

Inhalt

| | Seite |
|----------|---|
| 1 | Einleitung 2 |
| 2 | Schmierstoff- und Kältemittelmengen in Kfz-Klimaanlagen..... 2 |
| 3 | Definitionen..... 3 |
| 4 | Ölwurf eines Verdichters für Kfz-Klimaanlagen..... 4 |
| 5 | Einflüsse des Öls auf den Kältemittelkreislauf..... 5 |
| 5.1 | Rückkühleffekt durch erhöhte Ölanteile 5 |
| 5.2 | Einfluss der Ölanteile auf die Druckdifferenz im Verdampfer 7 |
| 5.3 | Nutzbare Kälteleistung bei erhöhten Ölanteilen..... 7 |
| 5.4 | Speichervermögen des Hochdrucksammlers..... 8 |
| 6 | Bestimmung des Ölgehaltes 9 |
| 7 | Literatur..... 13 |

1 Einleitung

Die mit R-134a betriebenen Kfz-Kältemittelkreisläufe werden heute fast ausnahmslos mit Schmierstoffen auf Polyalkylenglykolbasis (PAG) betrieben. Der Schmierstoff hat die Aufgabe, die im Verdichter vorhandenen Lagerstellen vor einem vorzeitigen Verschleiß zu schützen und einen effizienten Betrieb mit möglichst geringen Reibungsverlusten im Verdichter sicherzustellen.

Der Schmierstoff muss unter den technisch möglichen Betriebsbedingungen einer Kfz-Klimaanlage eine ausreichende Viskosität gewährleisten. Als besonders kritisch sind die sog. Idle-Bedingungen und natürlich auch Sonderfälle, wie z. B. Kältemittelverlust durch Leckagen zu bewerten.

Schmiermittelanteile im Kältemittelkreislauf $> 3\%$ reduzieren grundsätzlich die nutzbare Kälteleistung des Verdampfers und sollten schon aus diesem Grund in Grenzen gehalten werden. Aber auch der ständig zunehmende Kostendruck fordert eine Reduzierung der Schmiermittelmengen.

2 Schmierstoff- und Kältemittelmengen in Kfz-Klimaanlagen

Das folgende Bild soll einen Überblick der in unterschiedlichen Klimaanlagen eingesetzten Schmier- und Kältemittelmengen vermitteln.

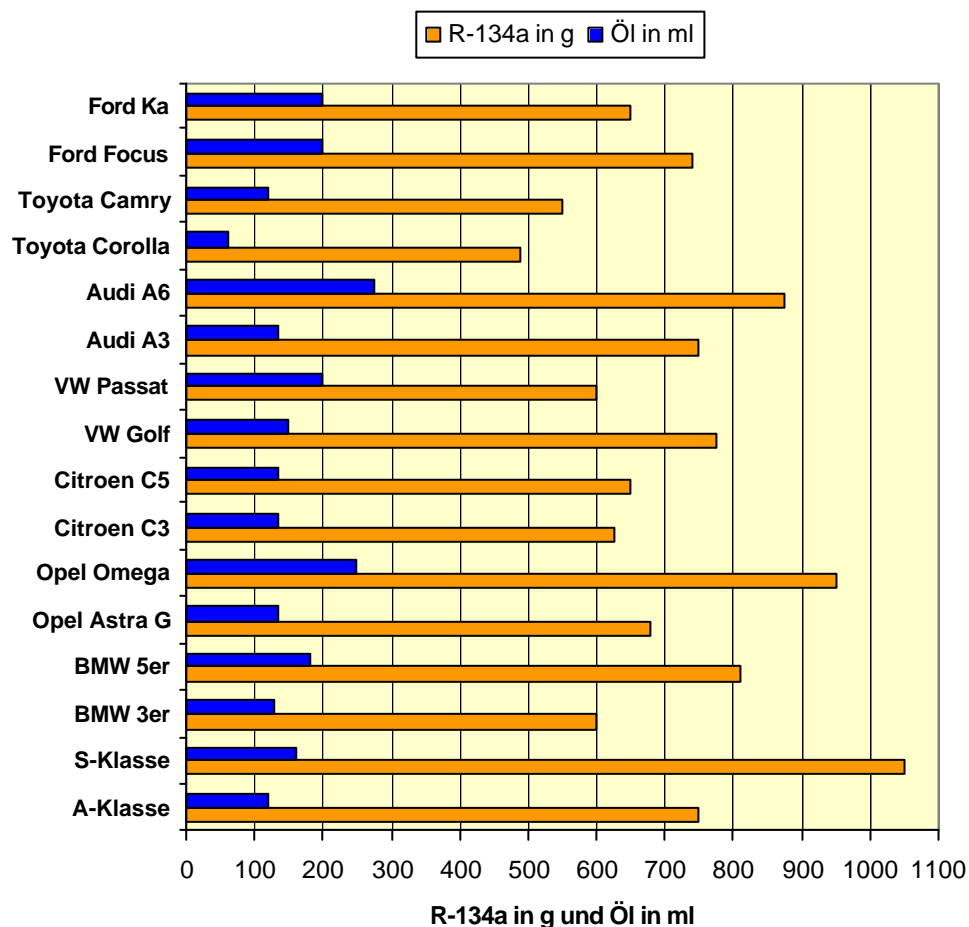


Bild 1. Schmier- und Kältemittelmengen in unterschiedlichen Kfz-Klimaanlagen

Durch den Einsatz von Verflüssigern mit „micro channels“ und relativ kleinen Filtertrocknern wurde in den letzten Jahren eine Reduzierung der benötigten Kältemittelmengen erreicht.

