

DKV-Tagungsbericht 1994

Bonn

16. - 18. November 1994

Arbeitsabteilung II.2

Band II/2

**DKV-Tagungsbericht
21. Jahrgang**

**Deutscher Kälte- und
Klimatechnischer Verein e.V.
Pfaffenwaldring 10
D-70569 Stuttgart**

On-Line-Verschleißprüfung an Kältemittelverdichtern mit Radionuklidtechnik

Ch. Eifrig, P. Fehsenfeld*

Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH*

Zusammenfassung

Die Suche nach alternativen Kältemitteln und damit verbunden nach neuen Kältemaschinenölen erfordert eine schnelle und zuverlässige Einschätzung des tribologischen Verhaltens der Verdichter. Ein On-Line-Meßverfahren für Verschleißtests unter realen Betriebsbedingungen wird vorgestellt, das aufgrund seiner hohen Empfindlichkeit kurze Meßzeiten erlaubt.

1. Konventionelle Verschleißprüfung

Die Werkstoffauswahl erfolgt in Vorversuchen mit Modellprüfständen, z.B. Siebel-Kehl-Prüfstand /1/, Falectest /2/ und Almen-Wieland-Prüfstand /3/. Da die realen Verhältnisse (Druck, Drehzahl, wechselnde Schmierungsverhältnisse zwischen Anlauf- und Laufzeit) nicht ausreichend beschrieben werden, folgen Maschinenversuche /DIN8978/.

Bei den Maschinenversuchen werden nach Testende die Laufbilder und der Zustand der Ventile begutachtet, Veränderungen des Öls und des Kältemittels untersucht. Während des Maschinenlaufs können nur indirekte Indikatoren für das Verschleißverhalten, die elektrische Leistungsaufnahme, die Kälteleistung und der Schallleistungspegel, bestimmt werden. Dabei ist das Verschleißverhalten nur einer der Einflußfaktoren auf diese Größen. Die Zuordnung zu einer definierten Reibfläche ist nicht möglich.

2. RNT-Verschleißprüfung

Mit der Radionuklidtechnik (RNT) wird das dynamische Verschleißverhalten, insbesondere der Einlaufverschleiß, on line empfindlich gemessen.

Das Meßprinzip ist einfach darzustellen:

Markierung (vgl. Abb.1) einer präzise einstellbaren dünnen Schicht in der kritischen Zone des zu untersuchenden Kompressorteils am Karlsruher Zyklotron. Die hochentwickelte Technik ermöglicht die exakt definierte Markierung auch bei gekrümmten Flächen. Die kritische Zone sendet nach der Aktivierung eine gut meßbare Strahlung aus, so daß eine On-Line-Messung an der Maschine möglich ist. Die erzeugte Aktivität liegt unterhalb der vom Gesetzgeber festgelegten Freigrenze und ändert die mechanischen oder chemischen Eigenschaften der Bauteile nicht.

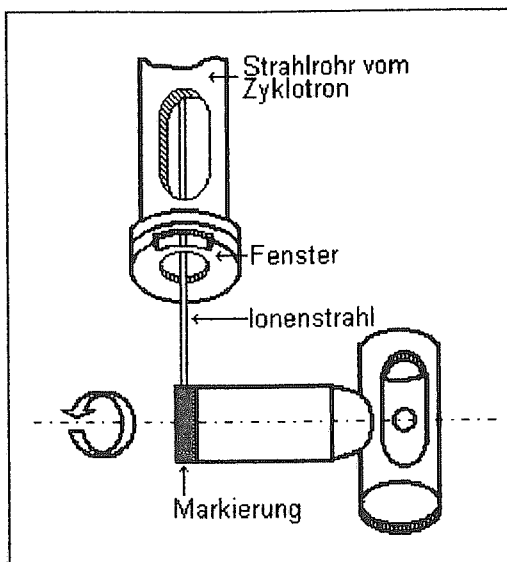


Abb. 1: Schematische Darstellung zur Markierung der kritischen Zone auf einem Kolbenmantel

