

Berger/Kiefer (Hrsg.)

# DICHTUNGS TECHNIK

**JAHRBUCH 2018**

**ISGATEC®**

# Mess- und Prüftechnik

# Integraler Ansatz – der beste Weg zur wirklichen Ausfallursache

Dichtungsausfälle verursachen jedes Jahr durch direkte und indirekte Folgekosten sicherlich zwei- bis dreistellige Millionenbeträge an volkswirtschaftlichem Schaden – sei es durch Maschinenstillstandskosten, durch Rückrufaktionen oder Umweltschäden. Noch schlimmer als der direkte Schaden können die daraus erwachsenden Imageprobleme am Markt für die betroffenen Unternehmen werden. Daher ist es natürlich sehr wichtig, bei Schadensfällen die wirkliche Ursache für den Ausfall schnell zu erkennen, um den Fehler auch abstellen zu können. Die Durchführung einer Schadensanalyse wird allerdings oft nur auf eine werkstoffliche Untersuchung des Schadensmusters zusammen mit einer mikroskopischen, eventuell auch mit einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung bzw. einer anderen analytischen Prüfung reduziert. Solche Untersuchungen allein können aber leicht in die Irre führen, da sich an ausgefallenen Gummidichtungen fast immer werkstoffliche Inhomogenitäten, Fremdstoffe, Spuren einer stattgefundenen Alterung und leichte herstellungsbedingte Mängel finden lassen. Die „Kunst“ besteht nun darin, die vorhandenen Spuren richtig zu interpretieren. Das ist letztlich aber nur mit einem integralen Ansatz möglich, das heißt, man muss alle verfügbaren Information zum Schadensfall in die Bewertung des Schadensbildes mit einbinden, damit die Logik des Ausfalls auch klar zu erkennen ist.

Wie bei vielen komplexen Aufgabenstellungen hilft auch bei der Schadensanalyse eine systematische Vorgehensweise. Auf Basis von mehr als 2.000 durchgeführten Untersuchungen entstand eine Systematik – die 5 Schritte einer belastbaren Schadensanalyse, die sich in der Praxis bewährt hat:

## 1. Schritt: Identifikation der Probe

Dieser besteht darin, das (hoffentlich auch) vorliegende Schadensmuster dahingehend zu untersuchen, ob dieses bezüglich Werkstoff den Vorgaben entspricht. Als einfachste Identitätsprüfung kann die Härte und Dichteprüfung erste Klarheit verschaffen (Übereinstimmung mit der Bestellvorschrift bzw. den Lieferantangaben), darüber hinaus kann man sich ggf. mit einer FTIR-Analyse absichern,

ob auch das richtige Polymer (z.B. FKM oder EPDM) vorliegt. In ca. 1 bis 2% der Schadensfälle ist damit die Schadensanalyse abgeschlossen, wenn sich nämlich herausstellt, dass der falsche Werkstoff verwendet wurde. Es wird empfohlen, parallel zur Untersuchung des Schadensmusters ein aktuell verwendetes Serienmuster im Vergleich zum Schadensmuster zu untersuchen. Das zeigt einerseits schnell die stattgefundenen Veränderungen auf, zum anderen lassen sich dann im weiteren Verlauf der Untersuchung eventuell als Schadensursache angenommene Mängel in der Qualität überprüfen. Zur Identifikation der Probe gehört neben dem Werkstoff natürlich auch die Abmessung der Probe. Hier sollten die wesentlichen Funktionsmaße des Schadensmusters mit denen des Serienmusters verglichen werden. Bei O-Ringen z.B. die Schnurstärke und der Innendurchmesser, bei Lippendichtungen oder Radialwellendichtringen Innen- und Außendurchmesser.

Damit wird im ersten Schritt nachgewiesen, ob der richtige Werkstoff und die richtige Abmessung vorliegen und mögliche stattgefundenen werkstoffliche und maßliche Veränderungen werden dokumentiert.