Häufig bestimmt die Verdichterausführung die für den Kältemittelkreislauf notwendige Schmiermittelmenge. Weitere Einflussgrößen können sein:

- Besitzt der Verdichter einen Ölabscheider?
- Verdichterbauart (z. B. Scroll oder Hubkolben)
- Strömungsgeschwindigkeiten in der Heißgas- und in der Saugleitung
- Überhitzung des Kältemittels nach dem Verdampfer und in der Saugleitung
- Ein- oder Zweiverdampfer-Kreisläufe
- „Öltaschen“ in den unterschiedlichsten Kreislaufkomponenten

Die Einflussgrößen können sich - je nach Anlagenausführung - sehr unterschiedlich auswirken. Aus diesem Grund ist die Überprüfung der Schmiermittel- bzw. Ölrückführung bei Neuanlagen und auch im Falle von konstruktiven Änderungen des Kältemittelkreislaufes so wichtig.

3 Definitionen

Eine der bekanntesten Definitionen ist der sog. Ölwurf des Verdichters. In den meisten Normen und Richtlinien versteht man unter Ölwurf die Menge an Öl, die vom Verdichter unter stationären Bedingungen in den Kreislauf ausgeworfen und auch wieder zurück gefördert wird. Der Ölwurf ist definiert als:

$$x_{\text{Öl}} = \frac{\dot{m}_{\text{Öl}}}{(\dot{m}_{\text{R}} + \dot{m}_{\text{Öl}})} \times 100 \%$$

Hierin bedeuten:

| | | |
|-----------------------|---|---------|
| $x_{\text{Öl}}$ | Ölwurf des Verdichters | in % |
| $\dot{m}_{\text{Öl}}$ | Massenstrom des im Umlauf befindlichen Öls | in kg/s |
| \dot{m}_{R} | Massenstrom des im Umlauf befindlichen Kältemittels | in kg/s |

Relativ selten ist in der Literatur das Mengenverhältnis des im gesamten Kreislauf vorhandenen Öls und Kältemittels zu finden. Dieses Verhältnis ist üblicherweise definiert als:

$$x_{\text{Öl, Anlage}} = \frac{M_{\text{Öl}}}{(M_{\text{R}} + M_{\text{Öl}})} \times 100 \%$$

Hierin bedeuten:

| | | |
|-------------------------|---|-------|
| $x_{\text{Öl, Anlage}}$ | Ölwurf des Verdichters | in % |
| $M_{\text{Öl}}$ | im Kältemittelkreislauf vorhandene Ölmasse | in kg |
| M_{R} | im Kältemittelkreislauf vorhandene Kältemittelmenge | in kg |

Zu beachten ist, dass in vielen Fällen z. B. der Ölwurf auf die Kältemittelmenge bezogen ist und nicht auf das Gemisch bestehend aus Öl und Kältemittel.

Zur bei der Untersuchung des Ölwurfes wurde der Ölgehalt in der Anlage schrittweise reduziert. Es wurde festgestellt, dass der Ölgehalt und das Öl-/Kältemittelverhältnis nicht übereinstimmen (siehe Bild 2). Teile des Öles befinden sich in den Bauteilen (hauptsächlich Verdichter aber auch in Ölsäcken). Bei Unterschreitung eines Verhältnisses von 7 % wurde ein Zusammenbruch des Ölwurfes beobachtet.

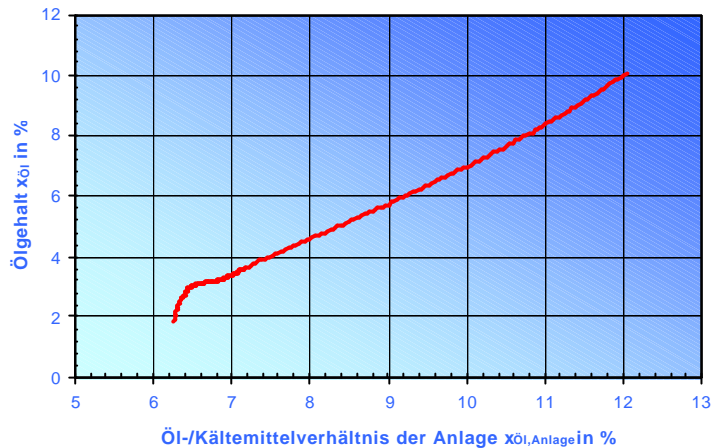


Bild 2. Ölgehalt (Ölwurf) und Öl-/Kältemittelverhältnis in der Anlage

4 Ölwurf eines Verdichters für Kfz-Klimaanlagen

Aus Bild 3 ist das typische Ölwurfverhalten eines Kfz-Verdichters bei unterschiedlichen Drehzahlen ersichtlich. Der Ölwurf wurde aufgezeichnet bei:

- Verdampfungstemperatur = 0 °C
- Überhitzung am Verdichtereintritt = 10 K
- Verflüssigungstemperatur = 54 °C

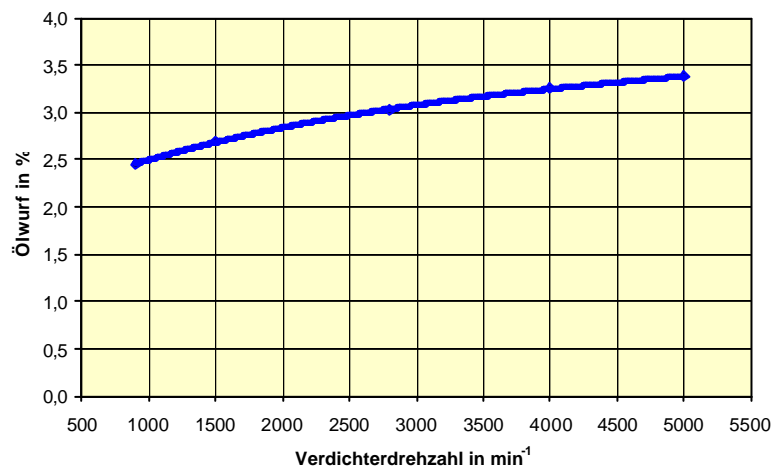


Bild 3. Ölwurf eines Kfz-Verdichters bei unterschiedlichen Drehzahlen und konst. t_o und t_c

Das in Bild 3 dargestellte Ölurfverhalten ist bei nahezu allen Verdichterbauarten ohne internen Öl- abscheider und im nicht „abgeregelten“ Betrieb tendenziell sehr ähnlich.