Belastung des Verschleißteils unter realen Betriebsbedingungen. Das markierte Teil wird in den Kompressor eingebaut und der Testlauf auf dem Prüfstand gestartet. Setzt der Verschleißvorgang an der markierten Stelle ein und erfolgt ein Transport der Partikel weg von ihrem Entstehungsort, können sie mit Aktivitätssonden empfindlich gemessen werden. Man unterscheidet das Dünnschichtdifferenzverfahren (DDV) und das Konzentrationsmeßverfahren (KMV). Am Kompressor-Prüfstand ist das empfindlichere KMV eingesetzt. Die Verschleißpartikel werden mit dem Trägermedium (hier Öl-Kältemittel-Gemische) zu den Meßköpfen geführt und dort gut abgeschirmt gemessen.

Die Meßwertaufnahme erfolgt mit einem im KfK speziell für Verschleißmessungen entwickelten Gerät, das die hohen Anforderungen an Langzeitstabilität, Temperaturunabhängigkeit und die Aktivitätsmessung erfüllt. Die Meßwerte werden mit einem dazugehörigen Programm so umgesetzt, daß der Verschleißvorgang direkt während des Maschinenlaufs als dynamischer Prozeß erfaßbar und zusammen mit einem wählbaren konventionellen Parameter auf dem Monitor grafisch darstellbar ist.

Das Verfahren ist im Maschinen- und Anlagenbau international verbreitet und in der Literatur ausführlich mit Diskussionen der Vor- und Nachteile beschrieben /4, 5/.

Aufgrund der definierten Markierung an der kritischen Reibzone erfolgt eine selektive Erfassung des dynamisches Verschleißverhaltens über der Betriebszeit. Das ist mit keinem anderen Verfahren möglich.

Es handelt sich um ein rückwirkungsfreies Verfahren, das unter realen Betriebsbedingungen kontinuierlich arbeitet. Die hohe Nachweisempfindlichkeit führt dazu, daß nach kurzer Prüfzeit präzise Ergebnisse zu erlangen sind. Die relativ hohen Kosten des Verfahrens werden durch die Zeitersparnis bei der Komponenten-Entwicklung aufgewogen.

In einem Meßvorgang mit der Verschleißrate werden verschiedene Betriebsparameter erfaßt, gegf. variiert (z.B. Drücke, Temperaturen, Motorstrom).

Das Verfahren ist auf die meisten im Maschinen- und Anlagenbau eingesetzten Materialien einschließlich Sintermetalle und viele Keramikwerkstoffe anwendbar.

Nachteil der Methode ist, daß zusätzlich zum üblichen Arbeitsschutzaufwand Strahlenschutzvorkehrungen einzuhalten sind, die sich aber auf ein Mindestmaß beschränken, weil die Aktivität der Maschinenteile unterhalb der vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Freigrenze liegt.

3. RNT-Kompressor-Prüfstand

Für die effektive, zuverlässige Verschleißprüfung der kritischen Komponenten von Kältemittelverdichtern im Betrieb mit alternativen Kältemitteln und Kältemaschinenölen wurde ein automatischer Prüfstand entwickelt. Dieser ist industrietauglich und so ausgelegt, daß er von einem Techniker bedient werden kann. Die optimierte Radionuklid-Verschleißmeßtechnik des Prüfstandes ermöglicht eine On-Line-Auflösung von Nanometern bzw. Mikrogramm Abrieb des jeweils interessierenden Bauteils.

Verdichtungsdruck, Saugdruck, Motorstrom, Temperatur an der Motorwicklung, im Ölsumpf, in einer Druckkammer des Zylinderblocks, im Kältemittelmeßkopf, Raumtemperatur. Sie werden im PC verarbeitet und grafisch dargestellt. Ergänzend erfolgt eine Analoganzeige der Momentandrücke durch Manometer.

