

# Lebensdauerersuche mit diamantbeschichteten Gleitringdichtungen für Kesselspeisepumpen

## Versuchsbeschreibung und erste Ergebnisse

Helmut Jaberg o.Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Helmut Benigni, Dipl.-Ing. Dr. Techn.

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen  
Technische Universität Graz  
Kopernikusgasse 24  
A – 8010 Graz

[helmut.jaberg@tugraz.at](mailto:helmut.jaberg@tugraz.at)

<http://hfm.tugraz.at>  
+43 316 873 7571



### Kurzfassung

Gleitringdichtungen von Kesselspeisepumpen unterliegen vielfach der Elektrokorrosion, die nach vergleichsweise kurzen Betriebszeiten von ca. 1000 bis 2000 oder weniger Stunden zum Ausfall der Gleitringdichtungen führen und deren Tausch erzwingen. Eine Abhilfe besteht in der Beschichtung der Gleitflächen mit kristallinem Diamant. Zur Überprüfung der Wirksamkeit und Haltbarkeit der Beschichtung muss vor dem breiten Einsatz im Kraftwerk die Praxistauglichkeit nachgewiesen werden. Dazu wird in diesem Artikel der Aufbau eines dauerlauffähigen Prüfstands beschrieben, der die Betriebsbedingungen von Kesselspeisepumpen im Kraftwerk exakt nachbildet. Neben der Geometrie des Dichtungsraums und der Gleitgeschwindigkeit sind auch Drücke und Temperaturen sowie Leitfähigkeit des Mediums exakt der Wirklichkeit nachgebildet, teilweise sogar noch strenger gehandhabt. Die Prüfstandskonzeption wird beschrieben, ebenso die Vorversuche, mit denen zunächst das übliche Schadensbild bei Verwendung herkömmlicher Siliziumkarbidichtungen auch auf dem Prüfstand erzeugt und die Übereinstimmung mit der Praxis bewiesen wird. Der Prüfstandsbetrieb wird beschrieben, und erste Ergebnisse der Dauerlaufversuche mit diamantbeschichteten Gleitringdichtungen nach bis zu 16000 Betriebsstunden werden gezeigt.

## Problembeschreibung

Seit Hydrazin als Korrosionsinhibitor wegen seiner Gesundheitsgefährdung verboten wurde, treten bei den Gleitringdichtungen von Kesselspeisepumpen vorher nicht gekannte Korrosionserscheinungen auf. Als Grund hat sich die Elektrokorrosion herausgestellt, weil die Relativbewegung zwischen Gleit- und Gegenring zu statischen Aufladungen führt, die durch die sehr niedrige Leitfähigkeit des Kesselwassers von unter einem Mikro-Siemens pro cm [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] im Unterschied zu früher nicht mehr abgeleitet werden. Ohne näher auf die Wirkmechanismen im Einzelnen einzugehen, sei an dieser Stelle nur das Ergebnis vermerkt, dass nämlich innerhalb kurzer Betriebszeiten, teilweise weniger hundert Betriebsstunden, fingerkuppengroße Stücke aus dem Gleit- und/oder dem Gegenring herausbrechen (Bild 1) und zu rapidem Anstieg des Leckstroms führen, was einerseits wegen der Wirkungsgradeinbuße, andererseits wegen der nicht mehr gewährleisteten Betriebszuverlässigkeit inakzeptabel ist und zu einem Reparaturstillstand mit den damit verbundenen und leider bestens bekannten hohen Kosten führt, hauptsächlich wegen des Produktionsausfalls.



**Bild 1: Typische Schäden an herkömmlichen Gleitringdichtungen**

Es gibt durchaus verschiedene Ansätze, dieser Misere Abhilfe zu verschaffen. Z.B. versuchen manche Hersteller mit einer welligen Oberflächenprofilierung der Gleitflächen dem Problem beizukommen. An dieser Stelle werden Versuche mit einem anderen Lösungsansatz berichtet, nämlich dass mit anderen Materialien an den Gleitflächen gearbeitet wird. Im Speziellen sind bei den hier beschriebe-

nen Versuchen die Gleitflächen mit kristallinem naturidentischem, jedoch künstlich hergestelltem Diamant [1, 2] beschichtet. Die Versuche sind praxisidentisch, sowohl was mechanische Daten wie z.B. Größe, Drehzahl, Anordnung angeht, als auch was die Betriebsbedingungen wie z.B. Medium, Leitfähigkeit, Druck und Temperatur angeht.

### Diamantbeschichtete Gleitringdichtungen

Diamantbeschichtete Gleitringdichtungen werden natürlich auch in anderen Anwendungen außer Kesselspeisepumpen eingesetzt. Die hervorragenden Eigenschaften resultieren aus den außergewöhnlichen Eigenschaften (s.Tab.1), die auch amorphen Diamant (DLC diamond like carbon) und erst recht das an sich zu Recht gelobte Siliziumkarbid noch weit übertreffen. Als Grundmaterial fungiert nach wie vor Siliziumkarbid, auf das kristalliner Diamant mit einer Dicke von mehreren Mikrometern aufgebracht wird.

|                                 | Diamant   | DLC         | SiC       |
|---------------------------------|-----------|-------------|-----------|
| Härte HV                        | 10000     | 3000 – 5000 | 2500      |
| Reibkoeffizient                 | 0,1 – 0,3 | 0,1 – 0,3   | 0,6 – 0,8 |
| E-Modul GPa                     | 1140      | 220         | 400       |
| Wärmeleitfähigkeit W/mK         | 2000      | 100         | 100       |
| Wärmeausdehnung $10^{-6}K^{-1}$ | 1,3       | n.a.        | 4 -6      |

