-Ventil der Kaltgas-Saugleitung zugefügt.
3. Es sollte eine speziell für das System ausgelegte Ölpumpe eingesetzt werden, um das Risiko von Verschmutzungen zu verringern. Es ist wichtig, daß während dieses Vorgangs keine Feuchtigkeit in das System gelangt.
4. Wenn die Anlage weniger als 88 kW Kälteleistung besitzt, kann das PROA in einem einzigen Durchgang zugefügt werden. Bei größeren Anlagen, wo mehr PROA benötigt wird, muß PROA zweimal zugegeben werden, um ein 95/5 %-Gemisch zu erhalten. Wenn das PROA direkt nach der Zugabe beginnt, sich im System zu verteilen und andere Feststoffe zu verdrängen, wird üblicherweise ein leichter Anstieg des Energieverbrauches beobachtet. Dieser Effekt kann minimiert werden, indem man das PROA in mehreren kleineren Dosen zuführt.

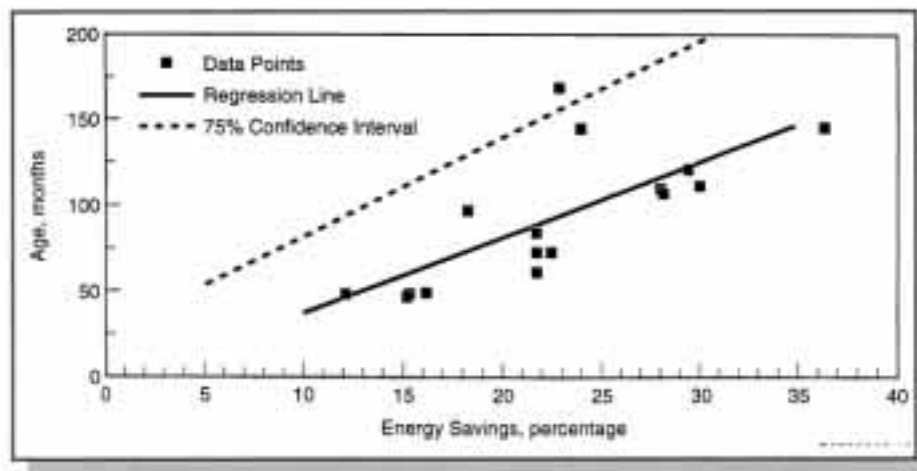


Abb. 2 Verdichteralter im Vergleich zu Energieeinsparungen. (– Meßpunkte, – Regressionslinie, – 75 % Vertrauensbereich, y-Achse: Alter in Monaten, x-Achse: Energieeinsparung in %)

Nach ein bis zwei Wochen normalen Betriebs hat PROA sich vollständig in der Anlage verteilt. Die polarisierten Moleküle lagern sich am Metall an und verdrängen Öl und Rußablagerungen von den Oberflächen der Rohre. Insbesondere bei älteren Anlagen können in den Verdichter gelangende Ablagerungen und Öl zur Verstopfung von Filtern und Trocknern führen.

#### Variationen

Die Zugabe von PROA in den Ölbehälter des Verdichtergehäuses ist der einfachste, aber nicht der einzige Weg, PROA zuzuführen. Bei hermetischen Verdichtern wird es durch den Niederdruck-Einlaß der Kältemittelleitung zugegeben. Erfahrungen mit Haus-Wärmepumpen mit hermetischen Verdichtern zeigten, daß die

meisten dieser Anlagen ein zusätzliches Abbläseventil auf der Niederdruckseite der Kältemittelleitung benötigen. PROA wird dann über eine Befüllvorrichtung, an der die Füllmenge eingestellt werden kann, zugeführt. Unabhängig davon, ob das PROA über die Kältemittelleitung oder den Ölbehälter zugeführt wird, ist es von größter Bedeutung, daß der Verdichter von Verschmutzungen frei bleibt.

Am effektivsten ist der Einsatz von PROA in alten Verdichtern (s. Abb. 2). In einem neueren Gerät mit guten Dichtungen und geringerem Verschleiß wird weniger Öl in Verflüssiger und Wärmeübertrager gezogen. Der Einsatz von PROA zeigt hier häufig nur eine Leistungssteigerung von 3–7 %. Obwohl bei neueren Anlagen also nur ein geringerer Leistungsanstieg zu er-

warten ist, kann PROA sie vor Verschleiß schützen, indem es Ablagerungen vor allem an den Wärmeübertragern verhindert.

