

Schlüsselwörter: Kältemaschinenöl · Ölabscheider · Abscheidegrad · Prüfstand

Vom ILK Dresden wurde in Kooperation mit ESK Schultze ein Messprüfstand entwickelt, mit dem der Abscheidegrad von kältetechnischen Ölabscheidern bei unterschiedlichen Bedingungen relativ genau bestimmt werden kann. Mit der Vermessung einer Vielzahl von Ölabscheidern, u.a. neu entwickelte Ölabscheider von ESK Schultze, hat der Prüfstand seine Funktion erfolgreich nachgewiesen.

Test Rig for Measurement of Oil Separators

Keywords: refrigeration oil · oil separator · separation efficiency · test rig

ILK Dresden and ESK Schultze have developed a test rig for measurement of separation efficiency of oil separators for cooling devices. It works at different conditions with quite good accuracy. The test rig proved its functionality by measurement of several oil separators, also new developed oil separators of ESK Schultze.

Autoren



Dr.-Ing. Peter Röllig,
Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Dresden



Dipl.-Ing. Christian Köpp,
ESK Schultze, Velten

Prüfstand zur Vermessung von Ölabscheidern

Einleitung

In Kälteanlagen befindet sich neben dem zirkulierenden Kältemittel auch Kältemaschinenöl als wichtiger Hilfsstoff. Dieser übernimmt

- die Verdichterschmierung,
- die Abfuhr der im Schmierpalt entstehenden Wärme sowie
- die Abdichtung des Verdichterarbeitsraumes.

Mit dem verdichteten Kältemittel wird konstruktionsbedingt vom Verdichter immer ein gewisser, aber nicht gewünschter Ölanteil in den Kältekreislauf gefördert. Mit Hilfe eines Ölabscheiders, der dem Verdichter nachgeschaltet ist, wird das Öl wieder vom Kältemittel getrennt, so dass es zum Verdichter zurückgeführt werden kann.

Aus diesem Grund spielen Ölabscheider eine wesentliche Rolle im Kältekreislauf. Wird die Effektivität der Ölabscheider verbessert, hat dies vorteilhafte Auswirkungen auf den Kälteprozess insgesamt.

Umgekehrt führt mangelnde Ölrückführung zu erhöhtem Verschleiß des Verdichters und kann schließlich sogar Blockieren und Ausfall des Verdichters verursachen. Bei nicht optimal arbeitenden Ölabscheidern kann es zur ungewollten Verlagerung von Kältemaschinenöl in den Kältekreislauf kommen. Durch Öl bedingte schlechtere Wärmeübergänge mindern die Übertragungsleistungen im Verdampfer und Verflüssiger.

Folgen dieser nachteiligen Effekte für die Kälteanlage sind die Erhöhung der Betriebskosten sowie der Leistungsaufnahme und damit indirekt der CO₂-Emissionen.

Zielstellung muss sein, die Ölabscheider optimal abgestimmt auf die Kälteanlage und deren Betriebsparameter einzusetzen. Dies setzt allerdings die Kenntnis der Effektivität der Ölabscheider bei den unterschiedlichen Bedingungen voraus. Deshalb wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens¹⁾ am Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK Dresden) in Kooperation mit der Firma ESK Schultze GmbH & Co. KG ein Messprüfstand entwickelt und gebaut, mit dem die Ab-

scheidegrade von verschiedenen Ölabscheidern bei unterschiedlichen Betriebsparametern ermittelt werden können.

Eine erste Bewährungsprobe hat der Messprüfstand im Rahmen des Forschungsprojektes bereits mit der Vermessung einer Vielzahl von Ölabscheidern, die mit unterschiedlichen Abscheideprinzipien arbeiten, erfolgreich bestanden. Dabei wurden in erster Linie neu entwickelte Ölabscheider der Firma ESK Schultze vermessen.