**Tabelle 1: Eigenschaften von kristallinem Diamant im Vergleich zu amorphem Diamant DLC und Siliziumkarbid [1]**

Verantwortlich für die ausgezeichnete Haltbarkeit der diamantbeschichteten Gleitringdichtungen ist die Kombination aus sehr hoher Härte verbunden mit der hohen Elastizität. Durch die hohe Härte hält der Werkstoff den elektrischen Feldkräften stand, die aus der statischen Aufladung und Spannungsbelastung resultieren. Infolge des niedrigen Reibungskoeffizienten wird die statische Aufladung - wegen der stark reduzierten Reibung – minimiert. Und die sehr gute Wärmeleitfähigkeit vermeidet lokale Überhitzung und damit Thermospannungen, zumindest werden diese ganz erheblich reduziert. Gleichzeitig ist die Wärmeausdehnung der Diamantbeschichtung nicht zu unterschiedlich zu dem Trägerstoff Siliziumkarbid, so dass stets – auch bei Temperaturbelastung - eine gute Verbindung zwischen diesem und der Beschichtung gegeben ist.

### Prüfbedingungen

Für die Prüfung von neu entwickelten Gleitringdichtungen mit Diamantbeschichtung für Kraftwerkspumpen und Kesselspeisewasser hat das Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der TU Graz einen Prüfstand für Dauerversuche aufgebaut mit einer 100% exakten Nachbildung des Gleitringdichtungsraums und Betriebsverhältnissen, die 100% exakt mit der Wirklichkeit übereinstimmen, allenfalls im Zweifel strenger festgelegt wurden. Der Wellendurchmesser wurde zu 170

mm gewählt und die Drehzahl zu 5700 UpM, beides Werte die bei großen Kesselspeisepumpen vorgefunden werden.

Arbeitsmedium ist vollentsalztes Wasser mit einer Leitfähigkeit von maximal  $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Um diese Wasserqualität im Dauerversuch nachprüfbar zu gewährleisten, wurde eine automatische Wasseraufbereitung mit einem Ionenaustauscher realisiert. Die Wassertemperatur wird bei  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) konstant gehalten und der Wasserdruck auf der Druckseite mit  $p = 40 \text{ bar}$ .

Der Versuchsstand ist dauerlauffähig und wird durchgehend ohne Unterbrechung betrieben, lediglich ca. alle drei Monate wird der Prüfstand für einige Stunden angehalten, um die Wälzlager des Motors zu wechseln, in noch größerem Abstand werden die Kartuschen des Ionenaustauschers gewechselt. Alle betriebsrelevanten Daten werden permanent aufgezeichnet und fernüberwacht.

### Prüfstandskonzept

Die Prüflingskonzeption führte zu einer beidseitig gelagerten Einheit, die über eine Kupplung von einem überfrequent laufenden Motor angetrieben wird (siehe Bild 2), die Umfangsgeschwindigkeit an der Gleitringdichtung beträgt bei der angegebenen Drehzahl von 5700 UpM und dem Wellendurchmesser von 170 mm 50 m/s.

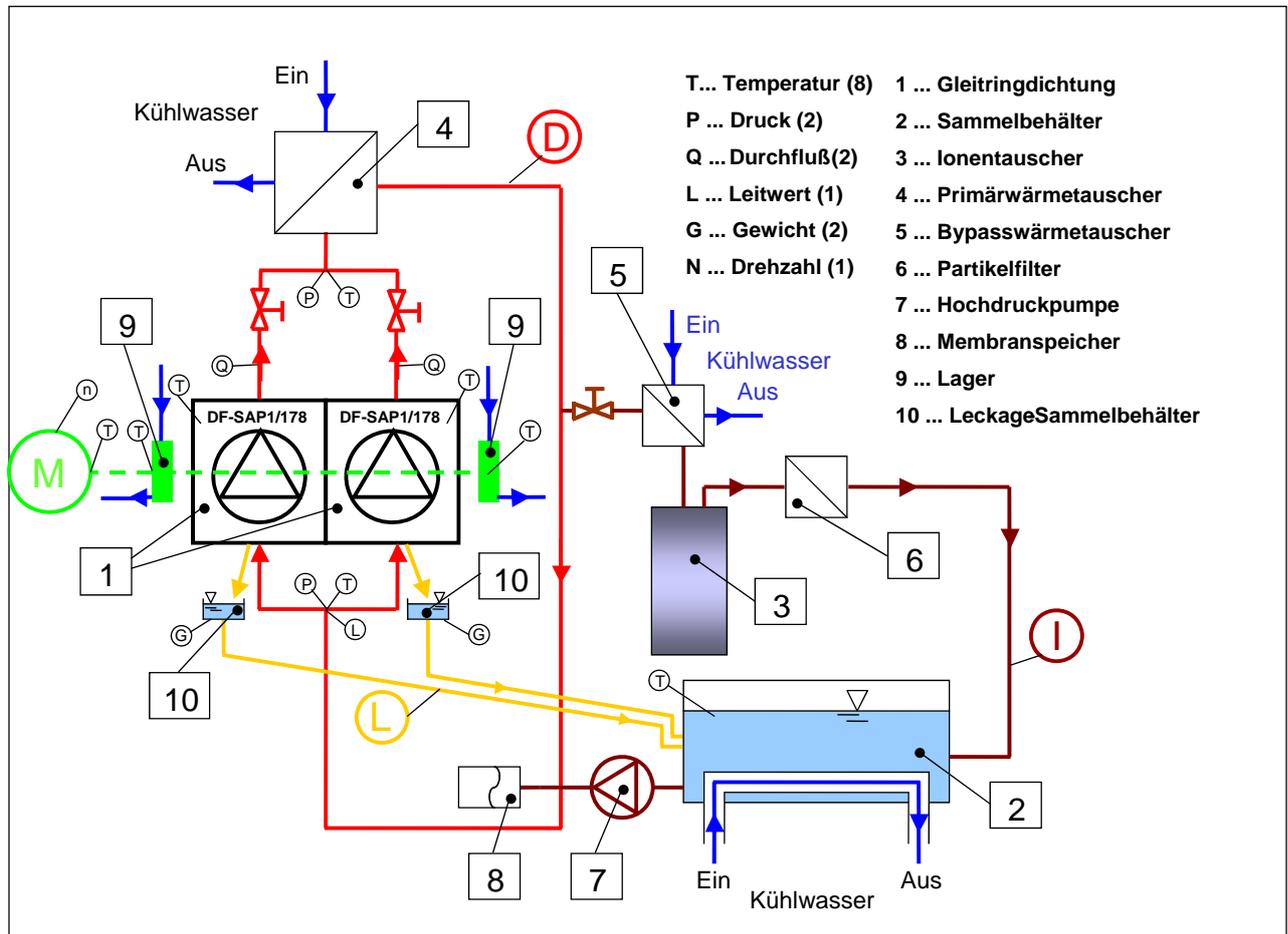
In Bild 3 ist das Schaltprinzip schematisch dargestellt. Es gibt drei Kreisläufe: Der druckbeaufschlagte Kreislauf der Medienseite (D in Bild 3), der Ionisierkreislauf I sowie der Leckagekreislauf L. Die beiden Gleitringdichtungen (1 in Bild 3)