Im folgenden Bild ist der Ölurf in Abhängigkeit von der Überhitzung des Verdampfers dargestellt.

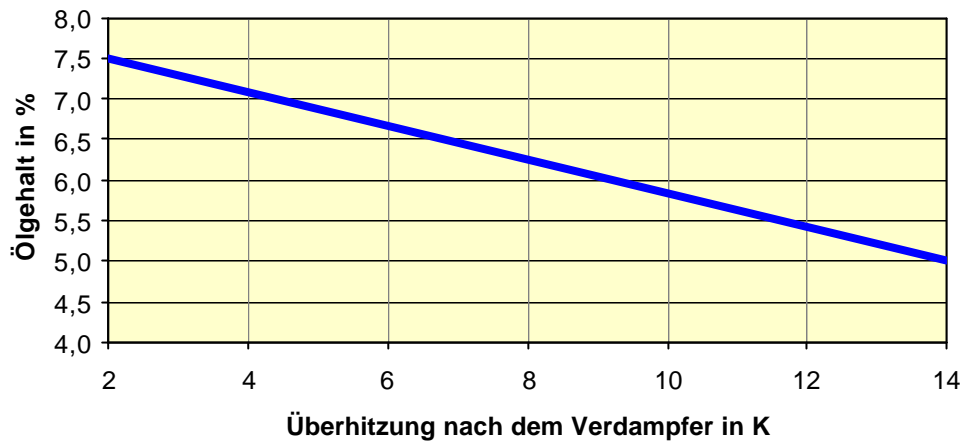


Bild 4. Änderung des Ölurfs bei konst. Öl- und Kältemittelmenge

Offensichtlich wird mit zunehmender Überhitzung der gesamte Kreislauf so beeinflusst, dass sich ein geringerer Ölurf einstellt.

Folgende Einflussgrößen sind hiervon betroffen:

- Viskosität des angesaugten PAG-Öls
- Ölfilmstärke
- Größere Kältemittelfüllmenge im Sammler
- Beeinflussung des Verdichtungsprozesses

5 Einflüsse des Öls auf den Kältemittelkreislauf

5.1 Rückkühleffekt durch erhöhte Ölanteile

Bild 5 zeigt auszugsweise das log p, h-Diagramm für R-134a mit eingezeichneten Kältemittelkreisläufen. Dargestellt sind jeweils zwei Kältemittelkreisläufe unter Verwendung unterschiedlicher PAG-Öle.

Je mehr Öl sich im Kältemittelkreislauf befindet, umso geringer fällt die Enthalpie am Verdichteraus- tritt aus. Es handelt sich hierbei nicht um den Einfluss der Verdichterleistungsaufnahme. Unterschied- liche Ölanteile wirken sich im allgemeinen kaum auf die Leistungsaufnahme des Verdichters aus. Eine Veränderung der Verdichterarbeit wäre lediglich bei einer Mangelschmierung des Verdichters zu erwarten. Eine Mangelschmierung würde hier zu einem exponentiellen Anstieg der Verdichtungs- endtemperatur führen. Demnach muss es sich um eine Reduzierung der Enthalpie am Verdichteraus- tritt aufgrund einer Kühlung des Kältemittels durch das Öl handeln.

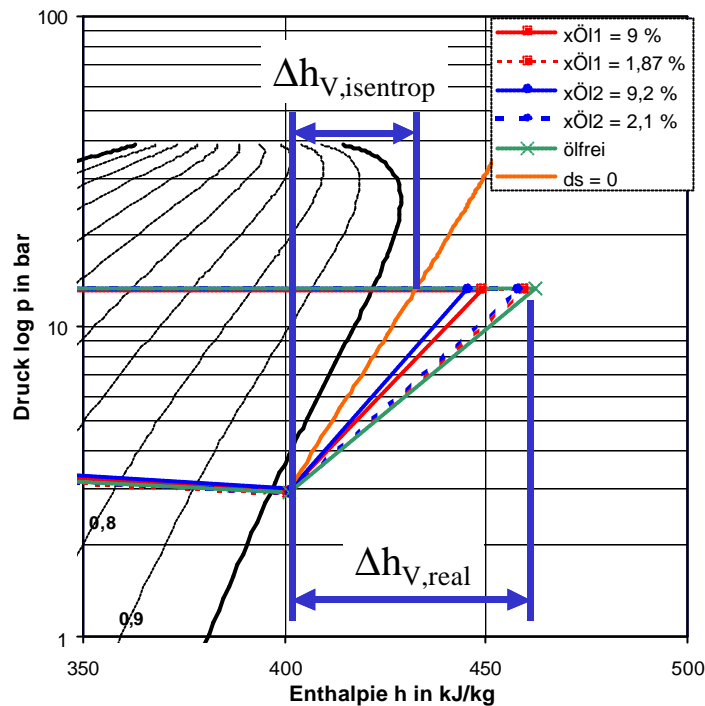


Bild 5. Zustand des Kältemittels vor und nach dem Verdichter bei unterschiedlichen Ölgehalten

Es ist deutlich der Unterschied zwischen der Enthalpiedifferenz w des Verdichters bei ölfreiem und ölbeladenen Fall ($x_{\text{Ö}12} = 9,2\%$) zu erkennen. Mit steigendem Ölanteil nähert sich der Verlauf der realen Verdichtung (Strecke zwischen Verdichterein- und Austritt) dem idealen Verdichtungsverlauf (Isentrope $ds = 0$) an. Die häufig verwendete Bewertung des Verdichters durch den Isentropenwirkungsgrad mit Hilfe des Verhältnisses der realen zur isentropen Enthalpiedifferenz wird durch das Öl verfälscht. Werte mit Verdichterwirkungsgraden von über 100 % sind bei hohen Ölanteilen keine Seltenheit. Soll der Verdichter korrekt bewertet werden, ist es erforderlich die mechanische Antriebsleistung des Verdichters zu messen und zur Bilanzierung zu verwenden.