Zusätzlich wurden umfangreiche Referenzmessungen an mehreren, marktüblichen Ölabscheidern verschiedener Hersteller durchgeführt. Diese Messergebnisse bilden eine objektive Vergleichdatenbasis für die quantitative Beurteilung der Wirksamkeit und Effektivität der bei ESK Schultze in Entwicklung befindlichen neuen Ölabscheider. Der Messprüfstand soll auch nach Abschluss des Forschungsvorhabens weiter genutzt werden.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen können die verschiedenen, am Markt verfügbaren Ölabscheider, die teilweise mit unterschiedlichen physikalischen Abscheideprinzipien arbeiten, besser beurteilt und effektiver für bestimmte Anwendungen und besondere Einsatzfälle ausgewählt werden. Bei Interesse bietet das ILK die Vermessung von Ölabscheidern künftig auch für Dritte an.

Als nützlicher Nebeneffekt lässt sich mit dem Messprüfstand auch der Ölwurf von Verdichtern bestimmen, der je nach eingestelltem Betriebspunkt ganz unterschiedlich sein kann.

Bei den durchgeführten Messungen wurden Ölwurfraten von ca. 1 bis 3 % ermittelt, in Einzelfällen, insbesondere bei tieferen Verdampfungstemperaturen wurden Ölwurfraten über 6 % festgestellt.

In den vorhandenen Prüfstand können Verdichter mit einem Fördervolumen bis ca. 25 m³/h eingebaut und bezüglich Ölwurf-rate untersucht werden.

Messprüfstand zur Ermittlung des Abscheidegrades von kältetechnischen Ölabscheidern

Bislang existiert kein einheitlicher Standard für die Bestimmung des Abscheidegrades von kältetechnischen Ölabscheidern. Auch werden die Angaben der Hersteller zu den

¹⁾ Förderprojekt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Projektträger AiF; FKZ: KF0012809ST5

Abscheidegraden ihrer Produkte nicht nach allgemein gültigen Grundsätzen ermittelt. In verschiedenen Normen bzw. Standards wird für die Bestimmung des Ölanteils ein diskontinuierliches Verfahren mit Entnahme des Kältemittel/Öl-Gemisches aus dem Kreislauf herangezogen. Dabei wird durch Ausdampfen des Kältemittels der Ölanteil gravimetrisch bestimmt.

Ökologische Belastungen können entstehen, wenn dieses Verfahren nicht fachgerecht durchgeführt und das Kältemittel in die Atmosphäre verdampft wird.

Kontinuierliche Verfahren z.B. auf Basis von Messungen der Schallgeschwindigkeit oder der Brechungszahl haben sich in der Praxis nicht durchgesetzt. Diese Verfahren sind mit vergleichsweise höherem Aufwand verbunden und setzen die exakte Kenntnis der Abhängigkeiten von Schallgeschwindigkeit bzw. Brechungszahl vom Ölanteil voraus.

Für das ILK bestand im Rahmen des Forschungsprojektes die Aufgabe, einen Messprüfstand zu entwickeln und zu bauen, mit dem auf möglichst einfache, praktikable Weise das Abscheideverhalten und die Effizienz der Ölabscheider für unterschiedliche Bedingungen bzw. Betriebspunkte quantitativ bestimmt werden kann.

Die Messungen sollen möglichst kontinuierlich durchgeführt werden können, ohne die Anlage bei jeder Messung für Probeentnahmen öffnen zu müssen.

Der geforderte Einsatzbereich für den Prüfstand liegt bei Kälteleistungen bis etwa 20 kW.

Die Verdampfungstemperaturen müssen in einem Bereich ab ca. $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Verflüssigungstemperaturen bis ca. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ variabel eingestellt werden können.

Hilfreich für die Bewältigung dieser Aufgabe waren die Tatsachen, dass das ILK in den letzten Jahren mit dem Bau einer Vielzahl von kältetechnischen Prüfständen für unterschiedliche Anwendungen umfangreiche Erfahrungen sammeln konnte, die für dieses Projekt genutzt werden konnten, sowie das bei ESK Schultze vorhandene theoretische und praktische KnowHow von Öreguliersystemen in industriellen Kälteanlagen. In Abb. 1 ist im sehr stark vereinfachten Schema der Aufbau des Messprüfstandes dargestellt.

Der Messprüfstand besteht aus einem vollständigen Kältekreislauf mit Verdichter, Verflüssiger, Expansionseinrichtung und Verdampfer.

