

Integraler Ansatz zur Bewertung von Schadensbilder von Elastomeren Dichtungen - der beste Weg zur wirklichen Ausfallursache

Dipl. Ing Bernhard Richter, O-Ring Prüflabor Richter GmbH

Dichtungsausfälle verursachen jedes Jahr durch direkte und indirekte Folgekosten sicherlich 2-3-stellige 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, in Schadensfällen die wirkliche Ursache für den Ausfall schnell zu erkennen, um den Fehler auch abstellen zu können. Daher geht es zunächst bei der Schadensanalyse um sehr viel mehr, als nur einen Schuldigen zu finden (was übrigens auch im Nachhinein meistens gar nicht so einfach ist, wie man annimmt). Daher kommt der Schadensanalyse eine hohe Bedeutung in der Praxis zu.

Die Durchführung einer Schadensanalyse wird allerdings oft nur auf eine werkstoffliche Untersuchung des Schadensmusters zusammen mit einer mikroskopischen eventuell auch mit einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung reduziert. Diese Untersuchungen allein können aber leicht in die Irre führen, da sich an ausgefallenen Gumdichtungen fast immer werkstoffliche Inhomogenitäten, Fremdstoffe, Spuren einer stattgefundenen Alterung und leichte herstellungsbedingten Mängel finden lassen. Die „Kunst“ besteht nun dann 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. Der vorliegende Vortrag will aufzeigen, was für Informationen bzw. Kenntnisse hierzu erforderlich bzw. wünschenswert sind und wie diese dann auch in die Bewertung eines Schadensbildes miteinfließen. Dies wird dann an einigen praktischen Beispielen von Schadensfällen aufgezeigt.

Die 5 Bausteine einer belastbaren Schadensanalyse

Wie bei vielen komplexen Aufgabenstellungen hilft auch bei der Schadensanalyse eine systematische Vorgehensweise. Die im O-Ring Prüflabor aus zahlreichen (über 1800) durchgeführten Untersuchungen entstandene Systematik besteht aus fünf Schritten die im Folgenden dann weiter erörtert werden:

1. Identifikation der Probe
2. Anwendungsinformationen einholen
3. Dokumentation des Schadensbildes mit Bewertung bzw. Klassifikation
4. Absicherung der aus Schritt 3 gewonnenen Rückschlüsse
5. Berichterstellung mit möglichen Abstellmaßnahmen des Fehlers

1.Schritt: Identifikation der Probe

Eine Schadensanalyse kann erst beginnen, wenn das Schadensmuster auch wirklich vorliegt. Schnellschüsse aufgrund von Bildern und Anwendungsinformationen allein reichen für eine belastbare Analyse nicht aus und können auch erfahrene Spezialisten in die Irre führen. So besteht der erste Schritt zunächst einmal darin, das vorliegende Schadensmuster dahingehend zu untersuchen, ob dieses bezüglich Werkstoff den Vorgaben entspricht. Als einfachste Identitätsprüfung kann die Härte und Dichtepfung hier erste Klarheit verschaffen (Übereinstimmung mit der Bestellvorschrift bzw. den Lieferantenangaben), darüber hinaus kann man sich gegebenenfalls mit einer FTIR-Analyse absichern, ob auch bestimmt das richtige Polymer (z.B. FKM oder EPDM) vorliegt. In ca. 1-2% der Schadensfällen 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 einmal 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 zum Beispiel die Schnurstärke und der Innendurchmesser, bei Lippendichtungen oder Radialwellendichtringen Innen- und Außendurchmesser. Damit wird im ersten Schritt nachgewiesen, dass der richtige Werkstoff und die richtige Abmessung vorliegt und stattgefundenere werkstoffliche und maßliche Veränderungen sind dokumentiert.