werden auf der Medienseite mit dem geschlossenen Kreislauf D beaufschlagt. Die Leckage L wird im Behälter 2 gesammelt und über die Hochdruckpumpe 7, die auch das Druckniveau aufrechterhält, wieder der Medienseite zugeführt. Der Umlauf im Medienkreislauf wird durch den Mitnahmeeffekt der rotierenden Dichtungsringe bewirkt, die dann wie eine Reibungspumpe wirken. Ein Teil I (Bild 3) des Medienkreislaufs D wird stets entnommen und über einen Kühler 5, einen Ionenaustauscher 3 und einen Partikelfilter 6 dem Leckagebehälter 2 zugeführt, über den dieser Teilstrom mittels der Pumpe zusammen mit der Leckage wieder der Medienseite zugeführt wird. Damit wird die Leitfähigkeit, die zusammen mit Druck und Temperatur bei der Eintrittsverzweigung in die zwei Dichtungsräume permanent gemessen wird (Stellen p, T, L in Bild 3), dauernd überwacht und eingestellt.



**Bild 2: Prüfstandsübersicht, links Kühlung, Mitte: Wasseraufbereitung (blau) – darüber Datenloggerschaltschrank, rechts Prüfling mit Antriebsmotor, darunter Leckagemessung**

Die Volumenströme des Medienkreislaufs durch jede der beiden Dichtungen werden nach dem Austritt aus den beiden Dichtungsräumen gemessen (Q), die Temperatur und der Druck an der Zusammenführung der beiden Teilströme (p,T). Bei den mechanischen Komponenten wird die Motorleistung, die Drehzahl sowie die Lagertemperaturen des Motors und der Lagerungen 9 des Dichtungs-trägers permanent überwacht und aufgezeichnet.