## **2. Schritt: Anwendungsinformationen einholen**

Der zweite Schritt besteht darin, die Anwendung und die ganze Vorgeschichte des Ausfalles zu verstehen. Dazu gehört es zuallererst kritisch zu hinterfragen, ob zweifelsfrei festgestellt wurde, dass tatsächlich die untersuchte Dichtung als Leckageverursacher identifiziert wurde. Dann ist es für die weitere Auswertung sehr wichtig zu wissen, wann die Leckagen aufgetreten sind. Direkt oder zeitnah nach Inbetriebnahme, oder erst nach einer erheblichen Betriebsdauer (>1.000 h). Bei Ausfällen nach kurzen Laufzeiten fokussiert man sich zunächst auf Montagefehler oder Herstellungsmängel als mögliche Ursache, bei längeren Betriebszeiten dann mehr auf unzulässige thermische, chemische oder physikalische Beanspruchungen. Darüber hinaus sollte die Art der Leckage bekannt sein: Liegt eine grobe Fluid-Leckage vor oder „nur“ eine Tröpfchen- oder Schweißleckage oder geht es gar „nur“ um erhöhte Gasleckraten, welche über Leckagedetektoren ermittelt wurden, oder treten Leckagen nur unter bestimmten Bedingungen auf, z.B. bei tiefen Temperaturen?

Auch ist es wichtig zu wissen, ob die Ausfälle bei unterschiedlichen Anwendern auftreten oder nur bei einem Anwender oder der Ausfall etwa „nur“ ein Einzelfall ist. Wenn mehrere Ausfälle vorliegen, lässt sich darin eine Logik erkennen: Treten die Probleme ab einem bestimmten Fertigungszeitpunkt auf bzw. ist nur eine

bestimmte Produktionscharge davon betroffen? Oder treten Ausfälle nur regional oder saisonal begrenzt auf? Weiter ist es wichtig zu wissen, ob das undichte Bauteil erst seit Kurzem gefertigt wird oder dieses Bauteil gar schon viele Jahre bisher problemlos funktioniert hat. Hilfreich ist auch, wenn der Auftraggeber der Schadensanalyse bereits einen konkreten Verdacht hat. Wenn sich z.B. Betriebsmedien oder Anwendungsbedingungen beim Kunden geändert haben oder wenn es einen neuen Lieferant für die Dichtung gibt oder wenn es ein neues Spritzwerkzeug für den Einbauraum der Dichtung gibt.

Eine weitere wichtige Voraussetzung zur effektiven Schadensanalyse besteht darin, die Anwendung verstanden zu haben. Das heißt verstanden zu haben, wie das Funktionsprinzip der Dichtung, der Membran bzw. des Elastomerbauteiles ist. Erst wenn man verstanden hat, warum die Anwendung mit dem Bauteil bisher funktioniert hat, kann man auch nachvollziehen, warum diese nun nicht mehr funktioniert. Und daraus ergibt sich die wichtige Erkenntnis, ob die Ausfallursache eher bei der Dichtung oder bei der Ausführung des Einbauraumes zu suchen ist. Damit kommt man zu einem weiteren wesentlichen Bestandteil dieses zweiten Schrittes der Schadensanalyse, nämlich zur Bewertung des Einbauraumes. Um diesen bewerten zu können, sollten natürlich entsprechende Angaben vorliegen, ggf. kann der Einbauraum auch mittels des ausgefallenen Bauteils ermittelt werden.

Letztlich sollte man dann noch die Frage zulassen, wie sicher denn die gemachten Angaben sind. Welche Unsicherheiten bestehen bezüglich den genannten Betriebsbedingungen, gibt es Hinweise darauf, dass bestimmte Informationen zurückgehalten werden? Dies kann am Ende der Untersuchung wichtig werden, wenn man meint, das Schadensbild und damit die Entstehung des Schadens verstanden zu haben. Steht diese Annahme dann im Widerspruch zu den gemachten Angaben zu den Betriebsbedingungen, so ist entweder die getroffene Annahme zur Schadensentstehung falsch und man hat die Logik des Ausfalls noch nicht erkannt, oder die gemachten Angaben zu den Betriebsbedingungen stimmen nicht.