2.Schritt-Anwendungsinformationen einholen

Der zweite Schritt besteht nun darin die Anwendung und die ganze Vorgeschichte des Ausfalles zu verstehen. Dazu gehört zu allererst kritisch zu hinterfragen, ob denn zweifelsfrei festgestellt wurde, dass tatsächlich auch die untersuchte Dichtung als Leckageverursacher identifiziert wurde. Dann ist es für die weitere Auswertung sehr wichtig zu wissen, wann die Leckagen denn aufgetreten sind. Direkt oder zeitnah (<100-1000 Betriebsstunden) nach Inbetriebnahme, oder erst nach einer erheblichen Betriebsdauer (>1000h). Bei Ausfällen nach kurzen Laufzeiten fokussiert man sich zunächst auf Montage 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 Schwitzleckage, geht es gar „nur“ um erhöhte Gasleckraten, welche nur über Leckagedetektoren ermittelt wurden, oder treten Leckagen nur unter bestimmten Bedingungen auf, zum Beispiel nur bei tiefen Temperaturen. Auch ist es wichtig zu wissen, ob die Ausfälle bei unterschiedlichen Anwendern auftreten oder nur bei einem Anwender oder der Ausfall gar „nur“ ein Einzelfall ist. Wenn mehrere Ausfälle vorliegen, lässt sich darin eine Logik erkennen, zum Beispiel ab einem bestimmten Fertigungszeitpunkt bzw. ist nur eine bestimmte Produktionscharge davon betroffen? Oder treten Ausfälle nur regional oder saisonal begrenzt auf? Dann 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. Weiter kann es auch eine Hilfe sein, wenn der Auftraggeber der Schadensanalyse bereits einen konkreten Verdacht hat. Wenn sich beispielweise 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 Ausfallsursache eher bei der Dichtung oder bei der Ausführung des Einbauraumes zu suchen ist. Und 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, gegebenenfalls 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 sein zu erkennen, ob sich die weiteren Untersuchungen zunächst auf die Dichtung oder den Einbauraum konzentrieren sollten. Zudem erkennt man dabei, ob vom Auftraggeber tatsächlich eine ergebnisoffene Schadensanalyse gewünscht wird, oder ob letztlich nur ein als unabhängig eingestuftes Sachverständigen die Erkenntnisse des Auftraggebers zu Papier bringen soll. Im betrieblichen Alltag des O-Ring Prüflabors kommt letzteres glücklicherweise eher selten vor. In der Regel sind die Ergebnisse des nächsten Schrittes, nämlich der Bewertung des Schadensbildes, allerdings zu zwingend, als dass es selbst in diesen Fällen zu einem ernsthaften Konflikt mit dem Auftraggeber kommt.

3. Schritt Dokumentation und Bewertung des Schadensbildes

Dieser 3. Schritt ist jetzt sozusagen der wichtigste Teil der Schadensanalyse. Hier geht es nun darum, erst einmal die Spuren der Beanspruchung der Dichtung zu erkennen und dann richtig zu bewerten. Ein gutes Mikroskop kann hier deshalb die Sicherheit und Effektivität einer Schadensanalyse erheblich erhöhen. Im O-Ring Prüflabor arbeiten wir schon einige Jahre mit einem Digitalmikroskop (Keyence VHX 500) und haben uns 2014 diesbezüglich auf den neusten Stand der Technik gebracht (Keyence VHX 5000). Üblicherweise arbeiten wir im Vergrößerungsbereich 20-200-fach, in Ausnahmefällen steht uns ein Objektiv mit 250-2500-facher Vergrößerung zur Verfügung. Über

eine Panoramabildfunktion (VHX 5000) bzw. mit einem Zusatzobjektiv (VHX 500) sind auch Aufnahmen mit geringerer Vergrößerung möglich. Zunächst wird die unzerstörte Probe untersucht auf Auffälligkeiten, welche dann mit hoher Vergrößerung teilweise auch 3-dimensional dokumentiert und teilweise auch 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 4 Klassen von Ursachen bewährt, siehe auch **Bild 1**:

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, in der Regel zu Rissbildungen, oder durch eine Versprödung und bleibenden Verformung innerhalb der polymertypischen Temperaturgrenzen infolge von zu langen Betriebszeiten (Polymer passt nicht zur Anwendung, z.B. NBR für Warmwasseranwendung) oder der Verwendung eines schlechten Standes der Technik bezüglich 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, beispielsweise durch statische Verformung und Ozon (in der Regel an vormontierten NBR O-Ringen) oder durch das Vorhandensein von Schwermetallionen (z.B. an EPDM O-Ringen in Warmwassersystemen).
3. Ursache = unzulässige 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 Herstellungsfehler zurückgeht. Die Ergänzung „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 hier 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 beispielsweise 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.