Der Kompressor kann im Start-Stop-Betrieb (Aussetzbetrieb) wie in Originalkälteanlagen laufen. Die Pausen- und Laufzeiten sind getrennt einstellbar von 1Sek. bis 99Std.

Grenzwertüber- bzw. -unterschreitungen der Kältemittel- und Öldrücke, des Kompressor- und Ölpumpenstroms aktivieren eine Anzeige und die automatische Abschaltung des Prüfstands.

Die Temperaturen im Ölsumpf und im Kältemittelmeßkopf sowie der Öldruck werden auf einen einstellbaren const. Wert geregelt.

Die Verschleißrate sowie die konventionellen Parameter sind lückenlos über der Laufzeit erfaßbar. Die On-Line-Darstellung auf dem Monitor des PC erfolgt in einem übersichtlichen XY-Diagramm mit zwei Y-Achsen. Jeweils ein frei wählbarer konventioneller Parameter wird der Y2-Achse zugeordnet, vgl. Abb. 3.

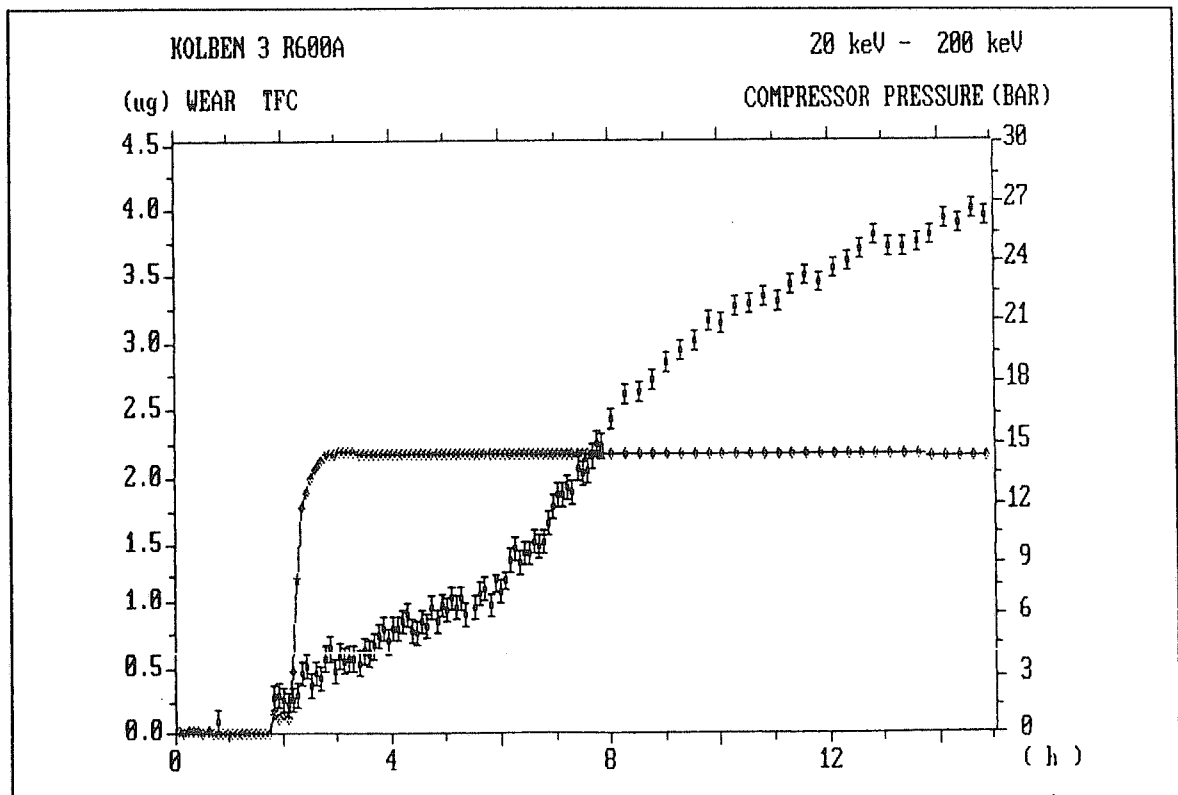


Abb. 3: On-Line-Darstellung eines Testlaufs mit R600a

X-Achse: Betriebszeit, Y1-Achse: Summe der Verschleißmasse in den drei Meßköpfen (Meßwerte mit Fehlerbalken dargestellt |),

Y2-Achse: Verdichtungsdruck (Meßwerte ◊)

3.3. Parameter des Prüfstands

Der Prüfstand wurde mit Hubkolbenverdichtern kleiner Leistung (Kälteleistung < 200W, geometrisches Fördervolumen < 1m³/h) mit den Kältemitteln R12, R290, R600a getestet. Dabei ergaben sich die in Tabelle 1 zusammengefaßten Parameter.