Obwohl das Produkt bisher noch nicht für den Einsatz mit Ammoniak zugelassen ist, wird PROA z. Z. in einem 348-t-Schrauben-Wasserkühlsatz bei Texas Cold Storage in Fort Worth getestet.

Dieser Artikel ist ein Auszug aus dem Energie-Management-Programm „Federal Technology Alert“ des Department of Energy, USA. Für mehr Informationen über PROA wende sich der Leser bitte an: Polar Shield-DFW, Tel. 0 01-9 40-2 43-25 61, Fax: 0 01-9 40-4 84-27 63, e-mailpsdfw@theonramp.net, Website <http://www.polarshield.com>.

ACH&R News, 28. Juli 1997 R. S.

*Dieser Artikel faßt die Ergebnisse eines von ARI und CDA (Copper Development Association) finanzierten Forschungsprojektes zusammen. Eine ausführlichere Zusammenfassung liegt auf der ARI-Homepage (<http://www.ari.org>) vor. Der Abschlußbericht kann über die ARTI Refrigerant Database bezogen werden.*

## ARI und CDA finanzieren Forschungen zu Kupfer-Verbindungstechniken mit Kältemitteln der Zukunft

#### Einführung

Schlechte hartgelötete Verbindungen in Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie deren Komponenten kosten die Industrie schätzungsweise 30-90 Mio US\$ pro Jahr aufgrund von Kältemittelleckagen und notwendigen Nacharbeiten. Diese Kosten entstehen durch defekte Verrohrungen und Installationen, durch sowohl automatisch als auch manuell gefertigte hartgelötete Verbindungen sowie als Ergebnis von Anlagenausfällen aufgrund von schlechter Installation, Fehlern im Umgang mit der Anlage und Ermüdungserscheinungen. Dieser Artikel stellt die Ergebnisse eines bei Amalgamated Technologies Inc. (ATI), USA, durchgeführten Forschungsvorhabens vor, in dem untersucht wurde, ob gegenwärtig eingesetzte Hartlötverfahren und Verbindungstechniken für Kupferrohre für die zukünftig einzusetzenden Kältemittel anwendbar sind. Der Abschlußbericht von ATI (s. u.) zeigt, daß es für die vollständige Dichtheit einer hartgelöteten

Verbindung drei Schlüsselkriterien gibt:

- Perfekter Sitz des Innenteils des Rohres (male) in der Buchse des aufgeweiteten Außenrohres (female), s. Abb. 1,
- vollständiges Eindringen des Hartlotes in die aufgeweitete Buchse des Außenrohres, und
- eine gleichmäßige Kehlnaht an der Außenseite der hartgelöteten Überlappungsstelle.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß bei Beachtung der drei o.g. Kriterien hartgelötete Verbindungen ebenso belastbar sind wie die Verrohrung selbst.

#### Vorgehen

Um für die Untersuchungen repräsentative Angaben zu Rohren und Hartlötmaterial zu sammeln, wurden fünf Werke von vier großen Herstellern besucht. Bei allen aufgesuchten Herstellern wurden ähnliche Hartlöttechniken eingesetzt, ebenso wurde in jedem Werk

über ähnliche Schwierigkeiten mit dem Verfahren berichtet. Ungleichmäßige Rohrlängen führen beim Zusammenstecken der Rohre zu einer Überdehnung an der Stelle, an der das geweitete Außenrohr sich wieder verengt, und in der Folge zum Bruch der Verrohrung im Verbindungsbereich. Unterschiedliche Mengen an Ölrückständen vom Ziehen der Rohre verschmutzen die Lötstellen und führen so zu starker Rauchentwicklung und schlechter Lötqualität. Diese und andere Schwierigkeiten machten Nacharbeiten erforderlich und führten so zu höheren Kosten für die Hersteller.

Nach Sammlung der Daten bei den verschiedenen Herstellern wurden drei Lötmaterialien und vier Rohrtypen für die Untersuchungen ausgewählt. Es wurden 8-mm- und 9,5-mm-Rohre untersucht, sowohl mit als auch ohne Kühlrippen. Jeder der vier Rohrtypen wurde für die Untersuchung abhängig von dem zu durchlaufenden Testverfahren in drei unterschiedliche Formen

gebracht. Diese drei unterschiedlichen Formen sind in Abb. 2 dargestellt. Wie zu erkennen ist, enthält jede der drei Formen zumindest eine „Teleskop-Verbindung“, bei der ein Rohr zur Buchse aufgeweitet ist und ein nicht aufgeweitetes Innenrohr aufnimmt, so daß eine überlappende Verbindung entsteht.