Das Zwischenergebnis des zweiten Schrittes sollte die Erkenntnis sein, ob sich die weiteren Untersuchungen zunächst auf die Dichtung oder den Einbauraum konzentrieren sollten. Zudem wird dabei klar, ob vom Auftraggeber tatsächlich eine ergebnisoffene Schadensanalyse gewünscht wird, oder ob ein als unabhängig eingestuftes Sachverständiger lediglich die Erkenntnisse bzw. Annahmen

des Auftraggebers zu Papier bringen soll. Im betrieblichen Alltag des O-Ring Prüflabors kommt letzteres glücklicherweise eher selten vor.

### 3. Schritt: Dokumentation und Bewertung des Schadensbildes

Dieser Schritt ist der wichtigste Teil der Schadensanalyse. Hier geht es darum, zuerst die Spuren der Beanspruchung der Dichtung zu erkennen und dann richtig zu bewerten. Ein gutes Mikroskop kann deshalb die Sicherheit und Effektivität einer Schadensanalyse erheblich erhöhen. Zunächst wird die unzerstörte Probe auf Auffälligkeiten untersucht, welche dann mit hoher Vergrößerung teilweise auch dreidimensional dokumentiert und vermessen werden. Anschließend werden die Proben dort auch aufgeschnitten, um bleibende Verformungen oder Rissverläufe, innere Risse, Fertigungsinhomogenitäten oder Blasenbildungen zu erkennen. Auch Bruchflächen werden damit natürlich dokumentiert und ausgewertet. Dabei ist eine 3D-Darstellung eine erhebliche Hilfe.

Bei der Unterteilung bzw. Klassifikation der Schadensmechanismen hat sich die Unterteilung in vier Klassen von Ursachen bewährt:

1. Ursache „Medium“ – Schädigung entweder durch unangemessen starke Quellung (in Ausnahmen auch starker Schwund) oder durch chemische Einwirkung, das heißt durch Verlust der Gummielastizität, Rissigkeit und/oder starke bleibende Verformung.
2. Ursache „Temperatur/Alterung“ – Schädigung entweder durch eine starke Überhitzung, weit über die zulässige Dauertemperatur hinaus, was zu einer Oberflächenschädigung der Dichtung führt, i.d.R. zu Rissbildungen, oder durch eine Versprödung und bleibende Verformung innerhalb der polymertypischen Temperaturgrenzen infolge von zu langen Betriebszeiten oder der Verwendung eines schlechten Standes der Technik bezüglich der Rezepturgestaltung (z.B. schwefelvernetzter EPDM statt peroxidisch vernetzter). Hinzugerechnet zu dieser Gruppe werden auch verwandte Schadensmechanismen, die letztlich über Schädigungen der Netzwerkstruktur des Werkstoffes zu einem verfrühten Ausfall führen, das sind verschiedene Formen der Alterung, z.B. durch statische Verformung und Ozon (i.d.R. an vormontierten NBR O-Ringen) oder durch das Vorhandensein von Schwermetallionen (z.B. an EPDM O-Ringen in Warmwassersystemen).
3. Ursache „Unzulässige mechanische/physikalische Beanspruchungen“ – hierin sind alle Ausfallursachen zusammengefasst, die einen Ausfall erklären können, ohne dass es zu Veränderungen in der Netzwerkstruktur des Werkstoffes gekommen sein muss und der Ausfall nicht auf einen Herstellungsfeh-

ler zurückgeht. Das Adjektiv „mechanisch“ soll herausstreichen, dass hier auch Montagebeschädigungen enthalten sind, weitere typische Ursachen sind scharfkantige Einbauräume, zu geringe oder zu hohe Verpressung, Spaltextrusion, Abrieb oder explosive Dekompression bzw. explosive Überhitzung.