Aus Bild 6 ist mit zunehmenden Ölanteil eine deutliche Reduzierung der Heißgastemperatur nach dem Verdichter ersichtlich.

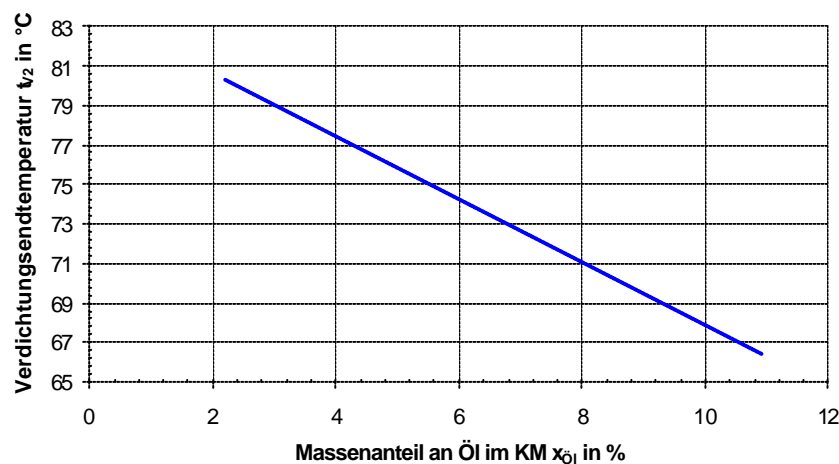


Bild 6. Tendenzuelle Reduzierung der Heißgastemperatur bei erhöhten Ölanteilen

5.2 Einfluss der Ölanteile auf die Druckdifferenz im Verdampfer

Je höher der Ölanteil ist, umso größer ist auch die Druckdifferenz im Verdampfer. Bezogen auf eine konstante Verdampfungstemperatur wirkt sich eine große Druckdifferenz negativ auf die Oberflächentemperatur und auch auf das Abkühlverhalten der Luft aus.

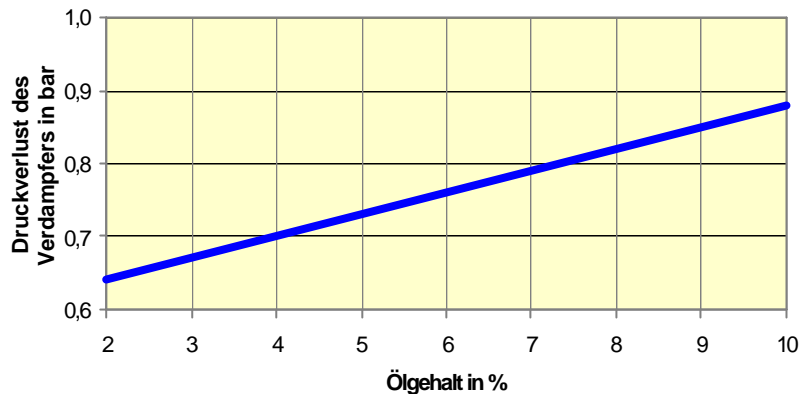


Bild 7. Druckdifferenz eines Verdampfers für Kfz-Klimaanlagen bei erhöhten Ölanteilen, t_o und t_{oL1} = konst.

5.3 Nutzbare Kälteleistung bei erhöhten Ölanteilen

Bei überschlägigen Betrachtungen ist es durchaus zulässig, dass zur Abkühlung des Öls zwischen Expansionsventileingang und Verdampferausgang folgende Bilanz aufgestellt wird:

$$\dot{Q}_{\text{Öl}} = \dot{m}_{\text{Öl}} \cdot (c_{p,\text{Öl}(t_{E1})} \cdot T_{E1u} - c_{p,\text{Öl}(t_{o2h})} \cdot T_{o2h})$$

Hierin bedeuten:

| | | |
|----------------------------|--|-------------|
| $\dot{Q}_{\text{Öl}}$ | Ölleistung | in kW |
| $\dot{m}_{\text{Öl}}$ | Ölmassenstrom | in kg/s |
| $c_{p,\text{Öl}(t_{E1})}$ | spezifische Wärmekapazität Öl, Eintritt Expansionsventil | in kJ/(kgK) |
| $c_{p,\text{Öl}(t_{o2h})}$ | spezifische Wärmekapazität Öl, Austritt Verdampfer | in kJ/(kgK) |
| T_{o2h} | Temperatur Verdampfer Austritt | in K |
| T_{E1u} | Temperatur Expansionsventil Eintritt | in K |

Die Kälteleistung reduziert sich damit um den Betrag, der zur internen Abkühlung des Öls im Verdampfer oder Expansionsventil benötigt wird. Dieser Ansatz ist zwar wissenschaftlich nicht zu 100 % korrekt, da im Öl noch Kältemittel gelöst ist. Das Berechnungsverfahren bietet aber eine ausreichende Möglichkeit zur vereinfachten Korrektur der nutzbaren Kälteleistung.