Bei allen Rohren wurden die Wandstärken gemessen, Abweichungen notiert und die dünnste Stelle markiert. Die Versuchsstücke wurden mit einem zweiflammigen Sauerstoff-Acetylen-Brenner manuell gelötet. Ein Flußmittel wurde nicht verwendet, und die Teststücke wurden nicht gereinigt.

Durch diese Versuche sollte ermittelt werden, welche Parameter die Dichtigkeit der hartgelöteten Verbindungen der Kupferrohre negativ beeinflussen. Beim Einsatz in einer Anlage werden solche Verbindungen als stabil betrachtet, die während des normalen Betriebs keine Leckagen aufweisen. Bei den nun durchzuführenden Hochbelastungs-Versuchen wurden Stärke und Belastbarkeit der Rohrverbindungen als Indikatoren für die Stabilität der Verbindungen betrachtet. Für die Auswertung wurden vier unterschiedliche Testverfahren durchlaufen: Ermittlung des Berstdruckes, Schwingungs-Wechselfestigkeitsprüfung, Temperatur-Wechselfestigkeitsprüfung und Druck-Wechselfestigkeitsprüfung.

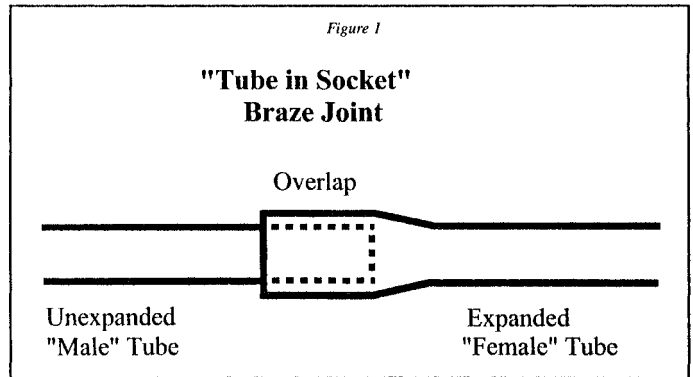
**Ermittlung des Berstdruckes**

In hydraulischen Tests haben sich alle drei untersuchten Lote stabiler als die Verrohrung gezeigt; bei keiner der Proben trat ein Schaden aufgrund einer Trennung von Lot und Metall auf. Gut gelötete Probenstücke ohne Defekte im Rohrbereich oder mechanische Fehler versagten bei den höchsten Druckbelastungen, sehr dicht an der theoretischen Berstfestigkeit des Rohres selbst.

Die meisten Probenstücke brachen jedoch bereits bei einem Druck weiter unterhalb des theoretischen Berstdruckes. Bei diesen Schäden konnten deutlich zwei Ursachen unterschieden werden:

1. Mechanische Mängel: U. a. ungleichmäßige Wandstärken der Rohre, Beschädigungen der Rohroberfläche durch manuelles Aufweiten, Stellen, an denen das Innenrohr gegen die Verengung des aufgeweiteten Außenrohres drückt.

**Abb. 1**  
Gelötete „Steck“-  
Verbindung.  
Innenrohr (male),  
aufgeweitetes  
Außenrohr (female).



2. Unvollständiges Eindringen des Lotes: Verbindungsstellen, die nur teilweise mit Lot durchdrungen sind, haben eine geringere Berstfestigkeit und brechen üblicherweise innerhalb des teleskopartig zusammengesteckten Bereiches. Beim Aufweiten des Außenrohres wird die Rohrwand gedehnt und verdünnt. Zusätzlich wird die gesamte Verrohrung durch die Lötwärme weicher gemacht. Für eine maximale Berstfestigkeit muß das Lot gleichmäßig und vollständig in die Verbindungsstelle eindringen, um zu verhindern, daß die dünnere Wand des Außenrohres inneren Drücken ausgesetzt wird.