4. Ursache „Herstellungsfehler“ – hierunter fallen Fehler, die direkt dem Herstellungsprozess zuzuordnen sind und auch eindeutig eine unzulässige Abweichung vom Soll-Zustand darstellen. Als häufigster Fehler bei O-Ringen sind bei dieser Ursache Anrisse bzw. radiale Fließlinien, eine Vorstufe zu Anrissen, zu nennen. Auch bei anderen Dichtungen können Fertigungsmängel schon unter geringer mechanischer Beanspruchung zu Anrissen führen, wenn z.B. eine überlagerte Mischung verarbeitet wurde. Weitere mögliche Fehler sind Entformungsrisse, die sich aus der hohen Einreißempfindlichkeit von Elastomeren bei hohen Temperaturen erklären und bei der Entformung der Elastomerteile entstehen können.

Bei der Einstufung des Fehlerbildes hat sich das Ausschlussprinzip bewährt, indem zunächst versucht wird, unzulässige chemische und thermische Ursachen auszuschließen (Verlust der Gummielastizität, Risse, starke bleibende Verformung oder starke Quellung/starker Schwund). Können diese ausgeschlossen werden, versucht man Herstellungsmängel auszuschließen. Ein wichtiges Kriterium für Herstellungsmängel als Fehlerursache ist die kurze Betriebsdauer bis zum Ausfall (<100 bis 1.000 h). Lässt sich auch dies ausschließen, bleiben dann nur noch unzulässige physikalische Einwirkungen auf die Dichtung als Ursache übrig.

Ein wichtiges Ergebnis dieses 3. Schrittes ist zum einen, dass man Schädigungen erkennen kann, welche eine Leckage erklären können (falls nicht, muss man sich auf den Einbauraum konzentrieren), zum anderen, dass man den Fehler einer Hauptgruppe der Art der Schädigung zuordnen kann. Nach dieser Bewertung sollte eine Annahme für einen konkreten Schadensmechanismus bzw. Schadensablauf gefunden werden, d.h. die abgeleitete Schadenshypothese sollte nicht im Widerspruch zu vorhandenen Angaben (siehe 2. Schritt) stehen. Daraus können sich weitere gezielte Rückfragen an den Auftraggeber ableiten, welche die getroffene Schadenshypothese stützen können. Ein weiteres wichtiges Ergebnis dieser beschriebenen Bewertung des Schadensbildes soll auch sein, weitere analytische Prüfungen (TGA, FTIR, EDX, DSC, GC-MS) festzulegen, um Hinweise zu finden auf eindiffundierte Medien, geänderte Rezepturen, die Anwesenheit von Schwermetallionen oder auf eine Untervulkanisation. Das heißt, der Nutzen der Analytik besteht primär darin, die aus der Bewertung des

Schadensbildes erfolgte Schadenshypothese zu stützen oder zu entkräften. Der Einsatz von komplizierter Analytik ohne diesen entscheidenden Schritt kann mehr Verwirrung als Klarheit bringen.

#### **4. Schritt: Absicherung der Annahmen**

Ist nun eine mögliche Erklärung der Schadensursache im 3. Schritt gefunden worden, gilt es, diese Annahme möglichst gut abzusichern. Dies können gezielte Fragen beim Anwender sein. So ist z.B. bei einer mechanischen Beschädigung einer symmetrischen Hydraulikdichtung (also durch einen physikalischen Schadensmechanismus) die Frage wichtig, ob die Beschädigung zum Dichtspalt auf der Niederdruckseite auftritt. Dann wäre Spaltextrusion eine Erklärung. Tritt sie auf der Druckseite auf, dann käme Luft als Verursacher in Frage. Oder wenn sich Hinweise auf montagebedingte Fehler ergeben, sollte natürlich der Montageprozess beim Auftraggeber im Detail hinterfragt werden.