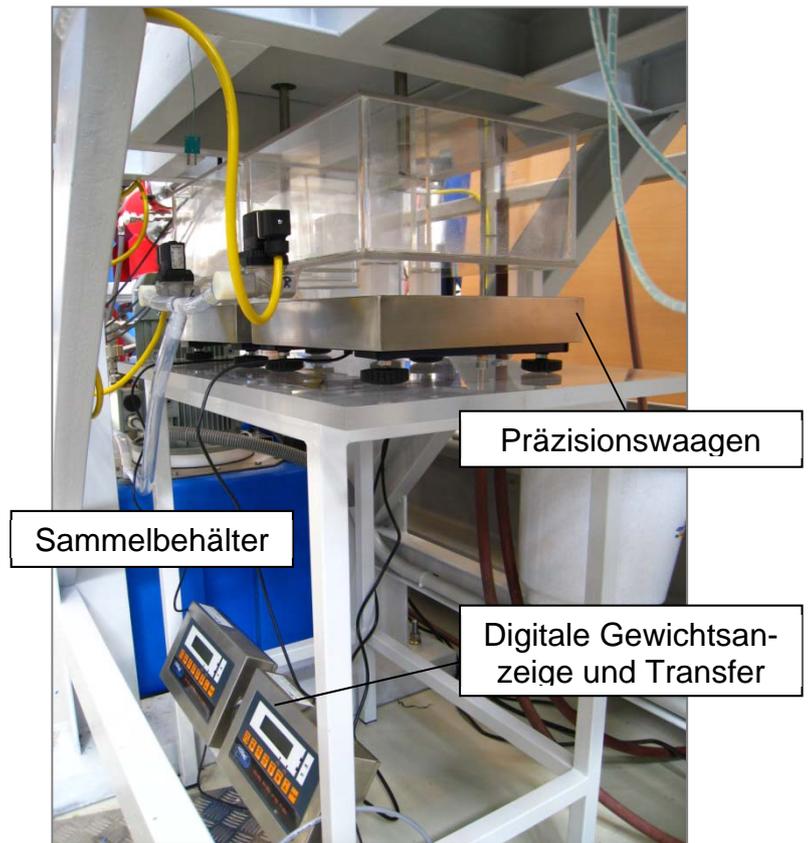
**Bild 3: Prüfstandkonzept**

Die Leckage wird nach dem atmosphärensseitigen Austritt aus beiden Dichtungen in zwei Behältern 10 über den Zeitraum von 10 Minuten gesammelt (Bild 4, Bild 5), gewogen und dann durch automatische, drei Minuten dauernde Ventilöffnung in den Sammelbehälter 2 entleert. Die Leckage wird dann als zeitliches Mittel aus dem Endgewicht bezogen auf das Zeitintervall des Leckagesammelns berechnet (Bild 5). Der Prüfstand produziert etwa 40 kW an Abwärme, wozu neben dem bereits erwähnten Kühler 5 im Ionisierkreislauf ein Kühler 4 im Medienkreislauf D angeordnet ist sowie eine Kühlschlange in den Sammelbehälter 2 eingebaut. Diese vier Kühlleitungen werden zusammengefasst und in einen Wasser-Wasser-Wärmetauscher (links in Bild 2) geleitet, von dem aus die abgeführte Wärme mit einer Warmwasserleitung einem weiter weg angeordneten Wasser-Luft-Wärmetauscher zugeführt wird, der die erwärmte Abluft sommers über Dach und winters in die Ver-

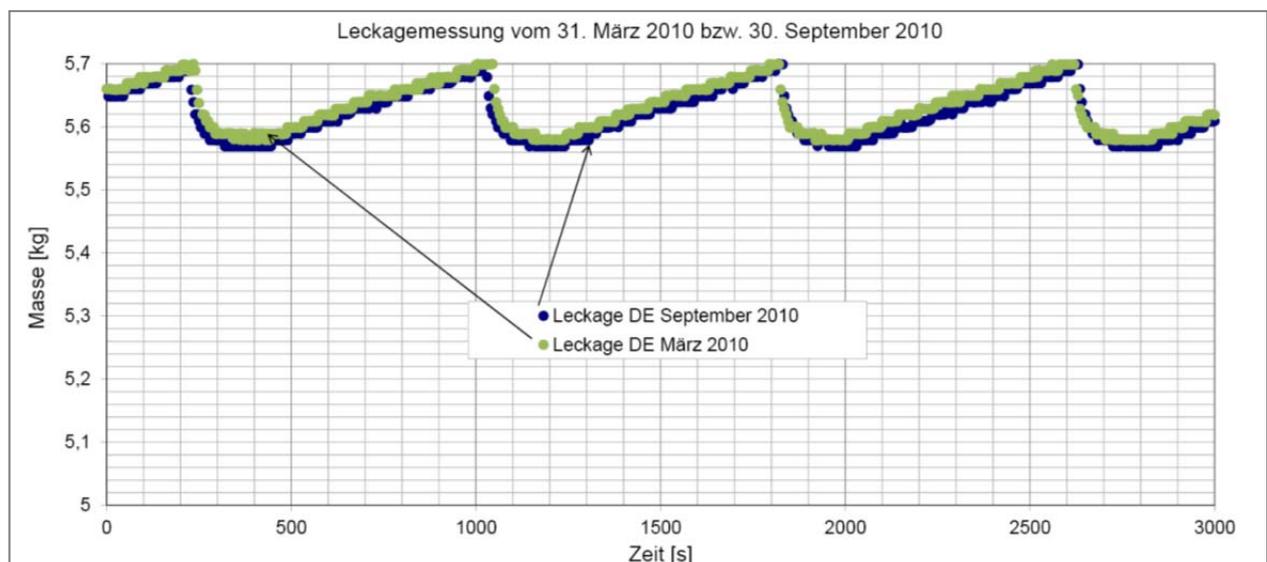
suchshalle ableitet. Die Temperatur im Primärkreislauf wird auf konstanter Temperatur gehalten, unabhängig von der herrschenden Außenumgebungstemperatur. Die beiden Lager 9 des Dichtungsträgers werden gesondert über einen 100 m<sup>3</sup> Wasserbehälter gekühlt und auf etwa 40° gehalten

Mit der bereits genannten Leitfähigkeit von 0.1 µS/cm liegt man gegenüber der Spezifikation und den Bedingungen im Kraftwerk etwa um den Faktor 10 niedriger und hat somit in dieser Hinsicht sogar noch erheblich strengere Bedingungen geschaffen, als sie in Wirklichkeit der Gleitringdichtung konfrontiert werden.

Der Prüfstand wurde steuerungstechnisch für 24h Dauerbetrieb ausgelegt und für mannlosen Betrieb optimiert. Die überwachten Daten können über Netzwerk jederzeit abgefragt werden. Für kritische Zustände wurden Abschaltgrenzen definiert, die den Prüfstand kontrolliert niederfahren.