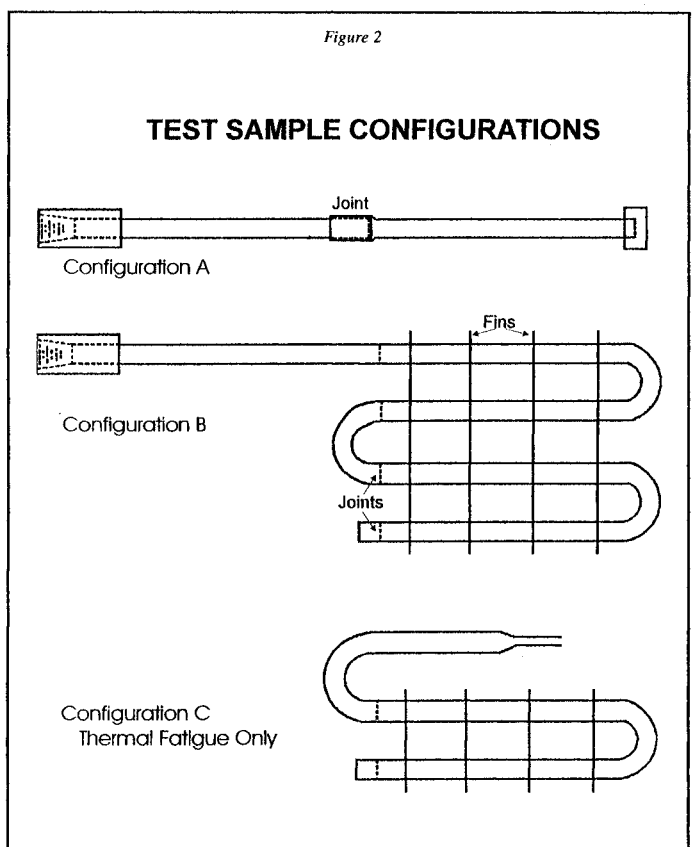
Ein schlechtes Eindringen des Lotes läßt sich meist darauf zurückführen, daß es schwierig ist, mit einer manuell zugeführten Gasflamme eine gleichmäßige Erwärmung zu erreichen. In dem Bericht wird angemerkt, daß ein übermäßig langes Überlappungsstück ein gutes Eindringen des Lotes erschwert und keine größere Stabilität bietet.

**Schwingungs-Wechselfestigkeitsprüfung**

Das wichtigste Ergebnis der Schwingungsversuche zeigten die 9,5-mm-Rohre mit dem Lot BCuP-6 bei einem einstündigen Testlauf. Aufgrund der

**Abb. 2**  
Unterschiedliche  
Formen der Proben-  
stücke.

- Form A: Lötstelle Rohrleitung.
- Form B: Kühlrippen/ Lötstellen Rohrbögen.
- Form C: nur thermische Ermüdung.



Eigenschaften des Lots und der Löttechnik wiesen diese Probenstücke praktisch kein Lot mehr am Rand der Verbindungsstelle auf. Diese mangelhafte Durchdringung mit Lot führte zu einer Konzentration der Belastung an der Basis der Verbindung, die ein vorzeitiges Brechen und eine deutlich verringerte durchschnittliche Lebensdauer zur Folge hatte. Lote mit hohem Silberanteil sind außerhalb einer Kapillare stark fließend und ergeben daher nur sehr kleine Kehlnähte. Beim Löten muß besonders bei Verwendung eines Lotes mit hohem Silberanteil auf die Erstellung einer guten Kehlnaht geachtet werden.

Als wichtigste Schlußfolgerung aus der Schwingungs-Wechselfestigkeitsprüfung ergibt sich, daß für eine gute Schwingungsfestigkeit eine stabile Verbindung mit vollständig eingedringendem Lot und ordentlicher Kehlnaht erforderlich ist.

#### Temperatur-Wechselfestigkeitsprüfung

Die Untersuchung der thermischen Ermüdung erfolgte mit Hilfe eines Apparates, der druckbelastete, auf einem rotierenden Rad montierte Probenstücke einem wechselnden Temperaturbereich von 4–132 °C aussetzte. Die Probenstücke wurden mit Erdgasbrennern erhitzt und anschließend in einem Behälter mit gekühltem Wasser abgeschreckt. Diese Versuche wurden ausschließlich mit den 8-mm-Rohren der Gruppe C durchgeführt.