Im Kreislauf befindet sich das Kältemittel R404A und das Kälteöl Reniso Triton SE55 (Fa. Fuchs).

Als Verdichter kommt ein halbhermetischer Hubkolbenverdichter HGX3/275-4S (Fa. Bock) mit einem theoretischen Fördervolumen von $24,1\text{ m}^3/\text{h}$ zum Einsatz.

Am Verflüssiger und Verdampfer sind Kühlwasser- bzw. Solekreisläufe angeschlossen, um die Verflüssigungswärme ab bzw. die Verdampfungswärme zuzuführen.

Im Kältekreislauf sind in Strömungsrichtung nach dem Verdichter ein Ölabscheider als Prüfling und danach ein weiterer Ölabscheider als Feinabscheider mit sehr hohem Abscheidevermögen eingebaut.

Die Prüflinge werden entsprechend der Messaufgabe jeweils gewechselt.

Der Feinabscheider arbeitet nach dem Koaleszenz-Prinzip und ist dauerhaft in den Prüfstand eingebaut.

Bevor der Bau des Prüfstandes begann, wurden mehrere in Frage kommende Metho-

den für die Bestimmung der Ölkonzentration im Öl/Kältemittel-Gemisch bzw. des Abscheidegrades der Ölabscheider gegeneinander abgewogen. Letztendlich wurde entschieden, die Ölabscheideruntersuchungen auf Basis mehrerer gleichzeitiger Massenstrommessungen durchzuführen. Dazu werden mit Coriolis-Messgeräten die Massenströme des abgeschiedenen Öles am Prüfling und am Feinabscheider sowie des Kältemittels in der Flüssigkeitsleitung ermittelt.

Normalerweise sollte der Feinabscheider den Kältemittelstrom nahezu vollständig von dem vorhandenen Kälteöl, das den Prüfling passiert hat, befreien.

Zur Kontrolle werden stichprobenartig Proben aus dem verflüssigten Kältemittel nach dem Verflüssiger entnommen, um den eventuellen Restölgehalt gravimetrisch zu bestimmen. Dafür ist in der Flüssigkeitsleitung in einem absperrbaren Bypass ein Probeentnahmebehälter eingebaut. Aus diesem Behälter können bei laufendem Betrieb die gefangenen Proben zur Analyse entnommen werden.

Die Proben werden gravimetrisch nach dem Restölgehalt analysiert. Durch eine Gegenanalyse mittels IR-Spektroskopie für eine Messreihe wurde die Genauigkeit der gravimetrischen Analysen mit guter Übereinstimmung bestätigt.

Im Sinne einer möglichst hohen Messgenauigkeit werden für jeden Messpunkt Proben aus der Flüssigkeitsleitung entnommen, nach dem Restölgehalt analysiert und die Bilanzen zur Bestimmung des Abscheidegrades mit den Analyseergebnissen der Proben rechnerisch korrigiert.

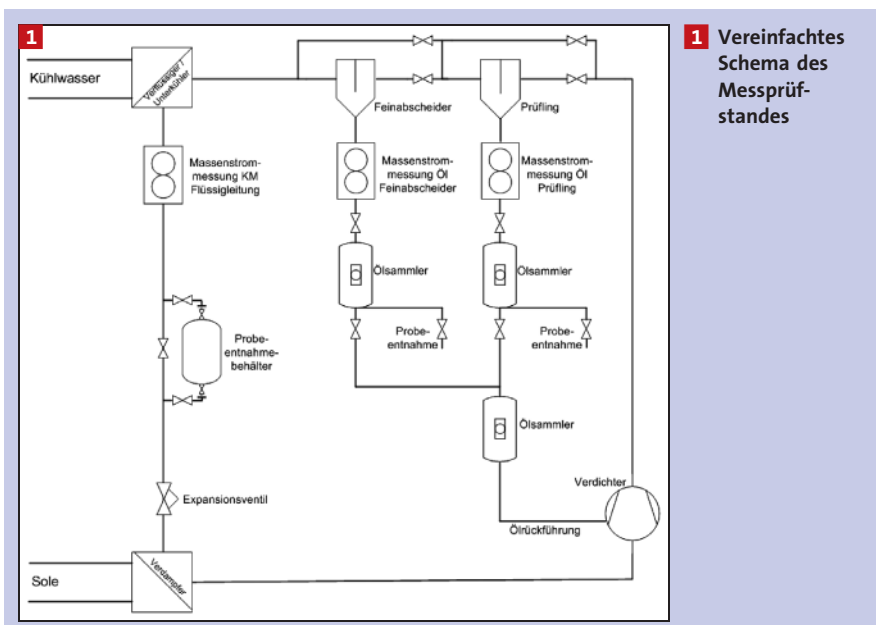
Bei den bisher durchgeführten Messungen lag der Restölgehalt in der Flüssigkeitsleitung entsprechend den vorliegenden Analyseergebnissen bei deutlich weniger als 1% des Gesamtdurchsatzes im Kreislauf.