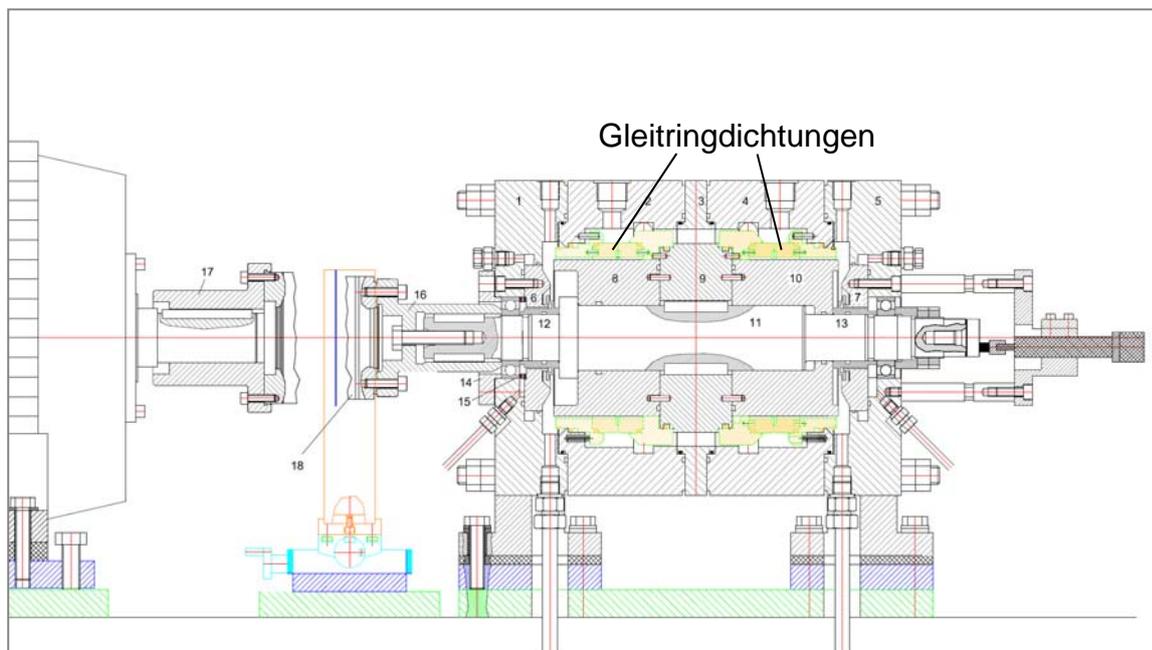
**Bild 4: Anordnung der Präzisionswaagen zur Leckagebestimmung**



**Bild 5: Ermittlung der Dichtungsleckage, DE: Driving end**

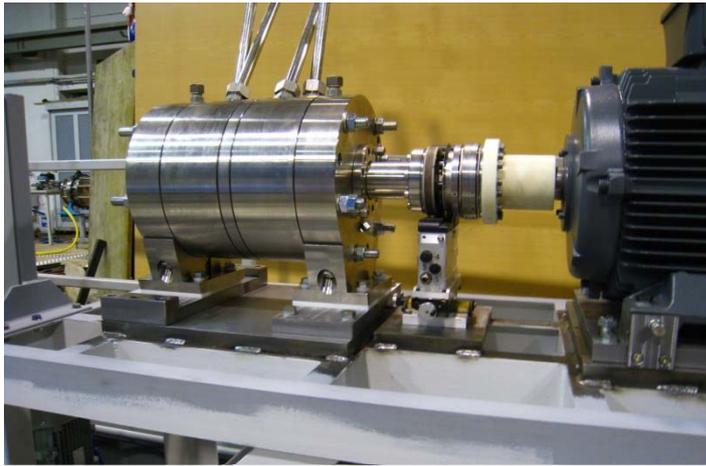
Der Dichtungsträger als Kernstück der gesamten Versuchsanordnung ist in Bild 6 im Schnitt zusammen mit der Kupplung und einem Teil des Antriebsmotors dargestellt. Gut zu erkennen sind die beiden Gleitringdichtungen sowie die Anschlüsse für den Medienkreislauf (links und rechts jeweils unten und oben), die Leckageabfuhr (oben über den beiden Gleitringdichtungen) und die Fühler für die Lagertemperatur.

Mit Hilfe der am rechten Wellenende (Bild 6) eingebauten Bürste kann jederzeit auch der Strom und die Spannung zwischen rotierendem und stehendem Teil gemessen werden. Die Bürste kann im laufenden Betrieb an die Welle geschoben werden, der kontinuierliche Betrieb würde zu einer Änderung des Betriebszustandes führen. Der gesamte Prüfling ist zudem isoliert auf dem Grundrahmen aufgebaut.



**Bild 6: Schnittbild des Dichtungsträgers**

Am Prüfstand lassen sich die Mengen, die als Spülung dienen, exakt bestimmen und einstellen. Bei Änderungen dieser Mengen sieht man eine zeitverzögerte Änderung der Temperatur der Dichtung. Dann ändert sich auch die Leckage. Über die Bypassmenge, also jene Menge, die kontinuierlich über die Ionentauscherkartusche geführt wird, kann die Leitfähigkeit frei eingestellt werden, wobei nach unterschiedlichen Versuchen sich ein Volumenstrom von ca. 6-8 l/min als stabil für den Betrieb des Prüfstandes gezeigt hat. Es wurden auch geringere Werte mit 2-3 l/min gefahren, dies erzeugt erwartungsgemäß eine höhere Leitfähigkeit von 0.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