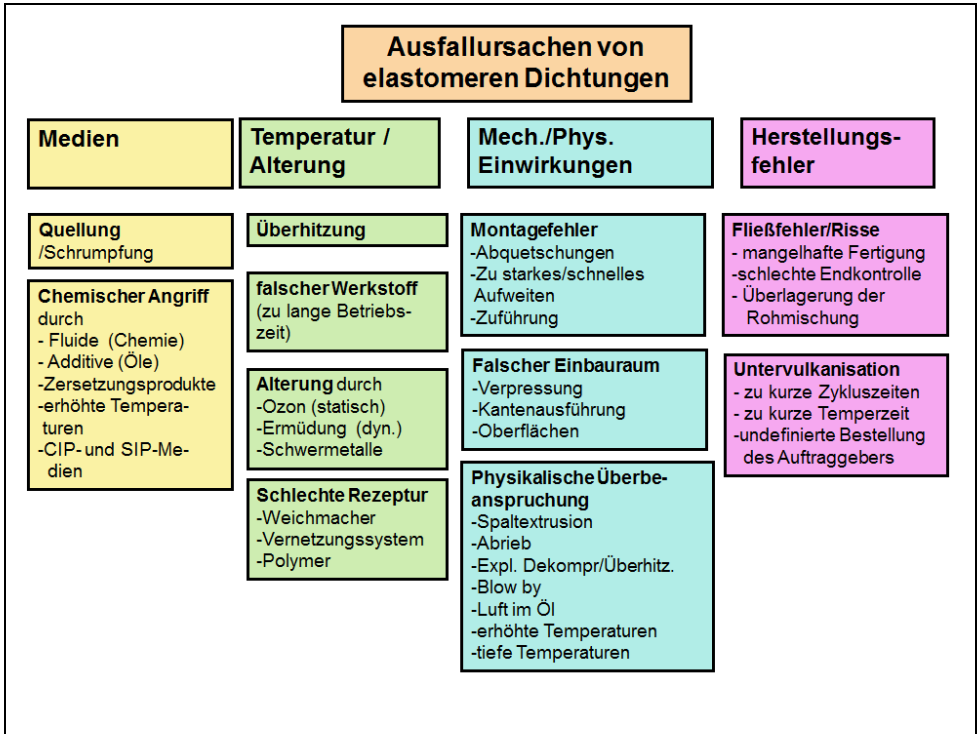


Bild 1: Klassifizierung der Ausfallursachen von Elastomeren Dichtungen

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 (<100-1000h). Lässt sich auch dies ausschließen, bleiben dann nur noch unzulässige physikalische Einwirkungen auf die Dichtung als Ursache übrig.

Ein wichtiges Ergebnis diesen 3. Schrittes ist zum einen, dass man Schädigungen erkennen kann, welche eine Leckage auch erklären können (falls nicht, muss man sich auf den Einbauraum konzentrieren), zum anderen, dass man dann auch den Fehler gemäß Bild 1 einer Hauptgruppe zuordnen kann. Nach dieser Bewertung sollte eine An-

nahme für einen Schadensmechanismus gefunden werden, das heißt die abgeleitete Schadenshypothese sollte nicht im Widerspruch zu vorhandenen Angaben, siehe Schritt 2, 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, der 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 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 Schritt 3 gefunden worden, gilt es, diese Annahme möglichst gut abzusichern. Dies können gezielte Fragen beim Anwender sein. Zum Beispiel bei einer mechanischen Beschädigung einer symmetrischen Hydraulikdichtung (also durch einen physikalischen Schadensmechanismus) ist die Frage wichtig, ob die Beschädigung zum Dichtspalt auf der Niederdruckseite auftritt, dann wäre Spaltextrusion eine Erklärung, oder auf der Druckseite, 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 zum Beispiel klar belegen, wenn ein chemischer Angriff vorliegt, zum Beispiel an einer EPDM-Membran, die angeblich nur im Wasser eingesetzt war, ob sich nicht doch Spuren eines Desinfektionsmittel (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 beispielsweise auch belegt werden, bei NBR-Dichtungen über den DSC-Kälterichtwert, dass sich der Acrylnitrilgehalt der Rezeptur im Vergleich zum Erstmuster eben nicht geändert hat und damit auch nicht die Quellbeständigkeit, sodass sich aufgetretene Probleme infolge Quellung eben dann nicht durch geänderte Rezepturen sondern durch geänderte Öle erklären.

Der 4. Schritt in der Schadensanalyse dient also dazu, die aus Schritt 3 gemachten Annahmen abzusichern. Durch die Weiterentwicklung der Analytik sind hier die Möglichkeiten heute sehr viel größer als noch vor 10-20 Jahren. Somit sollte auch, wo immer möglich, von diesen Möglichkeiten Gebrauch gemacht werden, um mit größtmöglicher Sicherheit den Verursacher für den Dichtungsausfall (root cause) herauszufinden, wie zum Beispiel Kontaktmedien der Dichtung, Anwesenheit von Schwermetallen oder geänderte Dichtungsrezepturen.