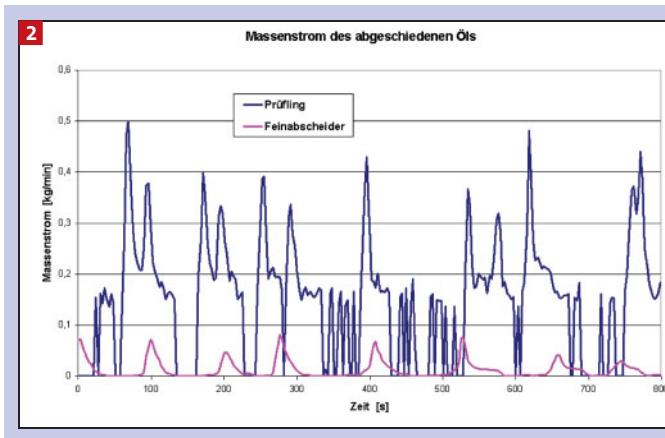
Da die Schwimmerventile der Ölabscheider diskontinuierlich öffnen und damit auch der Rückfluss des abgeschiedenen Öls diskontinuierlich ist, sind punktuelle Bestimmungen der Ölabscheideraten nicht möglich.

In der Abb. 2 sind Messwertaufzeichnungen von der diskontinuierlichen Ölrückführung aus den Abscheidern beispielhaft für einen Zeitraum von 800 Sekunden dargestellt.

Wegen dieser Diskontinuität müssen zur Ermittlung des Abscheidegrades für einen bestimmten Betriebspunkt Messungen über einen ausreichend langen Zeitraum bei stationär gleichbleibenden Parametern aufgenommen werden, wie die Beispiele in den Abb. 3a und 4a verdeutlichen sollen.

Im Anschluss werden die akkumulierten Mengen, die über den Messzeitraum mit den Massenstromzählern erfasst wurden, bilanziert,





2 Charakteristischer zeitlicher Verlauf der Ölrückführung von den Ölabscheidern

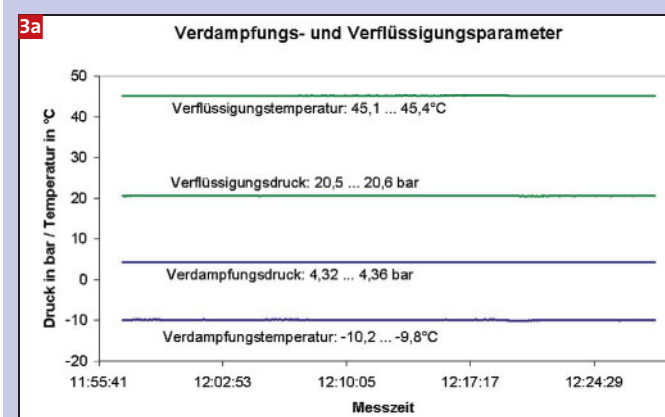
Während der Versuchsdurchführung werden alle Messwerte fortlaufend automatisch erfasst und in einer Messwertdatei gespeichert.