Nach 62 000 Durchgängen wies der größte Teil der Probenstücke keine Schäden auf. Als wichtigstes Ergebnis der Temperatur-Wechselfestigkeitsprüfung zeigte sich, daß die normalen Temperaturschwankungen an einer im Betrieb befindlichen Kältemittelleitung für die Leitung selbst nicht schädlich sind.

#### Druck-Wechselfestigkeitsprüfung

Bei diesen Untersuchungen wurden die Auswirkungen von Druckschwankungen beim Betrieb einer Kälteanlage betrachtet. Diese Versuche wurden ausschließlich mit 8-mm- und 9,5-mm-Rohren der Gruppe B durchgeführt. Die Probenstücke wurden in schneller Folge mit Druck beaufschlagt und wieder entlastet bis Schäden auftraten. Die Druck-Wechselfestigkeitsprüfungen wurden auf verschiedenen Belastungsniveaus durchgeführt. Die Hochbelastungs-/Kurzzeit-Versuche mit einminütiger und ein-

stündiger Dauer führten zu ähnlichen Schäden wie bei der Ermittlung des Berstdruckes; fast jedes Probenstück brach an einer Lötstelle. Die meisten Probenstücke brachen bei Kerben in der Verrohrung oder an einer Lötstelle, die ungenügend mit Lot durchdrungen war. (Anmerkung: Kerben sind mechanische Mängel, die normalerweise bei der Produktion von Wärmeübertragern nicht entstehen. Einige der bei diesen Versuchen verwendeten Rohre hatten jedoch bei der manuellen Aufweitung Kerben bekommen).

Die Gruppe mit einer Testdauer von 24 Stunden erbrachte die interessantesten Daten. Die niedrigere Wechselbelastung ergab eine plötzliche und dramatische Verschiebung bei der Art der Schäden. Anstelle von Schäden an oder nahe den Lötstellen brach die Mehrzahl dieser Probenstücke bei beiden untersuchten Rohrdurchmessern in den Haarnadel-Biegungen der Leitungen.

Als wichtigste Schlußfolgerung aus der Druck-Wechselfestigkeitsprüfung ergibt sich, daß für eine maximale Arbeitsfestigkeit das vollständige Eindringen des Lotes in die Verbindungsstellen sowie die Entfernung von Einkerbungen und anderen mechanischen Mängeln erforderlich ist.

#### Schlußfolgerungen

Mit konventionellen Löttechniken können qualitativ hochwertige Verbindungen hergestellt werden. Die gegenwärtig gebräuchlichen Lötverfahren mit Gaserwärmung und die untersuchten Lote können gute Ergebnisse bringen. Um jedoch das Potential heutiger Technologien voll ausschöpfen zu können, werden einige Hersteller ihre Verfahren verbessern müssen. Das Ziehen der Rohre und Leitungen sollte sorgfältiger durchgeführt werden, und der Einsatz der gegenwärtigen Löttechniken kann effektiver durchgeführt werden.

Diese Studie hat ergeben, daß ein vollständiges Eindringen des Lotes in die Verbindungsstelle für optimale Leistungen wesentlich ist. Gleichmäßiges und einheitliches Löten ist manuell schwer durchführbar und wird durch eine lange Überlappung der Rohrverbindung noch erschwert. Großzügige Kehlnähte an den Außenseiten der teleskopartig ineinandergesteckten Verbindungen sind für die Schwingungs-Wechselfestigkeit notwendig. Die silberfreien Lote zeigten in der Un-

tersuchung ebensogute Ergebnisse betreffend gutem Eindringen und ordentlicher Kehlnaht wie die Lote mit hohem Silbergehalt (mit Ausnahme von BCuP-6 bezüglich Kehlnaht). Mechanische Schäden und Mängel, die beim Ziehen der Leitungen und Rohre, der Konstruktion des Wärmeübertragers oder durch falsche Behandlung auftraten, hatten einen negativen Einfluß auf Berstfestigkeit und Widerstandsfähigkeit.

Es wird davon ausgegangen, daß die Produktionsqualität und die Lebensdauer durch Verbesserungen bei der Beheizung des Lötprozesses zwecks größerer Gleichmäßigkeit und Temperaturkontrolle, Verbesserungen bei der Auslegung der Verbindungen sowie Verbesserungen beim Ziehen der Rohre und Leitungen erheblich erhöht werden können.