5.Schritt Berichterstellung/ Vorschlag von Abstellmaßnahmen

Die Berichterstellung stellt den Abschluss der Schadensanalyse dar. Hier geht es aber nicht nur darum, 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 Abhilfsmaßnahmen auch umgesetzt werden. Dazu ist es erforderlich, 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 der Abstellmaßnahmen bestehen.

Praktische Beispiele

Im Folgenden sind Beispiele tabellarisch aufgelistet, um die Vorgehensweise an realen Fällen zu veranschaulichen.

Beispiel 1

1.Schritt-Identifikation	HNBR O-Ring, Härte 68 Shore A, Dichte 1,16g/cm ³ , FTIR-Analyse: HNBR
2.Anwenderinformation	1500 h, T>100°C, Motoröl, Vorspannung für rotierendes Gleitelement
3.Bewertung des Schadensbildes	Risse, auffällige Bruchfläche, siehe Bilder 2 und 3, Risse entstehen innen, explosive Überhitzung
4.Absicherung der Annahmen	Empfehlung : Öluntersuchung auf Blow-By Kondensate
5.Abstellmaßnahmen	Zyklische Beanspruchung vermeiden, Anfahrprozess prüfen, Öl überprüfen

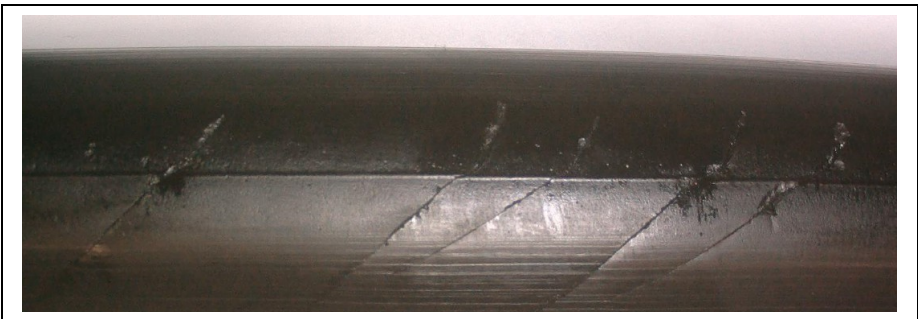


Bild 2: Beispiel 1-Risse am Aussendurchmesser



Bild 3-Beispiel 1-Bruchfläche

Beispiel 2

1.Schritt-Identifikation	NBR O-Ringe, geklebt, 2 unterschiedliche Abmessungen, Neu: Härte, 75 IRHD, Dichte 1,22g/cm ³ Ausfallteil: 81/82 IRHD, 1,24 g/cm ³ Keine signifikanten maßlichen Veränderungen
2.Anwenderinformation	Temperatur <120°C (1.O-Ring) <50°C (2. O-Ring) Statische Abdichtung, Riss an der Stoßstelle nach ca. 1000h in etwa zeitgleich an 3 O-Ringen
3.Bewertung des Schadensbildes	Riss jeweils an der Klebestelle, siehe Bilder 4 und 5, beim angeblich geringer thermisch belasteten O-Ringe in der Nähe der Stoßstelle Risse, siehe Bild 6, Annahme einer thermischen Schädigung, kein Qualitätsproblem mit der Stoßstelle
4.Absicherung der Annahmen	Zugversuch an neuem Referenzmuster, Reißdehnung >100%, Zugversuche beim

	Auftraggeber ebenso i.O.
5.Abstellmaßnahmen	Ursache für Überhitzung suchen, besser-endlos vulkanisierte O-Ringe einsetzen mit besserer Temperaturbeständigkeit