$$\dot{Q}_{o,\text{eff}} = \dot{Q}_{\text{KM}} - \dot{Q}_{\text{Öl}}$$

Hierin bedeuten:

| | | |
|--------------------------|---------------------------------------|-------|
| $\dot{Q}_{\text{Öl}}$ | Ölleistung | in kW |
| $\dot{Q}_{o,\text{eff}}$ | nutzbare Kälteleistung | in kW |
| \dot{Q}_{KM} | Kälteleistung des reinen Kältemittels | in kW |

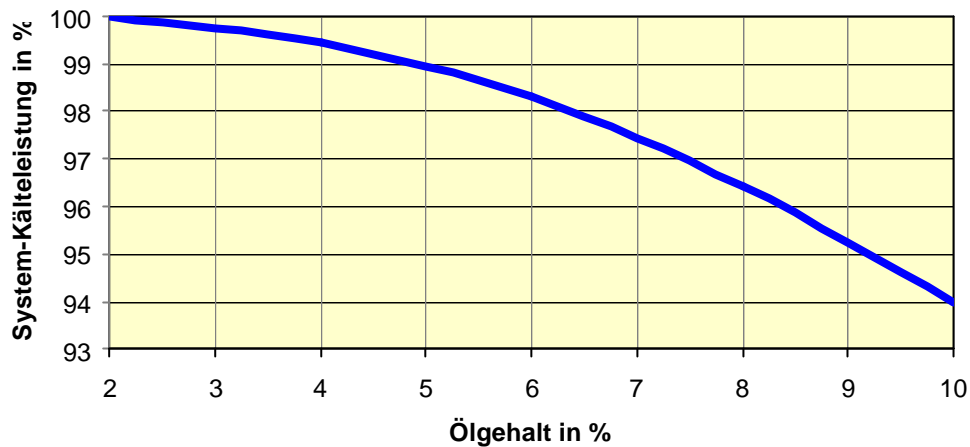


Bild 8. Änderung der nutzbaren Systemkälteleistung bei zunehmenden Ölanteilen

In Bild 8 sind Messwerte der nutzbaren Kälteleistung des Verdampfers einer Serien-Klimaanlage bei unterschiedlichen Ölanteilen dargestellt. Ölanteile bis zu 2 oder auch 3 % sind noch zu vernachlässigen. Ölanteile > 5 % wirken sich deutlich auf die effektive Kühlleistung aus. Je nach Ölsorte wirkt sich der Einfluss des Ölanteiles mehr oder weniger stark aus (siehe Bild 9).

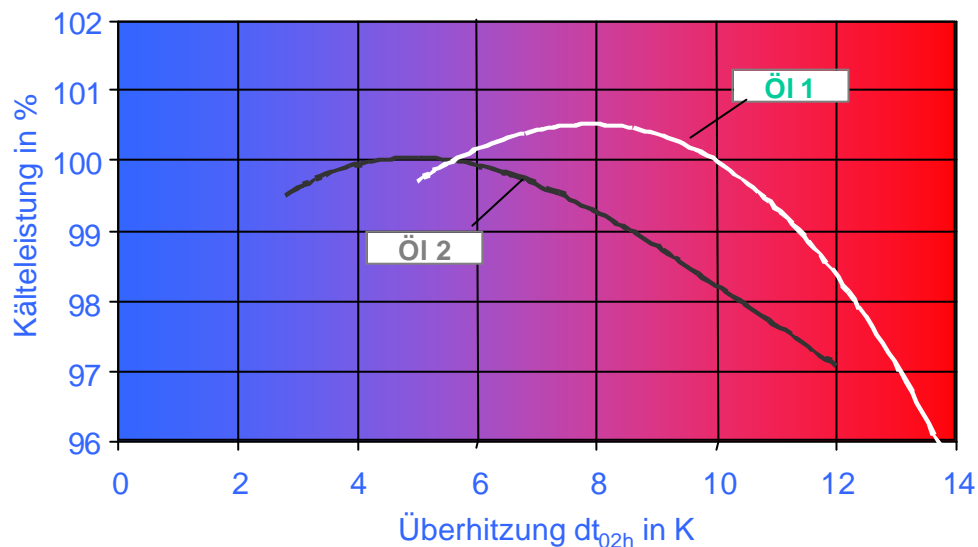


Bild 9. Änderung der nutzbaren Systemkälteleistung unterschiedlichen Ölen

5.4 Speichervermögen des Hochdrucksammlers

Bild 10 zeigt den Einfluss des Ölwurfs auf das Speichervermögen des Hochdrucksammlers. Bei der Messung wurde die Kältemittelfüllmenge der Anlage unter konstanten Betriebsbedingungen schrittweise erhöht. Der Betriebspunkt Füllmengenänderung 0 g bedeutet eine blasenfreie Strömung am Austritt des Sammlers. Der Anstieg der Unterkühlung kennzeichnet den Punkt an dem der Sammler vollständig gefüllt war. Bei geringerem Ölgehalt kann der Sammler wesentlich mehr Kältemittel puffern. Das Öl hat einen erheblichen Einfluss auf das Trennverhalten zwischen Dampfblasen und Flüssigkeit.