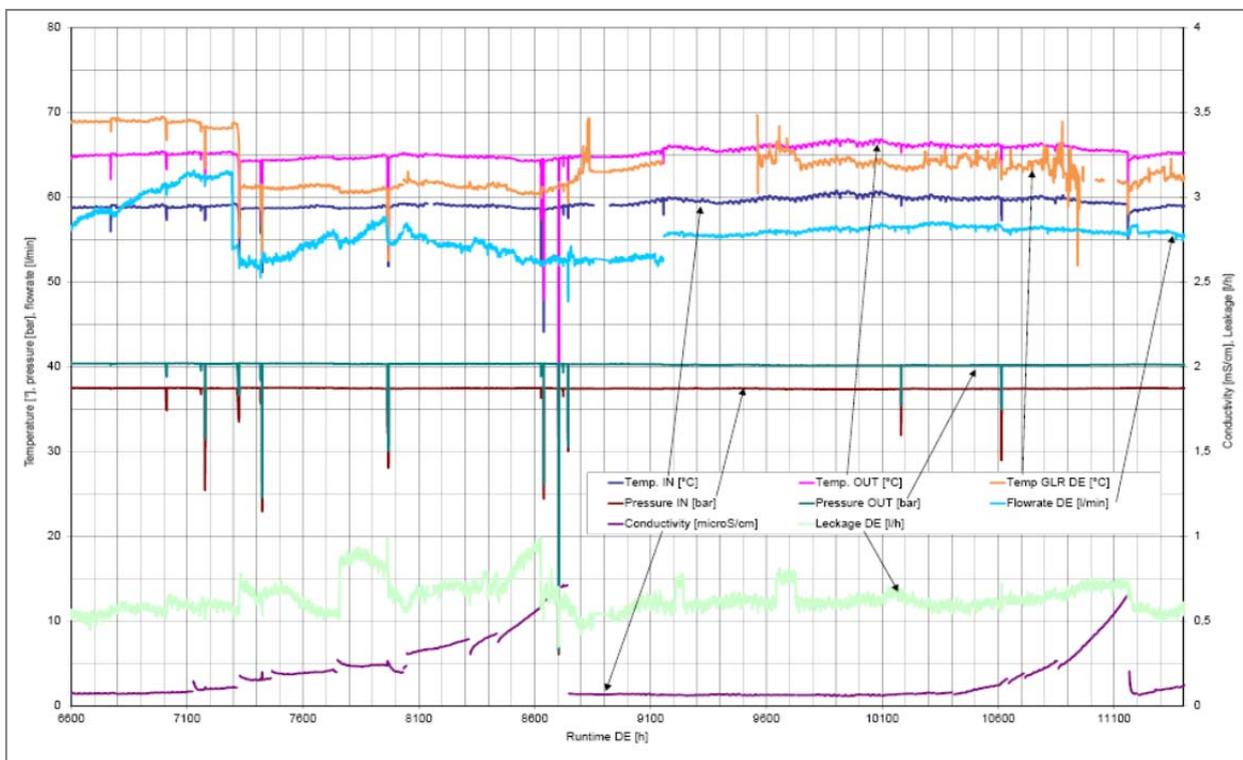


**Bild 7: Dichtungsträger am Prüfstand**

Ein Foto des Versuchsträgers zeigt Bild 7, in dem auch zwischen Motor und Versuchsträger eine Drehmomentenmesswelle zu sehen ist, die nur in der Inbetriebnahmephase montiert war und der Überprüfung des normalerweise nur vom Frequenzumformer angezeigten Drehmomentes diente.

In Bild 8 sind beispielhaft die Versuchsdaten der Geleitringsdichtung der Antriebsseite (DE: driving end) als Langzeitmitschrieb dargestellt.

Die unterste Linie stellt die Leitfähigkeit dar, bei der zu erkennen ist, dass sie über jeweils lange Zeiträume von mehreren Tausend Betriebsstunden unter der gewählten Schwelle von  $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$  liegt, bei Alterung der Ionisierkartusche aber ansteigt. Die Kartusche wurde spätestens bei Erreichen der Leitfähigkeit von  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  getauscht, dieser Wert entspricht im echten Kraftwerk einem niedrigen Wert und wurde deshalb als Schwellenwert gewählt. Ebenfalls ist gut zu sehen, dass die Leckage permanent zwischen ca  $0,5 \text{ l/h}$  und  $1,0 \text{ l/h}$  schwankt. Außer dass dieser Wert der Praxis entspricht, ist besonders wichtig, dass er über den gesamten Versuchszeitraum sich nicht wesentlich ändert, zumindest nicht auf Dauer.



**Bild 8: Auszug aus dem Langzeitmitschrieb der Versuchsdaten, DE: Driving end**

Die Druckbelastung der Gleitringdichtung in Form des Systemdrucks (Pressure IN) und des Austrittsdrucks (Pressure OUT) wird während der gesamten Versuchsdauer konstant gehalten. Wie oben bereits angesprochen, wirkt die Gleitringdichtung selbst ähnlich einer Reibungspumpe, weshalb der Austrittsdruck ca. 4 bar höher liegt als der Eintrittsdruck und wodurch die Medienzirkulation aufrechterhalten wird. Die Temperaturen unterliegen Schwankungen in der Größenordnung von ca. 1° bis 2° bei einer fast konstanten Temperatursteigerung über die Gleitringdichtung von ca. 6°. Interessant ist der Verlauf der Temperatur an der Gleitringdichtung, die nach einer (als unbedeutend eingeschätzten) Absenkung des Volumenstroms im Medienkreislauf (Flowrate in Bild 8) tiefer liegt als dessen Austrittstemperatur aus dem Dichtungsraum. Anscheinend haben hier andere Einflüsse wie z.B. Wärmeleitung über die Gehäusewände oder geänderte Wärmeabfuhr über die Leckage diese Veränderungen bewirkt.