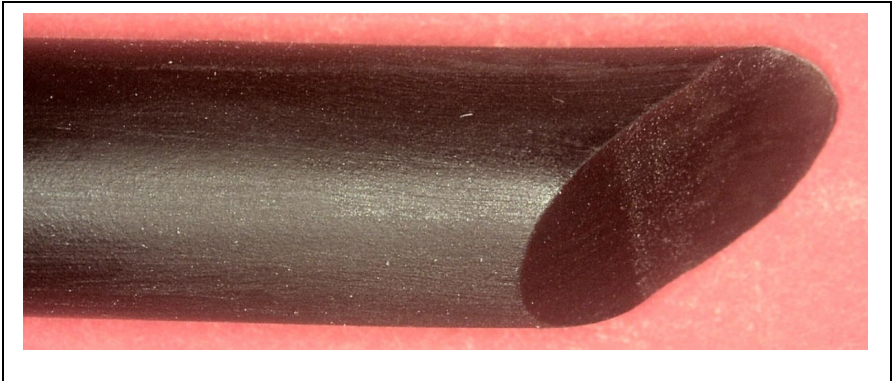


Bild 4- Beispiel 2-gerissene Stoßstelle

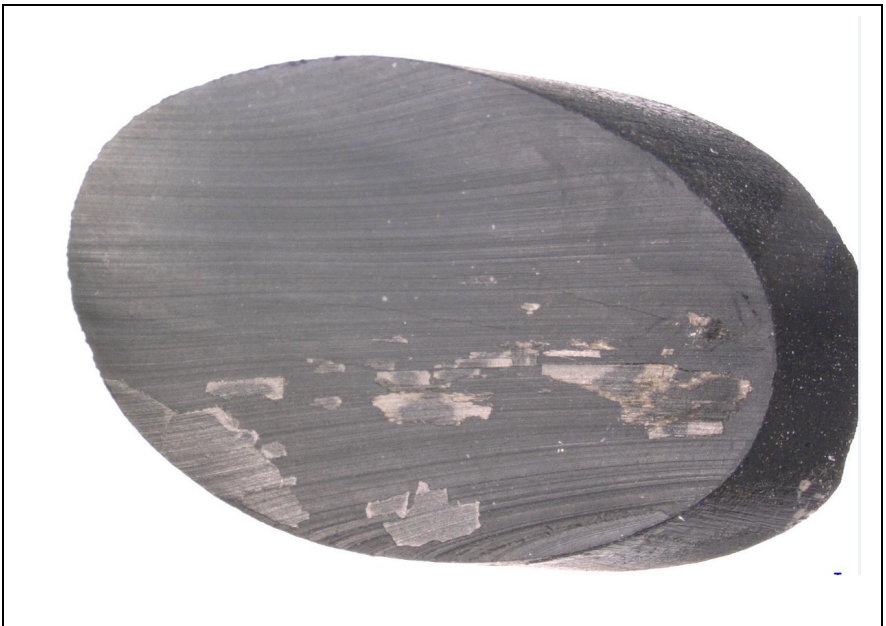


Bild 5- Klebstoffrückstände (Acrylatkleber) an der Stoßstelle



Bild 6: Risse beim Biegen am O-Ring mit der angeblich geringeren thermischen Beanspruchung

Beispiel 3

1.Schritt-Identifikation	NBR-Kraftstoffschlauch, Härte 72 IRHD, Dichte $1,36 \text{ g/cm}^3$
2.Anwenderinformation	NBR-Kraftstoffschlauch mit einer Umflechtung aus verzinktem Stahldraht, wird nach 4-5 Monaten undicht. Fördermedium Diesel
3.Bewertung des Schadensbildes	Gerichtete Risse, siehe Bild 7, der Profilschnitt lässt erkennen, dass die Rissbildung außen entstehen, also nicht durch das Fördermedium innen verursacht werden, siehe Bild 8. Das Schadensbild ist typisch für Ozonrisse
4.Absicherung der Annahmen	Ozonprüfung 48h/23°C/20% Dehnung 50pphm Ozon am neuen Referenzteil, Ergebnis

	starke Risse, siehe Bild 9
5.Abstellmaßnahmen	Umstellung auf neue Rezeptur (und neuen Lieferant), Wiederholung der Ozonprüfung, Ergebnis-keine Risse, siehe Bild 10