Tab. 1: Leistungsparameter des Prüfstands

Nachweisempfindlichkeit	0,2µg Verschleißmasse
Max. Verdichtungsdruck	40 bar
Max. Öldruck	30 bar

Der Prüfstand kann an Verdichter anderer Bauart und höherer Leistung angepaßt werden, wobei der Aufwand dafür vom Fördervolumen des Verdichters abhängt. Die Meßköpfe, die Meß-, Steuer- und Regeleinheiten, sind die aufwendigsten Teile des Prüfstands und für andere Anwendungsfälle verwendbar.

4. Messungen

Abb. 4 zeigt eine typische Einlaufverschleißkurve der geprüften Verdichter. Dargestellt ist die Summe der akkumulierten Verschleißmasse in den drei Meßköpfen über der Betriebszeit im Vergleich zum Verdichtungsdruck (Y2-Achse). Der steile Anstieg der Verschleißkurve nach Einschalten des Verdichters ist deutlich zu erkennen.

Abb. 5 zeigt den Gesamtverlauf einer Verdichterprüfung. Hier handelt es sich um die Prüfung einer kritischen Fläche auf dem Kolbenmantel. Der Einlauf geht in zwei Phasen vonstatten. Ab- und Anschalten des Verdichters verursacht einen Anstieg der Verschleißrate. Nach dem Einlaufen kann aus dem weiteren Anstieg nach einer vollständigen Versuchsauswertung die Abriebtiefe pro Jahr extrapoliert werden. Wird dieser Wert in Relation zum Spiel der Reibpaarung und zur Dicke evtl. Verschleißschutzschichten gesetzt, kann die mögliche Lebensdauer des Verdichters abgeschätzt werden.