Die einzelnen „Ausreißer“ (Bild 8) deuten auf einen Stillstand des Versuchsstands wegen Wartungsarbeiten u.ä. hin und liegen jeweils um mehrere hundert Stunden auseinander. Da jedoch bei all diesen Änderungen die Betriebszustände der Gleitringdichtung sich nicht in praktisch relevantem Rahmen änderten, bestand kein Grund den Dauerbetrieb zu unterbrechen.

### Ergebnisse der Vorversuche

Zunächst wurden zwei konventionelle Siliziumkarbid-Dichtungen montiert, wobei Gleit- und Gegenring aus gleichem Material bestanden. In diesem ersten Versuchsabschnitt sollte erreicht werden, was man



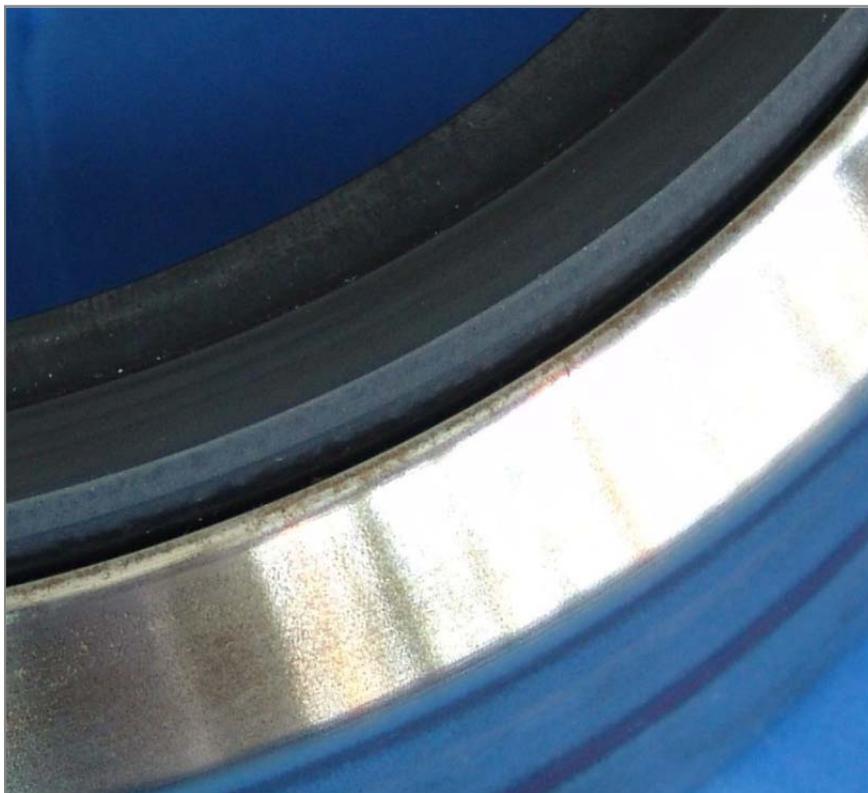
normalerweise vermeiden möchte: Die konventionellen Gleitringdichtungen sollten das üblicherweise nach verhältnismäßig kurzer Zeit zu erwartende Schadensbild der Elektrokorrosion aufweisen, womit dann der praktische Beweis erbracht wäre, dass die Versuchsanordnung die Wirklichkeit exakt nachbildet. Und tatsächlich stellten sich nach 600 Betriebsstunden die in Bild 9 gezeigten Schäden ein, allerdings nur auf dem dynamischen Gleitring, nicht auf dem statischen Gegenring.

**Bild 9: Dynamischer Gegenring aus gewöhnlichem SiC, Laufzeit 600 h mit deutlich sichtbaren Beschädigungen**

Wie bereits eingangs kurz angerissen, gibt es zwei verschiedene Beobachtungen, die zwar beide Ausplatzungen zeigen, die auf Elektrokorrosion zurückzuführen sind, aber einmal nur auf den dynamischen Ringen und keine Beschädigungen auf den statischen Ringen, wohingegen andere Betreiber die Schäden in gleichem Maße auf beiden Ringen feststellen. In dem hier beschriebenen Versuch stellten sich die Schäden lediglich auf den dynamischen Gegenringen ein, nicht jedoch auf den statischen Ringen. Dies deckt sich mit Beobachtungen, die in Kraftwerken gemacht wurden, auf die anderen Beobachtungen sei aber ausdrücklich hingewiesen. Es ist an dieser Stelle auch erwähnenswert, dass die Gründe für die zwei unterschiedlichen Beobachtungen nach derzeitigem Stand nicht bekannt sind. Allerdings können diese Unterschiede aus praktischer Sicht durchaus als nachrangig angesehen werden, da der wesentlich wichtigere Aspekt, nämlich der durch Elektrokorrosion bedingte Ausfall der Gleitringdichtung im einen wie im anderen Fall auftritt. Die wesentliche Aufgabe besteht also darin, Elektrokorrosion zu vermeiden.

