

DKV-Forschungsbericht Nr. 45

Alexander Floß

Experimentelle Untersuchung des Strömungs- und Drosselverhaltens von reinem Kältemittel und von Kältemittel/Öl-Gemischen

1994

978-3-922429-46-3



Kurzfassung

Zweck der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Strömungs- und Drosselverhaltens des reinen Ersatzkältemittels R134a und der Kältemittel/Polyolesteröl- Gemische R134a/RL184 in Rohren, Kapillaren, Blenden und in einem Ventil. Bei den Untersuchungen von Kapillarströmungen liegt das Hauptaugenmerk auf der Ermittlung des Thermodynamischen Nichtgleichgewichts, das sich sowohl in der Überhitzung als auch in der Unterschreitung des Dampfdruckes der Flüssigkeit ausdrücken lässt.

Zur Erreichung dieser Ziele sind zunächst mit einer bestehenden Versuchsanlage mit rechtsläufigem Kreisprozess etwa 800 Versuche mit reinem Kältemittel R134a durchgeführt worden. Da aber in der Praxis das Verhalten von Kältemittel/Öl-Gemischen wegen des Ölwurfs der Kompressoren von großer Bedeutung ist, ist im Anschluss an die Untersuchungen mit reinem R134a die Versuchsanlage so erweitert worden, dass ein kontrolliertes Zumischen und Abtrennen von Kältemaschinenöl vorgenommen werden kann. Hierzu ist die Versuchsanlage mit einer Öldosiervorrichtung und einem geeigneten Ölabscheider sowie einer Messvorrichtung nach dem Prinzip der Mischungsdichte zur Bestimmung der Ölmassenkonzentration im umlaufenden Arbeitsmittelgemisch ausgerüstet worden. Mit der erweiterten Anlage kann das Verhalten solcher Gemische bis zu einer Ölkonzentration von 15 Prozent bei einer Schwankungsbreite von ungefähr 0.2 Prozent untersucht werden. In ungefähr 1200 Versuchen ist der Einfluss des Polyolesteröls RL184 auf das Strömungs- und Drosselverhalten von Kältemittel/Öl-Gemischen in vier Konzentrationsstufen untersucht worden. Die Diskussion der Versuchsergebnisse für das reine Kältemittel und für die Gemische sowie die Entwicklung und Überprüfung geeigneter Korrelationen und Berechnungsverfahren, die dem Kältetechniker für die Auslegung von Anlagen an die Hand gegeben werden, runden die Arbeit ab.

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Versuchsparameter und deren Variationsbreite, nachgewiesen werden konnte.

	Versuchsparameter		
Strömungsverhalten in geraden Rohren	<ul style="list-style-type: none"> • mittlerer statischer Druck einphasig: $0.8 < p < 1.23 \text{ MPa}$ zweiphasig: $0.17 < p < 0.47 \text{ MPa}$ • mittlere Temperatur einphasig: $275 < T < 316 \text{ K}$ zweiphasig: $266 < T < 285 \text{ K}$ • mittlerer Dampfgehalt $0 \leq x \leq 0.31$ • Ölkonzentration $0 \leq \xi \leq 10\%$ 		
Strömungs- und Drosselverhalten in:	Blenden	Ventil	Kapillaren
Ausgangsdruck:	$0.8 < p_0 < 1.2 \text{ MPa}$	$0.75 < p_0 < 1.2 \text{ MPa}$	$0.8 < p_0 < 1.2 \text{ MPa}$
Ausgangsunterkühlung:	$1 < \Delta T_{\text{UK}} < 30 \text{ K}$	$3 < \Delta T_{\text{UK}} < 30 \text{ K}$	$1 < \Delta T_{\text{UK}} < 30 \text{ K}$
Differenzdruck:	$0.2 < \Delta p < 0.8 \text{ MPa}$	$0.2 < \Delta p < 1.0 \text{ MPa}$	$0.2 < \Delta p < 1.0 \text{ MPa}$
Ölkonzentration:	$0 \leq \xi \leq 10\%$	$0 \leq \xi \leq 10\%$	$0 \leq \xi \leq 10\%$

Innerhalb der angegebenen Rand- bzw. Betriebsbedingungen werden kritische Strömungszustände nur in den Endquerschnitten der sechs unterschiedlichen Kapillaren beobachtet. Die vom angelegten Differenzdruck abhängigen Größen des Massen- bzw. Volumenstroms durch die Blenden und das Ventil weisen darauf hin das in diesen Drosselorganen keine kritischen Strömungen auftreten. Eine gründliche Auswertung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit reinem Kältemittel R134a und Kältemittel / Öl-Gemischen R134a/RL184 führt zu den nachfolgenden Erkenntnissen:

- Der Druckabfall der flüssigen Einphasenströmung mit 10 % Ölmassenanteil in adiabaten geraden Rohren erhöht sich um rund 10 % gegenüber dem Druckabfall von Strömungen mit reinem Kältemittel.
- Der Druckabfall von Zweiphasenströmungen mit 10 % Ölmassenanteil in adiabaten geraden Rohren erhöht sich bis zu 20 % gegenüber Strömungen mit reinem Kältemittel.
- Der Einfluss des Öls auf den Massen- bzw. Volumenstrom durch Blenden beträgt im gewählten Konzentrationsbereich weniger als 1 %
- Bei Ventilströmungen sind die Abweichungen des Massenstroms aufgrund der Ölzumischung $\leq 1 \%$
- Geringe Ölbeimischungen ($\xi \leq 1.5 \%$) zu Kapillarströmungen führen zu Erhöhungen des Massenstroms bis zu etwa 2 %; höhere Ölkonzentrationen ($\xi \geq 2.0 \%$) bringen jedoch eine Reduktion des Massenstroms mit sich, der je nach Randbedingungen bis etwa 5 % unter dem des reinen Kältemittels liegen kann.