Bei den bisherigen Prüfdurchgängen wurden als Prüflinge Ölabscheider mehrerer Hersteller mit unterschiedlichen Wirkprinzipien vermessen: Schwerkraft-, Zentrifugalkraft-, Koaleszenzabscheider sowie die im Rahmen des Forschungsprojektes von Firma ESK Schultze neu entwickelten Ölabscheider. Die Messungen erfolgten jeweils für mehrere Temperaturen für Verdampfung im Bereich von -35 bis $+5$ °C sowie für Verflüssigung im Bereich von 40 bis 50 °C. Die Ergebnisse dieser umfangreichen Messungen sind in einem internen Bericht zusammengetragen.

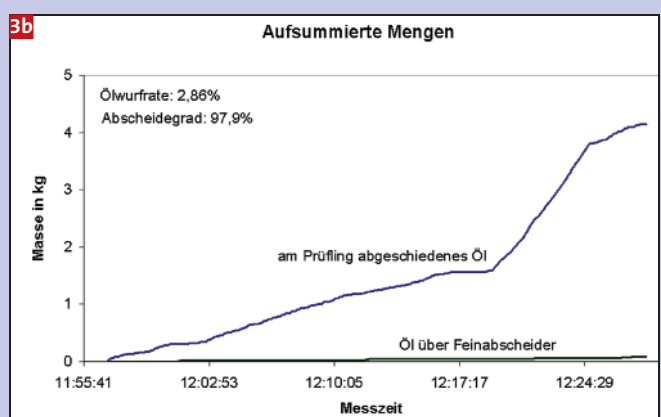
Beispielhaft sind in den Abb. **3a** und **b** sowie **4a** und **b** Ergebnisse von Messungen für zwei unterschiedliche Ölabscheider bei unterschiedlichen Messbedingungen dargestellt. Im ersten Beispiel (Abb. **3a** und **b**) findet die Verdampfung bei ca. -10 °C statt, die Verflüssigung bei ca. 45 °C. Die Ölwurfrate des Verdichters war bei dieser Messung mit ca. 2,9% relativ hoch. Der Ölabscheider erreichte einen Abscheidegrad von 97,9%.

um so die Abscheiderate des Prüflings bei diesem Betriebspunkt zu bestimmen. Nach den bisherigen Erfahrungen ist ein Messzeitraum von ca. 30 Minuten ausreichend, um repräsentative, reproduzierbare Werte für die Abscheiderate der Ölabscheider zu ermitteln. Sowohl für den Prüfling als auch für den Feinabscheider gibt es Bypassleitungen, um im Bedarfsfall die Ölabscheider umgehen zu können.

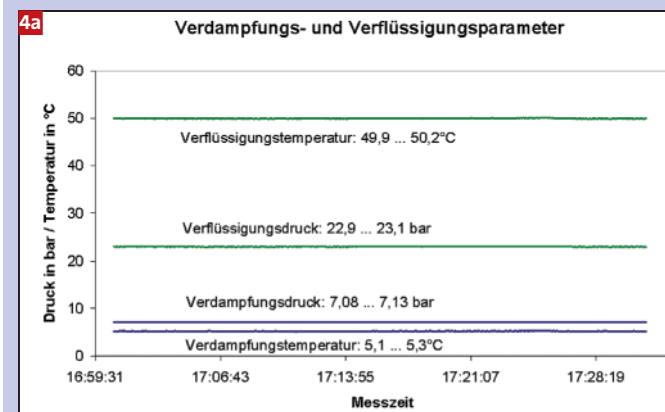
Das mit dem Prüfling und dem Feinabscheider abgeschiedene Öl wird jeweils in einem Ölsammler aufgefangen. An den Ölsammelgefäßen gibt es Druck- und Temperaturmessstellen sowie Probenentnahmemöglichkeiten, um das abgeschiedene Öl (respektive das Öl mit darin gelöstem Kältemittel) analysieren zu können. Darüber hinaus ist der gesamte Prüfstand mit zahlreichen Temperatur- und Druckmessstellen ausgerüstet.