Der Einsatz der Analytik kann z.B. klar belegen, wenn ein chemischer Angriff vorliegt, z.B. an einer EPDM-Membran, die angeblich nur im Wasser eingesetzt war, ob sich nicht doch Spuren eines Desinfektionsmittels (Chlor) auf der Schadfläche finden (z.B. über eine EDX-Analyse). Oder über einen Vergleich mittels Thermogravimetrischer Analyse (TGA) zwischen dem neuen Referenzteil und der ausgefallenen Dichtung kann nachgewiesen werden, dass eine Extraktion von Weichmachern stattgefunden hat. Oder es kann z.B. auch belegt werden, bei NBR-Dichtungen über den DSC-Kälterichtwert, dass sich der Acrylnitrilgehalt der Rezeptur im Vergleich zum Erstmuster nicht geändert hat und damit auch nicht die Quellbeständigkeit, sodass aufgetretene Probleme infolge Quellung nicht durch geänderte Rezepturen sondern durch geänderte Öle erklärt werden können.

Der 4. Schritt in der Schadensanalyse dient also dazu, die aus Schritt 3 gemachten Annahmen abzusichern. Durch die Weiterentwicklung der Analytik sind die Möglichkeiten heute sehr viel größer als noch vor 10 bis 20 Jahren, z.B. mittels einer GC-MS-Analyse, welche mit gutem Erfolg eingesetzt wird. Somit sollte auch – wo immer möglich – von diesen Möglichkeiten Gebrauch gemacht werden, um mit größtmöglicher Sicherheit den Verursacher für den Dichtungsausfall herauszufinden.

#### **5. Schritt: Berichterstellung/Vorschlag von Abstellmaßnahmen**

Die Berichterstellung ist der Abschluss der Schadensanalyse. Hier geht es aber nicht nur darum, lediglich die angenommene Schadensursache zu benennen,



sondern es soll die ganze Logik des Ausfalles auch für nicht involvierte und nicht besonders fachkundige Leser klar erkennbar sein. Erst dann kann damit gerechnet werden, dass seitens des Auftraggebers auch eine Akzeptanz erfolgen wird und somit die erforderlichen Abhilfemaßnahmen umgesetzt werden. Dazu ist es notwendig, die gefundenen Fehlerbilder gut zu dokumentieren und zu kommentieren. Die objektiven Ergebnisse aus der mikroskopischen und den werkstofflichen Untersuchungen müssen übersichtlich dargestellt und bewertet werden. Bieten sich unterschiedliche Bewertungen der Ergebnisse an, so sollte im Bericht auch darauf eingegangen werden. Oft ist es auch hilfreich, wenn ausgeführt wird, welche Schadensmechanismen ausgeschlossen werden können und warum. Sollten beim Ersteller der Schadensanalyse Unsicherheiten bei der Bewertung des Schadensbildes und damit bei der Benennung der angenommenen Hauptursache zurückbleiben, so sollte dies auch so dargestellt werden. Kann man dann letztlich davon ausgehen, die wirkliche Schadensursache erkannt zu haben, so sollte der Bericht natürlich darauf eingehen, welche Möglichkeiten an Abstellmaßnahmen bestehen.

### Praktische Beispiele

Um die Vorgehensweise an realen Fällen zu veranschaulichen, wurden zwei Beispiele ausgewählt.

#### Beispiel 1

>>1, 2, 3 verdeutlichen die Analyse von Rissen am Außendurchmesser eines HNBR-O-Rings.