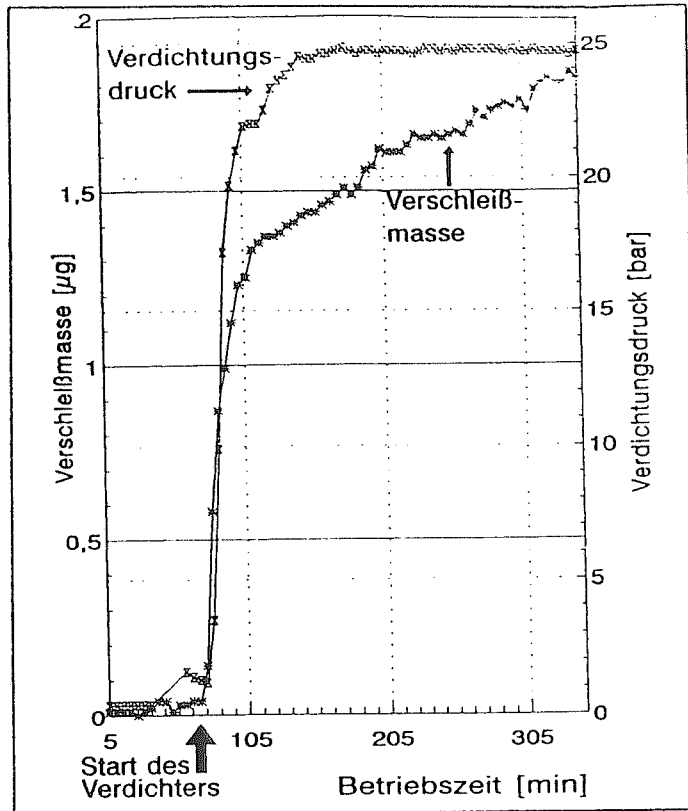


Abb. 4: Einlaufverschleißkurve eines Prüflaufs

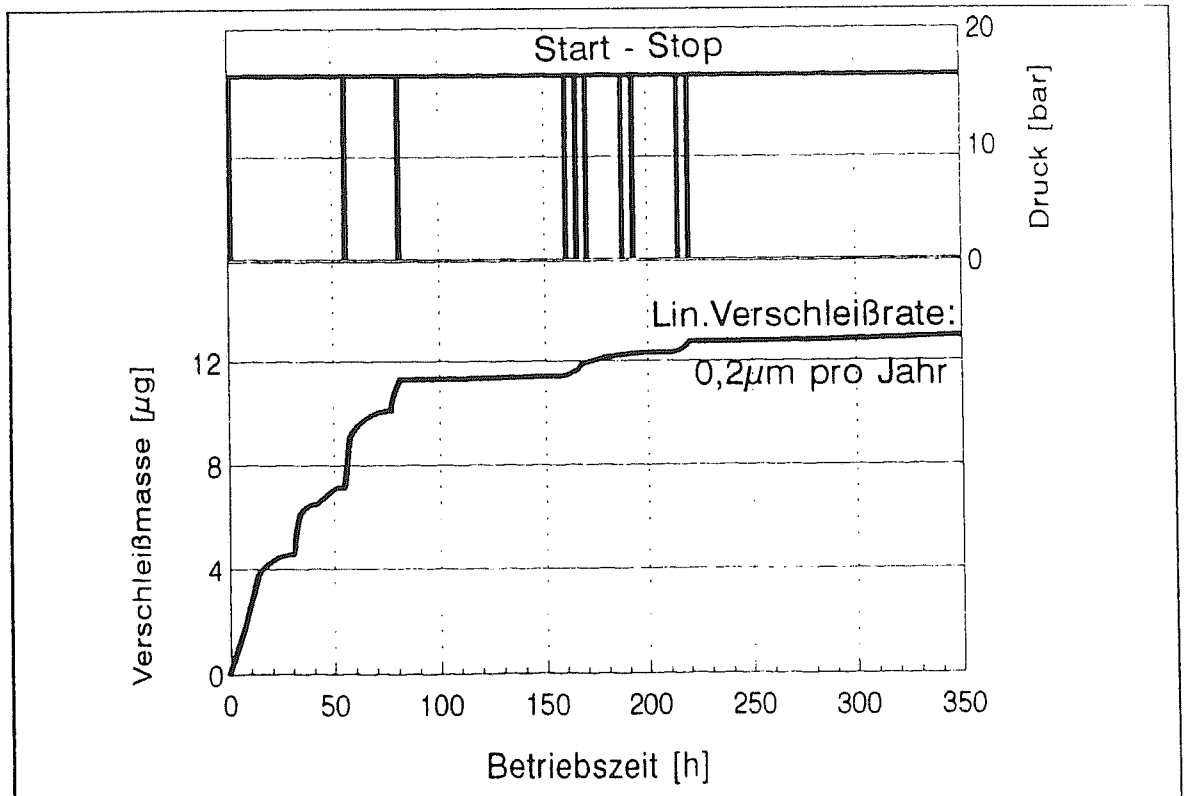


Abb. 5: Gesamtverlauf des Verschleißfortschrittes für die kritische Fläche des Kolbenmantels über der Prüfzeit (Kältemittel: R600a)