Zur experimentellen Untersuchung des Thermodynamischen Nichtgleichgewichts in Drosselströmungen sind zwei speziell instrumentierte Kapillaren angefertigt worden. Mit Hilfe dieser Kapillaren in Verbindung mit einer verbesserten Messtechnik ist in ungefähr 200 weiteren Versuchen

mit reinem R134a und R134a/RL184-Gemischen unterschiedlicher Ölkonzentration das Thermodynamische Nichtgleichgewicht ermittelt worden. Die Auswertung der hierbei gewonnenen Versuchsergebnisse liefert:

- Einen funktionalen Zusammenhang zwischen Siedeverzugszeit und Massenstromdichte, aus dem mit Hilfe des Druckabfallgradienten für die Einphasenströmung die Überhitzung am Verdampfungsbeginn für reines R134a bestimmt werden kann.
- Ein Maß für den Einfluss der Ölkonzentration auf die Siedeverzugszeit am Verdampfungsbeginn, wobei die Überhitzung der Flüssigkeit bei Ölkonzentrationen von 10 % um bis zu 20 % gegenüber der des reinen Kältemittels abnimmt.

Für die Auslegung von Rohrleitungen und Drosselorganen in kältetechnischen Anlagen werden dem Techniker zum Teil einfache, auf physikalischen Grundlagen basierende Berechnungsvorschriften, in denen der Einfluss des Öls berücksichtigt wird, vorgegeben.

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Dimensionierung von Kälteanlagen ist aber die Verfügbarkeit von Stoffdaten für die beiden reinen Fluide und darüber hinaus von geeigneten Rechenansätzen zur Bestimmung der Gemischeigenschaften. Mit Hilfe der in dieser Arbeit genannten Quellen für die Stoffdaten der beiden Reinstoffe und für die hier vorgestellten Beziehungen zur Berechnung der Gemischeigenschaften werden die Versuchsergebnisse wiedergegeben für:

- Flüssige Einphasenströmungen in geraden adiabaten Rohren
Im Mittel wird der Druckverlust um 5 % zu hoch berechnet, wobei die Abweichung unabhängig von der Ölkonzentration ist.
- Zweiphasenströmungen in geraden adiabaten Rohren
Die maximale Abweichung des berechneten vom gemessenen Druckverlust liegt bei 20 %, wobei der mittlere Fehler der Berechnung bei ungefähr 10 % liegt.
- Drosselströmungen in Kapillaren
Zur genauen Berechnung des Verhaltens der Kapillarströmungen ist die Kenntnis des Thermodynamischen Nichtgleichgewichts erforderlich. In dieser Arbeit werden nun Zusammenhänge aufgezeigt, mit denen das Thermodynamische Nichtgleichgewicht am Verdampfungspunkt bis auf 20 % genau bestimmt werden kann. Es wird weiterhin gezeigt, dass sich dieses Nichtgleichgewicht stromabwärts vom Verdampfungsbeginn je nach Versuchsbedingungen sowohl auf- als auch abbauen kann.
Mit den derzeit bekannten Beziehungen lässt sich die erforderliche Länge einer Kapillare mit einem Fehler kleiner 10 %, der Massenstrom in einer vorgegebenen Kapillare dagegen mit Hilfe eines iterativen Rechenverfahrens auf etwa 3 % genau berechnen; zur Herleitung funktionaler Zusammenhänge, die nicht anlagenspezifisch sind, müssen jedoch zusätzliche Messungen gemacht werden.
- Drosselströmung im Ventil
Der mittlere Fehler des berechneten Massenstroms ist unabhängig von der Ölkonzentration und liegt etwa bei 5 %. Die geometrischen Kenngrößen des Ventils, die zur Berechnung notwendig sind, können theoretisch wegen der Komplexität der Armatur nicht vorausbestimmt werden und müssen experimentell ermittelt werden.

Im Verlauf der Versuchsarbeiten, sowohl mit reinem Kältemittel als auch mit Kältemittel/Öl-Gemischen R134a/RL184, sind keinerlei Störungen beim Betrieb der Anlage aufgetreten, die Komplikationen beim Einsatz dieser Ersatzstoffe in realen Kälteanlagen erwarten lassen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen und Ergebnissen dieser Arbeit können Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen abgeleitet werden, deren erfolgreiche Durchführung die Auslegung von kältetechnischen Anlagen erleichtern und verbessern würde:

- Allgemeingültige Aussage zur Beschreibung der Größen des Thermodynamischen Nichtgleichgewichts am Verdampfungsbeginn in Kapillarströmungen sollten erarbeitet werden.

- Gesetzmäßigkeiten sollten gesucht werden, die den Verlauf des Thermodynamischen Nichtgleichgewichts in Drosselströmungen in Kapillaren stromabwärts vom Verdampfungsbeginn wiedergeben.
- Da bei größeren Kälte- und Wärmepumpenanlagen fast ausschließlich Ventile unterschiedlicher Bauart für die Drosselung der Kältemittel zum Einsatz kommen, sollte durch gezielte Experimente versucht werden, geeignete Ventilenngößen herzuleiten.
- Es sollte schließlich überprüft werden, ob sich die hier vorgestellten Rechenverfahren zur Beschreibung des Strömungs- und Drosselverhaltens von R134a/RL184-Gemischen auch auf andere Arbeitsfluide übertragen lassen.