### Versuchsergebnisse

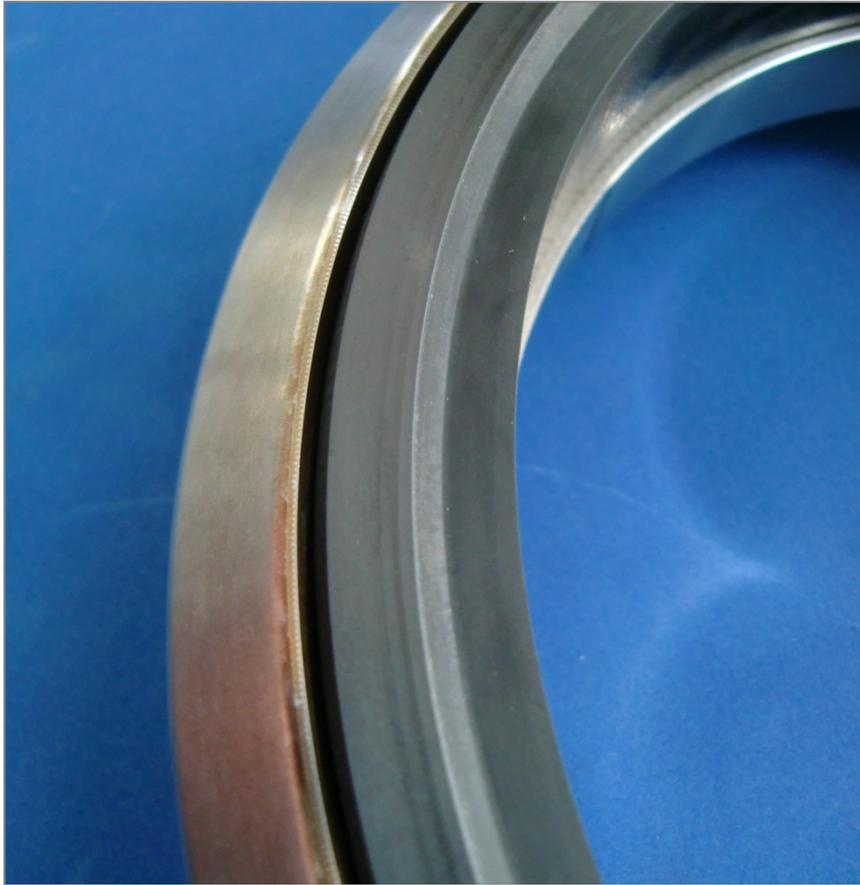
Daraufhin wurde eine diamantbeschichtete Dichtung parallel zur konventionellen montiert und der Dauerversuch erneut gestartet. Seit dem letzten Aus- und Einbau der Dichtungen nach einer Betriebszeit von 11700 Stunden laufen auf beiden Seiten diamantbeschichtete Dichtungen, ein Ausschnitt des Versuchsmitschriebs ist der bereits oben besprochen beispielhaft in Bild 8 dargestellte Verlauf.



**Bild 10: DiamondFace® 7200 h dynamischer Gegenring**

Wie oben beim Versuchsaufbau schon beschrieben wurden die Versuchsträger anfangs ca. alle 3 Monate geöffnet, wenn die Wälzlager am Versuchsträger getauscht wurden. Später wurden diese Zeiträume verlängert, bis die Überwachung der Wälzlager einen Temperaturanstieg und damit den Lagerverschleiß anzeigte. Beim Öffnen der Versuchsträger wurden auch die Gleitringdichtungen in Augenschein genommen und fotografisch do-

kumentiert. Am Beispiel der Gegenringe nach 7200 und 16000 Betriebsstunden in Bild 10 und Bild 11 sei der nach wie vor ausgezeichnete Zustand der Gleitringdichtung nach so langer Betriebszeit dargestellt.



**Bild 11: DiamondFace® 16000 h dynamischer Gegenring**

Dieser Zustand kann nicht anders denn als neuwertig bezeichnet werden, es besteht nicht der geringste Anlass, die Dichtung zu tauschen. Vielmehr wurde die Dichtung zwar einer sehr eingehenden langwierigen Untersuchung unterzogen, über die noch zu berichten sein wird, nach zwei Wochen wurde sie aber unverändert wieder eingebaut und der Dauerversuch fortgesetzt, wo er auch derzeit noch läuft. Der herkömmliche Siliziumkarbidring (Bild 8) hatte da-

gegen schon nach 600 h die typischen Verschleißerscheinungen

gezeigt, wie sie – auch nach diesen kurzen Betriebszeiten – auch in der Praxis auftreten (Bild 1). Die Verlängerung der Standzeit von ca. 600 h, also weniger als einem Monat, auf voraussichtlich weit über 16000 h muss als eindrucksvoll beschrieben werden. Über den weiteren Versuchablauf wird noch zu berichten sein.

### **Danksagung**

Wir bedanken uns bei der Steirischen Landesregierung, der Steirischen Wirtschaftsförderung SFG und der EU für die Förderung des Forschungsprojekts.

[1] Ruffer, M.: Kristalliner Diamant - Die Revolution für Gleitringdichtungen. Pumpen in der Verfahrenstechnik – Beiträge zur elften Praktiker-Konferenz 2007. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7, Nr. 488, ISBN 978-3-18-348807-0, VDI-Verlag Düsseldorf (2007).

[2] Otschik, J.: Diamond Faces im Jahr 3 nach der Markteinführung. Praktikerkonferenz Graz – Pumpen in der Verfahrens- und Kraftwerkstechnik (2010)