Der Start-Stop-Betrieb bewirkt einen kurzzeitigen Anstieg der Verschleißrate, vgl. Abb. 6. Dieses Diagramm zeigt auch, daß die Verschleißrate durch eine Erhöhung des Verdichtungsdruckes noch einmal steigt (erneuter Einlaufverschleiß). Die Meßwerte von Abb. 6 wurden mit eingelaufenem Verdichter bei geringer Belastung (Verdichtungsdruck 3/6 bar; Saugdruck 0,1 bar) gewonnen.

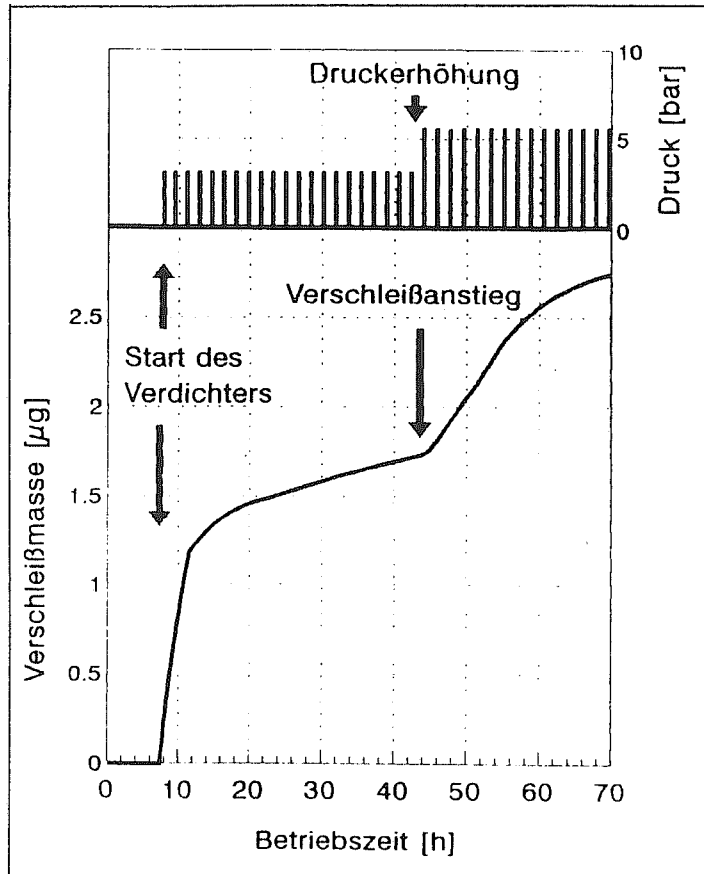


Abb. 6: Verschleißfortschritt für die kritische Stelle des Kolbenmantels über der Betriebszeit im Start-Stop-Betrieb nach Erhöhung des Verdichtungsdruckes

Ein weiterer Anstieg der Verschleißrate wird in dem gleichen Versuchslauf durch eine Erhöhung des Saugdruckes von 0,1 auf 1 bar bei gleichbleibender Kältemittelmasse bewirkt, vgl. Abb. 7. Der Anstieg ist so stark, daß die stufenweise Erhöhung im Start-Stop-Betrieb erkennbar ist.

Ein anschließender Dauerlauf des Verdichters ergänzt diesen Vorgang. Er bewirkt keine Veränderung der Verschleißrate, vgl. Gesamtdarstellung dieses Versuchs, Abb. 8.