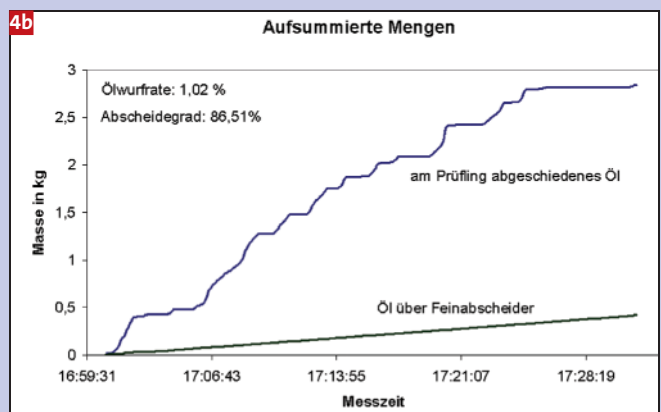
3a Beispiel 1 – Verflüssigungs- und Verdampfungsparameter



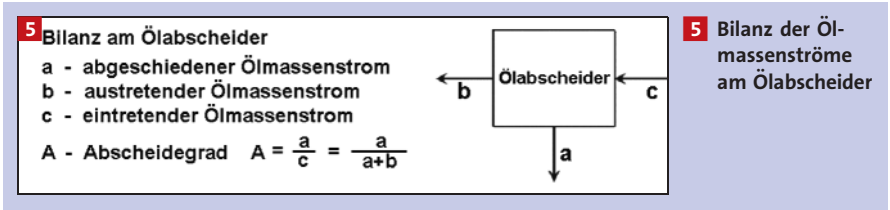
3b Beispiel 1 – Abgeschiedenes Öl über Prüfling und Feinabscheider



4a Beispiel 2 – Verflüssigungs- und Verdampfungsparameter



4b Beispiel 2 – Abgeschiedenes Öl über Prüfling und Feinabscheider



Im zweiten Beispiel Abb. 4a und b liegen Verdampfungs- und Verflüssigungsparameter mit ca. 5 °C bzw. 50 °C höher als im ersten Beispiel; die Ölwurfrate ist mit etwa 1 % geringer und der Abscheider arbeitet hier nur etwa mit 86,5 %.

Mit den bisher durchgeführten Messungen wurde die Funktionalität des Prüfstandes gut nachgewiesen.

Bestimmung des Abscheidegrades und Fehlergrenzen

Durch Bilanzierung der Ölmasseströme am Prüfling wird der Abscheidegrad ermittelt (Abb. 5). Dafür erfolgt die Messung des Massestroms a mit dem Coriolis-Massestromzähler am Prüfling, die des Massestroms b am Feinabscheider.

Die Bilanz gilt unter der Voraussetzung, dass der Anteil von im Öl gelösten Kältemittel für die Masseströme a und b gleich groß ist. Dies wurde hier angenommen, da am Prüfling und Feinabscheider nahezu identische Bedingungen für Druck und Temperatur und somit für die Löslichkeit des Kältemittels im Öl herrschen.

Die bei den Massestrommessungen auftretenden Messfehler Δa und Δb bestimmen den für den Abscheidegrad resultierenden Fehler ΔA.

Wie oben bereits beschrieben, wird der Massestrom b um den relativ geringen Restölanteil korrigiert, der sowohl Prüfling

als auch Feinabscheider passiert hat. Der Restölanteil wird durch Analyse der aus der Flüssigkeitsleitung entnommenen Probe ermittelt. Durch Berücksichtigung dieses Restölanteils verminderte sich der Fehler Δb bei den durchgeführten Messungen um durchschnittlich 5 bis 10 %, im Einzelfall auch darüber.

Entsprechend Abb. 5 gilt für den Abscheidegrad:

$$A = \frac{a}{c} = \frac{a}{a+b} \quad (1)$$

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte der Fehler für die ermittelten Abscheidegrade der untersuchten Ölabscheider bei maximal 0,2 % liegen. D.h. für den relativen Fehler ΔA/A besteht die Forderung:

$$\frac{\Delta A}{A} \leq 0,002 = \frac{\Delta A_{\max}}{A} \quad (2)$$

Aus Gleichung (1) ergibt sich als vollständiges Differential:

$$dA = \frac{\partial A}{\partial a} da + \frac{\partial A}{\partial b} db \quad (3)$$

bzw. mit den partiellen Ableitungen der Funktion $A = A(a,b)$ nach den Variablen a und b:

$$dA = \frac{b}{(a+b)^2} da + \frac{-a}{(a+b)^2} db \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) folgt für den absoluten Fehler des Abscheidegrades mit guter Näherung:

$$\Delta A = \left| \frac{b}{(a+b)^2} \right| \Delta a + \left| \frac{-a}{(a+b)^2} \right| \Delta b \quad (5)$$