Um in diesen Bereichen sich stellende Fragen beantworten zu können, finden weitergehende Untersuchungen statt (Ergebnisse werden für das Frühjahr 1998 erwartet). Bei diesen Untersuchungen wird eine alternative Löttechnik (Induktionsheizung) eingesetzt, um den Vorteil einer gleichmäßigen Erwärmung für das Eindringen des Lotes in die Verbindung zu überprüfen. Weiterhin werden verschiedene Überlappungsverhältnisse und Außenrohrprofile ausgewertet, um deren Einfluß auf die Durchdringung mit Lot und die Stabilität der Verbindung zu bestimmen.

#### Ergebnisse der ATI Untersuchungen:

##### Ermittlung des Berstdruckes

- Stärke und Härte des Lotes haben mit der Stabilität einer gelöteten Verbindung wenig zu tun.
- Die Berstfestigkeit wird von effektivem Eindringen und der Verteilung des Lotes am stärksten beeinflusst.
- Die Berstfestigkeit eines Probenstückes wurde durch mechanische Beschädigung beeinflusst. Unabhängig von Lötqualität, Art des Lotes und dünnen Stellen der Rohrwände traten Schäden bei reduziertem Druck an Einkerbungen auf.
- Durchdringung, Qualität der Lötstelle und Loteigenschaften sind sehr wichtig.

##### Schwingungs-Wechselfestigkeitsprüfung

- Verbindungen mit schlecht eingedringendem Lot können schnell im Be-

reich der Lötstelle brechen. So kann es vorkommen, daß Lötstellen, die gut aussehen und dem Drucktest standhalten, durch bei Transport oder Betrieb auftretende Schwingungen brechen.

- Unordentliche Kehlnähte verursachen Schäden aufgrund von Belastungskonzentrationen.

- Wenn angemessene Kehlnahtradien gearbeitet werden, scheinen Lote mit hohem Silberanteil nicht besser zu sein.

#### *Temperatur-Wechselfestigkeitsprüfung*

- Beim Normaltemperaturbetrieb einer Kältemittelleitung nimmt die Leitung selbst keinen Schaden – die Berstfestigkeit wird sogar erhöht.

#### *Druck-Wechselfestigkeitsprüfung*

- Kein Zusammenhang zwischen Lot und Schäden.

- Ein-Minuten- und Ein-Stunden-Probenstücke wiesen Schäden an den Lötverbindungen auf.

- 24-Stunden-Probenstücke wiesen hauptsächlich in den Haarnadelbiegungen Schäden auf. (Theorie von ATI: Die Verrohrung war ursprünglich zu stark verfestigt und die zusätzliche Verfestigung durch den Biegeprozeß führte zu einer Verlagerung der Schadensstellen.)

- Bei Wechseldrücken von 75-80 % der Berstfestigkeit wurden die Eigenschaften der Verrohrung selbst bestimmend für die Wechseldruck-Belastbarkeit.

#### *Andere Beobachtungen und Empfehlungen*

- Zwischen den drei verwendeten Loten bestanden nur geringfügige Unterschiede.

- Der überlappende Bereich der Steckverbindungen muß auf einfachen Rohrdurchmesser oder weniger reduziert werden. Dadurch werden geringere Lötwärme und weniger Lot benötigt, und das Lot kann die Verbindungsstelle besser durchdringen.

- Eine Überhitzung der Verbindungs-

stellen sollte vermieden werden (reduzierte Fließfähigkeit des Lotes).

- Bessere Stabilität der Verbindungsstellen durch:

- Entfernung von Ölrückständen auf zu lötenden Rohren,

- Verengung der Rohrkonzentrität,
- Reduzierung unnötiger Überlappungen an Umkehrbögen,

- Vermeidung mechanischer Schäden bei der Bearbeitung,

- Entfernung von Kupferspänen und anderen Verunreinigungen,

- Überprüfung der Rohrlängen, um Rohrspalte beim Ziehen und Aufweiten zu vermeiden.

Scott A. McCracken und Roy E. Beal (Amalgamated Technologies, Inc.): Evaluation of Joining Techniques for Copper Tubing in AC&R Applications, Juni 1997. Kontakt: ARTI Database c/o James M. Calm, Engineering Consultant, 10887 Woodleaf Lane, Great Falls, VA 22066-3003, USA (Ref. RDB#751). Abschlußbericht.

*ARI Tech Update, Juli 1997*

*R.S.*