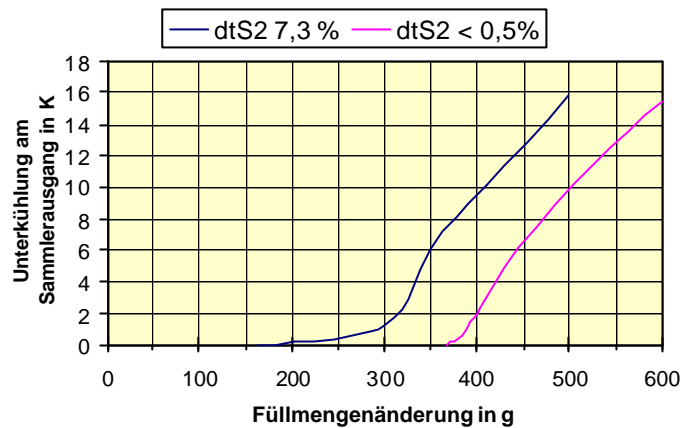


Bild 10. Speichervermögen des Hochdrucksammlers

6 Bestimmung des Ölgehaltes

Zur Bestimmung des Ölgehaltes werden folgende Verfahren verwendet:

- Ölproben nach DIN EN 328
- Bestimmung der Schallgeschwindigkeit
- Bestimmung des Brechungsindex

Nachfolgend wird das Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit erläutert. Der Schallsensor wird in die Flüssigkeitsleitung der Kälteanlage eingebaut und liefert ein kontinuierliches Messsignal. Das Signal wird von einer Auswerteeinheit in eine Schallgeschwindigkeit umgerechnet und steht danach zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Da der Schallsensor in der Flüssigkeitsleitung keinen nennenswerten Druckabfall erzeugt, kann er auch während der Messungen zugeschaltet bleiben und ermöglicht somit eine Echtzeitmessung. Um die Schallgeschwindigkeit des Messmediums einer bestimmten Ölkonzentration zuordnen zu können, muss zuvor eine Kalibrierung vorgenommen werden. Hierbei ist die Stoffpaarung, der Sättigungsdruck und die Kältemittelunterkühlung zu berücksichtigen.



Bild 11. Schallsensor der Fa. ANTON PAAR

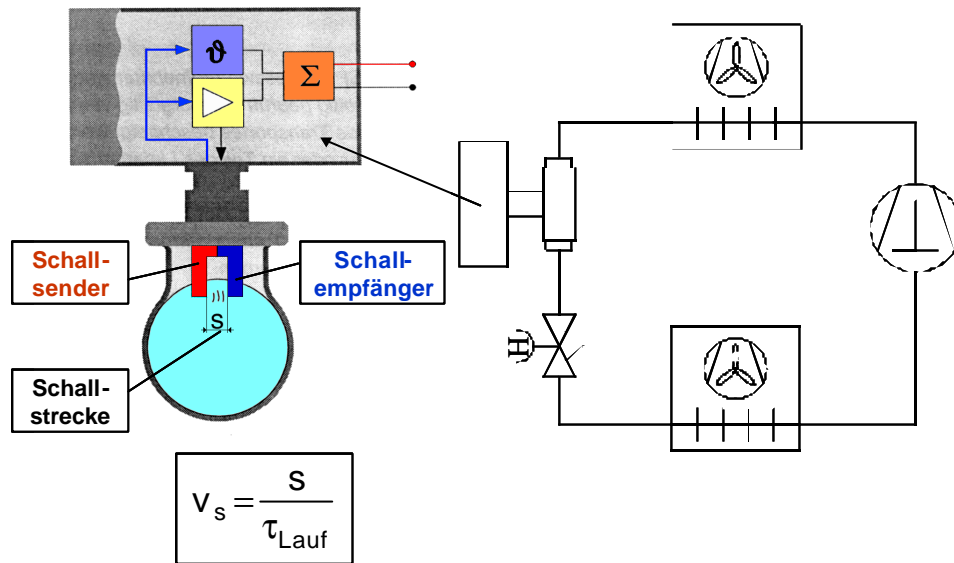


Bild 12. Kältemittelkreislauf mit eingebautem Schallsensor in der Flüssigkeitsleitung

Die Schallgeschwindigkeit eines Stoffes ist im wesentlichen von dessen Beschaffenheit und Zustand abhängig. Hierbei spielen die chemische Zusammensetzung, der Druck und die Temperatur eine Rolle. Kombiniert man zwei Stoffe unterschiedlicher Zusammensetzung, so entsteht ein Stoffgemisch mit einer gewissen Gemischdichte. Erhöht man den prozentualen Anteil eines Stoffes gegenüber dem anderen, so ändert sich damit auch die Gemischdichte.

Aus Bild 13 sind die Dichteunterschiede von flüssigem R-134a und einem PAG-Öl ersichtlich. Diese Angaben sind bezogen auf reine Stoffdaten. Sobald das PAG-Öl im flüssigen R-134a gelöst ist, stellt sich eine Gemischdichte ein.

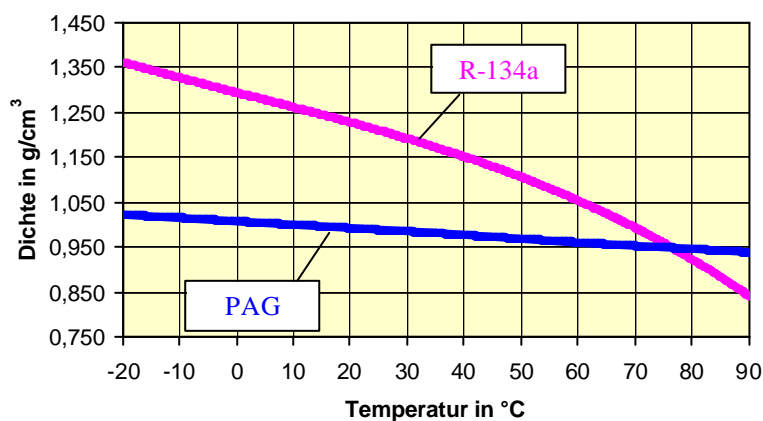


Bild 13. Dichte für flüssiges R-134a und PAG-Öl

Diese Dichteänderung hat eine Änderung der Schallgeschwindigkeit zur Folge. Wird die Schallgeschwindigkeit aufgenommen, so kann auf die Dichte und damit auf die prozentuale Zusammensetzung des Gemisches geschlossen werden.