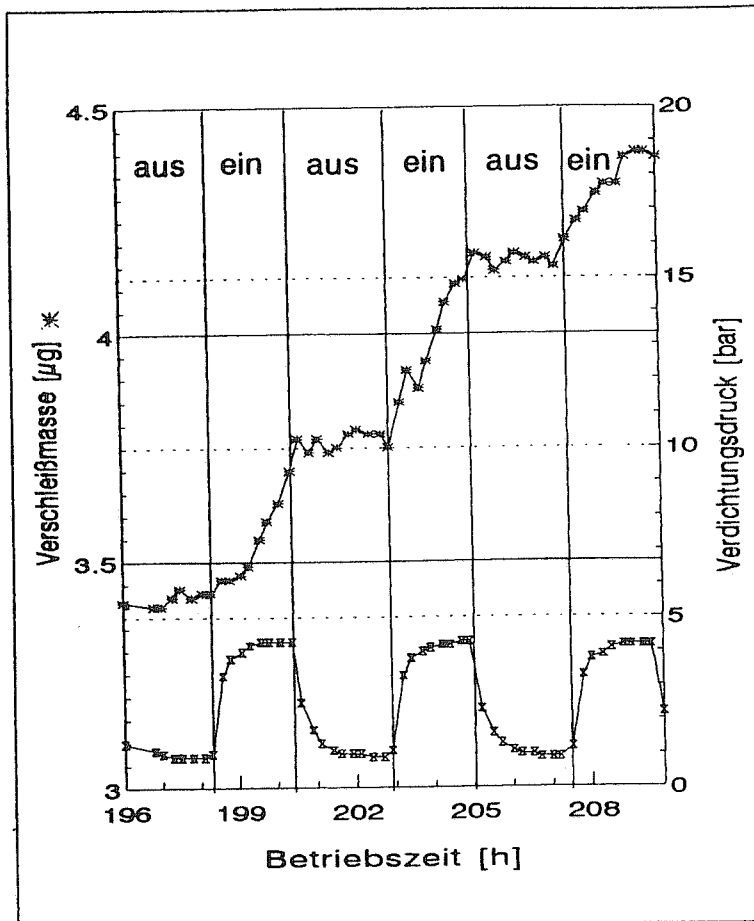


Abb. 7: Verschleißfortschritt für die kritische Stelle des Kolbenmantels über der Betriebszeit im Start-Stop-Betrieb