1. Identifikation	NBR O-Ring, Härte 68 Shore A, Dichte 1,16 g/cm <sup>3</sup> , FTIR-Analyse: HNBR
2. Anwenderinformation	1.500 h, T>100 °C, Motoröl, Vorspannring für rotierendes Gleitelement
3. Bewertung des Schadensbildes	Risse, auffällige Bruchfläche, >>2 und 3, Risse entstehen innen, explosive Überhitzung
4. Absicherung der Annahmen	Empfehlung: Öluntersuchung auf Blow-By Kondensate mittels GC-MS-Analyse
5. Abstellmaßnahmen	Zyklische Beanspruchung vermeiden, Anfahrprozess prüfen, Öl überprüfen

>>1: Die 5 Schritte am Beispiel eines geschädigten HNBR-O-Rings (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)



**>>2: Risse am Außendurchmesser eines HNBR-O-Rings**  
(Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)



**>>3: Bruchfläche des HNBR-O-Rings mit klar erkennbarer kreisförmiger Rissfortpflanzung**  
(Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

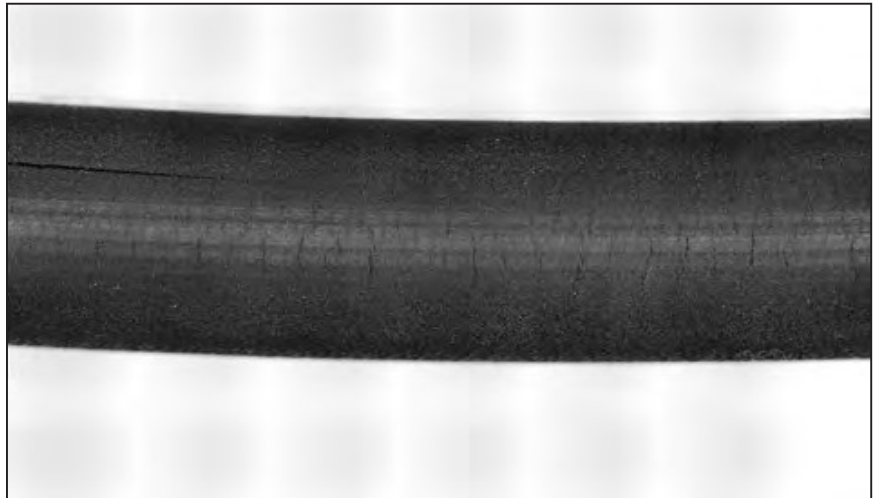
### Beispiel 2

Dieses Beispiel >>4, 5, 6, 7 zeigt einen rissigen NBR-Kraftstoffschlauch.

1. Identifikation	NBR-Kraftstoffschlauch, Härte 72 IRHD, Dichte 1,36 g/cm <sup>3</sup>
2. Anwenderinformation	NBR-Kraftstoffschlauch mit einer Umflechtung aus verzinktem Stahldraht, wird nach 4-5 Monaten undicht, Fördermedium Diesel
3. Bewertung des Schadensbildes	Gerichtete Risse, >>5, der Profilschnitt lässt erkennen, dass die Rissbildung außen entstehen, also nicht durch das Fördermedium innen verursacht werden >>6. Das Schadensbild ist typisch für Ozonrisse.
4. Absicherung der Annahmen	Ozonprüfung 48 h / 23 °C / 20% Dehnung / 50 pphm Ozon am neuen Referenzteil, Ergebnis starke Risse >>7
5. Abstellmaßnahmen	Umstellung auf neue Rezeptur (und neuen Lieferant), Wiederholung der Ozonprüfung, Ergebnis: keine Risse

>>4: Die 5 Schritte am Beispiel eines geschädigten NBR-Kraftstoffschlauches (Bild: O-Ring Prüflabor Richter GmbH)

**>>5: Rissiger NBR  
Kraftstoffschlauch (Bild:  
O-Ring Prüflabor Richter GmbH)**



**>>6: Profilschnitt der  
Schlauchwandung,  
Risse am Außendurchmesser,  
keine Risse am  
Innendurchmesser  
(Medienseite)  
(Bild: O-Ring Prüflabor Richter  
GmbH)**



**>>7: Risse nach einer  
Ozonprüfung an einem  
Abschnitt eines neuen  
Referenzmusters  
(Serienzustand)  
(Bild: O-Ring Prüflabor Richter  
GmbH)**