Unter Verwendung der Gleichungen (1) und (5) sowie der mit (2) aufgestellten Forderung kann man schreiben:

$$0,002 = \frac{\Delta A_{\max}}{A} \geq \frac{\left| \frac{b}{(a+b)^2} \right| \Delta a}{\frac{a}{a+b}} + \frac{\left| \frac{-a}{(a+b)^2} \right| \Delta b}{\frac{a}{a+b}} \quad (6)$$

Die Vereinfachung von (6) unter Berücksichtigung, dass „a“ und „b“ stets Werte ≥ 0 annehmen, führt zu folgender Beziehung:

$$0,002 = \frac{\Delta A_{\max}}{A} \geq \frac{b}{(a+b)} \frac{\Delta a}{a} + \frac{b}{(a+b)} \frac{\Delta b}{b} \quad (7)$$

Mit Hilfe der Gleichung (7) lassen sich Abschätzungen bzw. Sensitivitätsanalysen

zu den zulässigen Messfehlern Δa/a und Δb/b vornehmen.

In Abb. 6 ist der Zusammenhang zwischen den relativen Messfehlern Δa/a und Δb/b für mehrere Abscheidegrade von 80, 82, ... 94, 96, 98 % beispielhaft dargestellt.

Dabei wurde die Bedingung eingehalten, dass der relative Fehler für die Berechnung des Abscheidegrades ΔA/A entsprechend der oben formulierten Bedingung (2) an der Obergrenze von 0,2 % liegt.

Es wird folgendes deutlich: Je größer der relative Messfehler für den Ölmassestrom vom Prüfling Δa/a ist, desto kleiner muss der Fehler für den Ölmassestrom vom Feinabscheider zuzüglich der Analyse der Probe aus der Flüssigkeitsleitung Δb/b sein, um die Fehlergrenze von maximal 0,2 % bei der Berechnung des Abscheidegrades einzuhalten. Umgekehrt gilt dieser Zusammenhang analog.

Bei höherem Abscheidegrad A vergrößert sich der Spielraum für die relativen Fehler Δa/a und Δb/b.

Entsprechend dem Verhältnis der Masseströme a und b sind für die abgeschiedene Ölmenge wertmäßig größere Messfehler Δa zulässig als für den aus dem Prüfling austretenden und am Feinabscheider sowie bei der Analyse gemessenen Ölmassestrom Δb.

Zusammenfassung

Im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit unterstützten Forschungsprojektes wurde am ILK Dresden in Kooperation mit ESK Schultze ein Messprüfstand zur Bestimmung der Abscheidegrade von kältetechnischen Ölabscheidern gebaut.

Mit dem Prüfstand kann auf einfache, praktikable Weise das Abscheideverhalten und die Effizienz der Ölabscheider für unterschiedliche Betriebsbedingungen mit relativ hoher Genauigkeit bestimmt werden.

Die Ermittlung des Abscheidegrades basiert im Wesentlichen auf mehrere simultane Massestrommessungen mit Coriolis-Messgeräten.

Bei der Vermessung einer Vielzahl von Ölabscheidern im Rahmen des Forschungsprojektes hat der Messprüfstand seine Funktionalität erfolgreich nachgewiesen.

Dabei wurden auch neu entwickelte Ölabscheider des Kooperationspartners ESK Schultze GmbH & Co. KG vermessen.

Der Messprüfstand soll auch nach Abschluss des Forschungsvorhabens weiter genutzt werden. Das ILK bietet die Vermessung von Ölabscheidern bzw. auch die Ermittlung der Ölwurfraten von Verdichtern auch für Dritte an.



6 Maximal zulässiger Messfehler für abgeschiedenen und austretenden Ölmassestrom bei unterschiedlichen Abscheidegraden