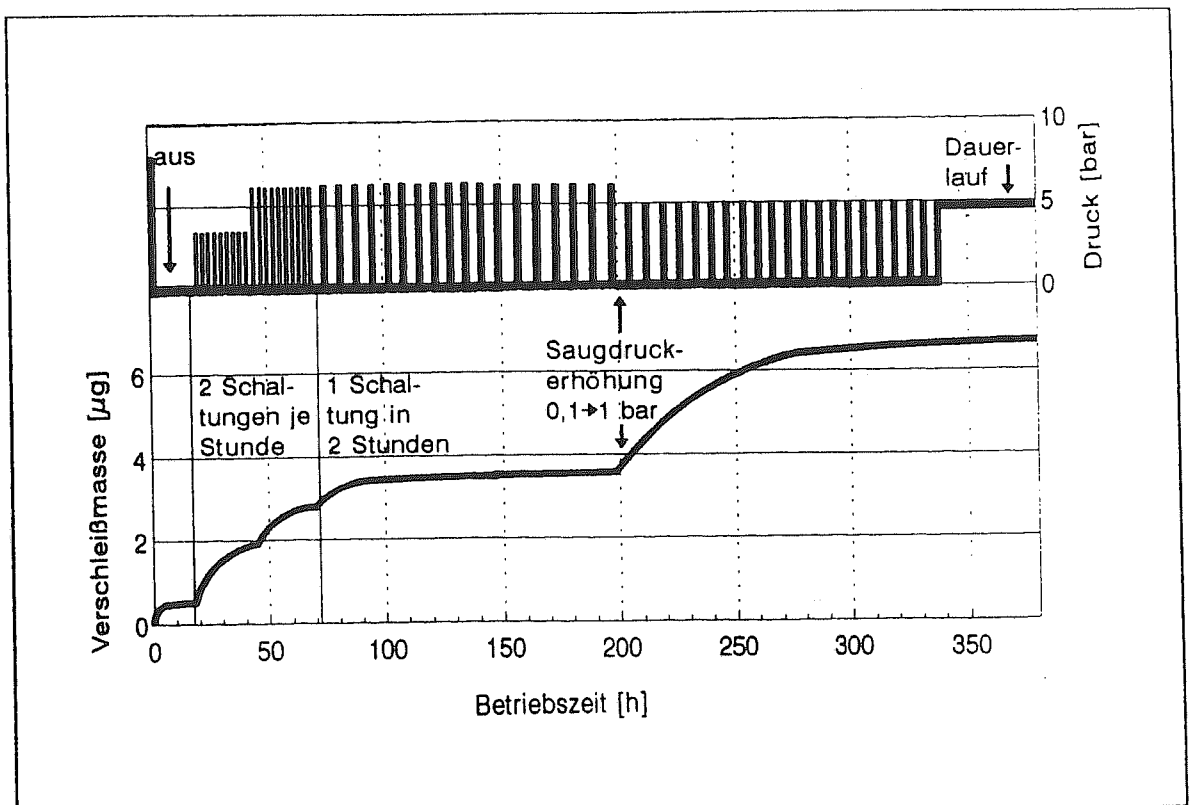


Abb. 8: Gesamtversuch im Start-Stop-Betrieb

5. Einsatzbereich

Das Verfahren dient der tribologischen Optimierung von Komponenten der Kälteanlage:

Untersuchung der Abhängigkeit der Verschleiß- und Korrosionsvorgänge

- von der konstruktiven Auslegung der Anlage,
- vom Kältemaschinenöl,
- vom Kältemittel (Prüfung der drop in-Tauglichkeit in einem Versuch möglich),
- vom Verdichtungs- und Saugdruck,
- von der Schalthäufigkeit des Kompressors sowie der Lauf- und Stillstandsdauer.

Die Methode dient weiterhin dem Vergleich und der Qualitätsbeurteilung von Zulieferteilen sowie der Standzeitbestimmung von kritischen Anlagen-Komponenten.

Der Prüfstand kann an die Testbedingungen von Verdichtern höherer Leistung bzw. anderer Bauart angepaßt werden.

Er ist für die On-Line-Verschleiß- und Korrosionsmessung an der gesamten Kälteanlage geeignet.

Weiterhin ist durch geeignete Markierung die Ölverschleppung in der Kälteanlage quantitativ nachweisbar.

Literatur

- /1/ Franke, R. und I. Haase: Werkstoffpaarung GGL-20 / C 4SN; Tribologie + Schmierungstechnik, 40. Jahrg. (1993) Nr. 2, S. 75 / 82
- /2/ Kitaichi, S. et al.: Tribological Analysis of Metal Interface Reactions in Lubricant Oils / CFC 12 and HFC 134a System; Proceedings of the ASHRAE CFC Conference Purdue 1990
- /3/ Lippold, H. und S. Reinhold: Untersuchungen an ammoniaklöslichen Schmierstoffen, Teil 2: Tribotechnische und maschinentechnische Untersuchungen; DIE KÄLTE und Klimatechnik, 46. Jahrg. (1993) Nr. 10, S. 690 / 698
- /4/ Fehsenfeld, P., A. Kleinrahm und E. Bollmann: Radionuklidtechnik im Maschinenbau zur Verschleiß- und Korrosionsmessung in Industrie und Forschung KfK-Nachr., 18. Jahrg. (1986) Nr. 4, S. 224 / 234
- /5/ Fehsenfeld, P., A. Kleinrahm und H. Schweikert: Radionuclide Technique in Mechanical Engineering in Germany; Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, VOL. 160, No. 1 (1992), S. 141 / 151