Da durch den Verdichter Öl in den Kältemittelkreislauf gefördert wird und sich dort mit dem R-134a vermischt, entsteht eine solche Zusammensetzung. Der prozentuale Anteil des Öls im Kältemittel kann mit Hilfe der dort herrschenden Schallgeschwindigkeit bestimmt werden.

Neben der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Gemischttemperatur besteht eine weitere Beeinflussung durch den Druck im Kältemittel. In Bild 14 ist der Einfluss von Druck und Temperatur bzw. der Unterkühlung des R-134a dargestellt. Aus Bild 14 kann auch entnommen werden, dass zwischen der Unterkühlung des Kältemittels und der Schallgeschwindigkeit kein linearer Zusammenhang besteht. Bild 15 zeigt die Beeinflussung der Schallgeschwindigkeit durch unterschiedliche Ölgehalte.

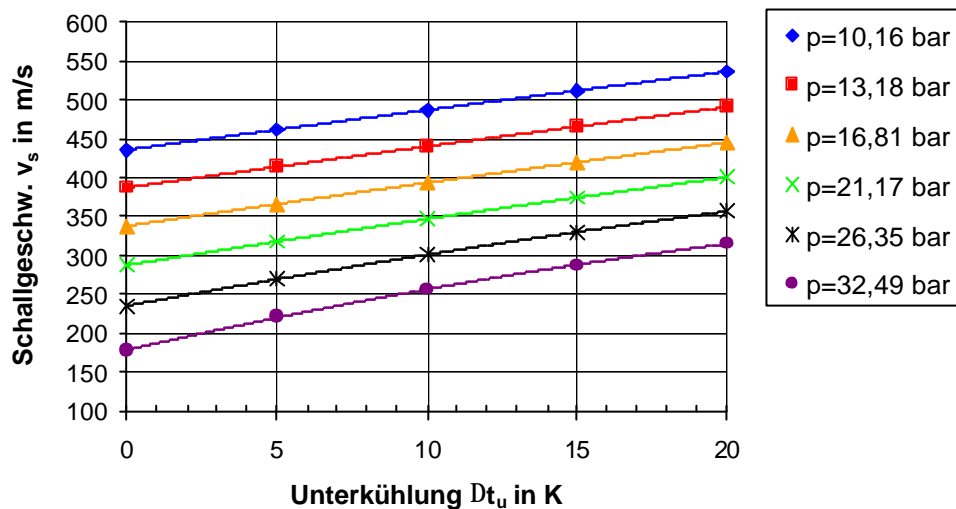


Bild 14. Schallgeschwindigkeit im flüssigen R-134a in Abhängigkeit von Druck und Unterkühlung

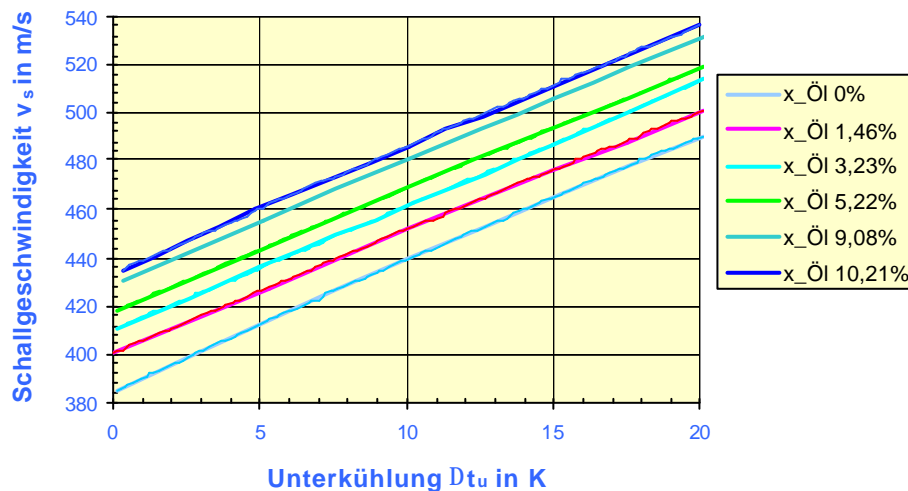


Bild 15. Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ölgehalt und der Unterkühlung

Nach erfolgter Kalibrierung des Schallsensors wurde die Genauigkeit der Messverfahren zur Bestimmung des Ölgehaltes durchgeführt. Die Ergebnisse sind aus Bild 16 ersichtlich. Als Kontrollmethode wurden Ölproben verwendet. Bei den Verfahren betrug die Abweichung bis maximal $\pm 0,4\%$. Diese Abweichung ist für den praktischen Betrieb hinreichend genau.

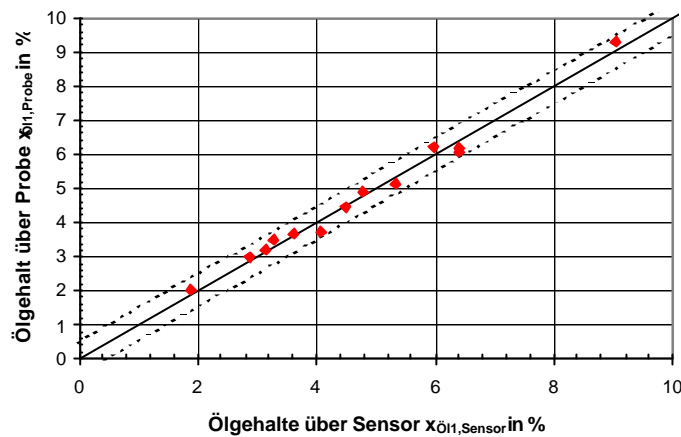


Bild 16. Abweichungen zwischen zwei unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung des Ölgehaltes

Beim zweiten Messverfahren wird ein Laserstrahl in eine Prüfkammer mit einem reflektierenden Boden geleitet. Gemessen wird der Brechungsindex des Mediums in der Prüfkammer. Dieser ist vom Medium (Zusammensetzung, Druck, Temperatur) abhängig. Nach geeigneter Kalibrierung kann über den Brechungsindex die Ölkonzentration im Kältemittel gemessen werden.