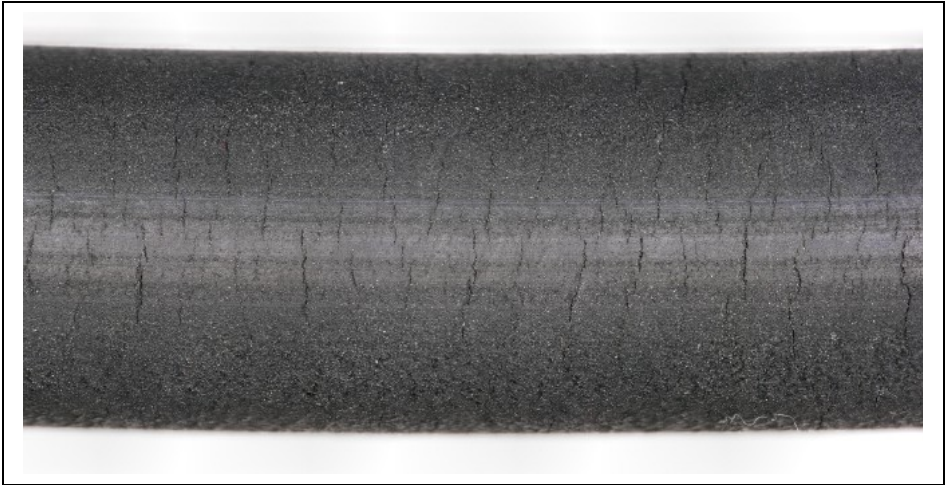


Bild 7: Beispiel 3-rissiger NBR Kraftstoffschlauch

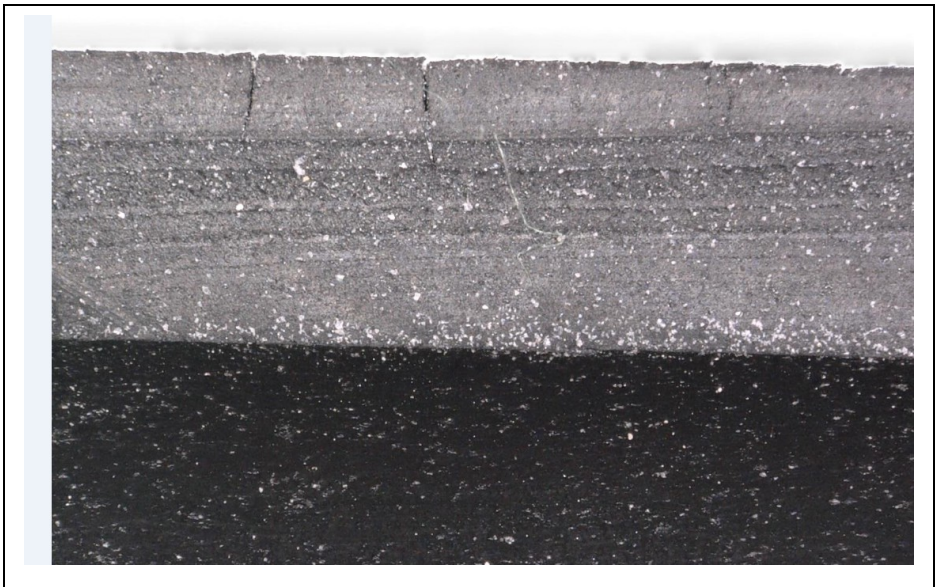


Bild 8: Beispiel 3- Profilschnitt der Schlauchwandung

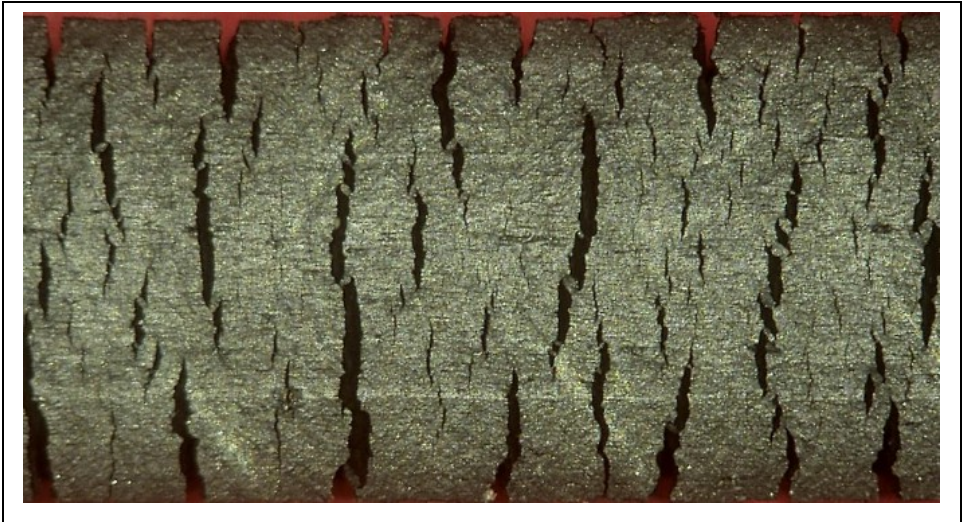


Bild 9: Beispiel 3- aktuelles Serienmuster nach Ozonprüfung



Bild 10: Beispiel 3-neuer Werkstoff (neuer Lieferant) nach Ozonprüfung