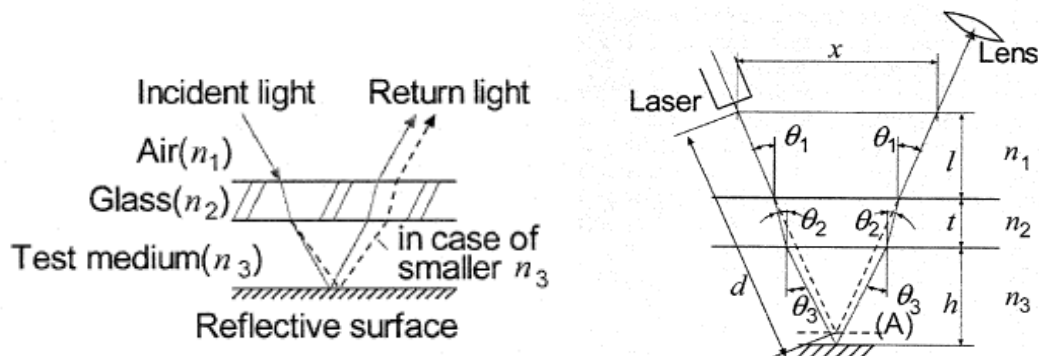


Bild 17. Ölkonzentrationsbestimmung mit Hilfe der Messung des Brechungsindex

Es ist unbedingt zu beachten, dass beide Verfahren nur bei einphasiger Strömung (reine Flüssigkeit, vollständige Mischbarkeit zwischen Öl und Kältemittel) angewendet werden können.

PAG-Öle zeichnen sich durch eine ausreichende Mischbarkeit und Löslichkeit mit R-134a aus. In Bild 18 ist die Mischungslückenkurve eines der häufigsten PAG-Öle dargestellt. Im schraffierten Bereich ist eine Mischung aus PAG und flüssigem R-134a nicht vollständig möglich. Beide Medien sind voneinander getrennt. Es ist zu beachten, dass die Temperaturen der Mischungslücke je nach Ölsorte um bis zu 30 K variieren können.

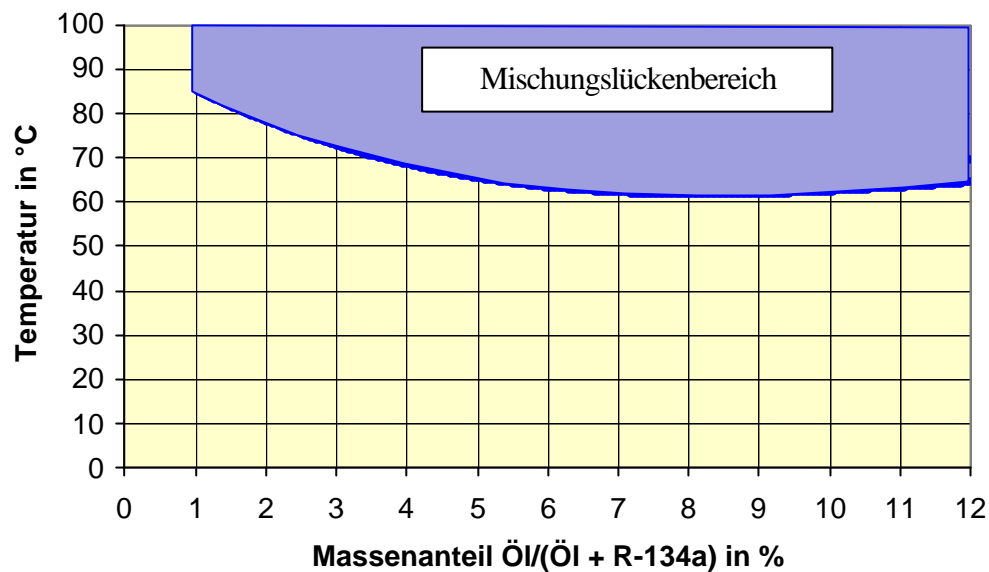


Bild 18. Mischungslückenbereich eines häufig eingesetzten PAG-Öls für Kfz-Verdichter

7 Literatur

- [1] Klug, P.: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Ölkonzentrationen im Kältemittel auf das Leistungsverhalten des Verdampfers, unter Zuhilfenahme eines kontinuierlichen Ölkonzentrationsmessverfahrens. FH-Karlsruhe/TWK GmbH, 2002
- [2] Burger, R, P. Klug: Untersuchung des Öleinflusses auf das Leistungsverhalten des Verdampfers einer Pkw-Klimaanlage. KI Luft und Kältetechnik 5/2002
- [3] Petz, M.: Einflüsse des Kältemaschinenöls auf das Leistungsverhalten einer Kfz-Klimaanlage. Vortrag auf der DKV-Tagung 2002, Magdeburg
- [4] Fukuta, M., T. Yanagisawa, S. Miyamura, Y. Ogi: Concentration measurement of refrigerant/refrigeration oil mixture by refractive index. International Journal of Refrigeration 27 (2004)
- [5] <http://www.anton-paar.com>: Informationen zum Schallsensor