

FACHAUFSATZ

Artikelserie „Prüfverfahren praxisgerecht anwenden“

Prüfung der Ozonbeständigkeit – Der Feind steckt in der Luft

Erstveröffentlichung (Langversion): 07/2026

Abstract

Ozon in der Luft kann bei bestimmten unter Spannung stehenden Elastomeren starke Risse verursachen, die zu Dichtungsausfällen oder zumindest einer stark verkürzten Lebensdauer führen können. Um die Anfälligkeit für Ozonrisse zu ermitteln, werden Probekörper in einem genormten Verfahren untersucht. Dabei werden sie mechanisch vorgedehnt und in einer Prüfkammer bei konstanter Temperatur einer bestimmten Ozonkonzentration ausgesetzt. Nach einer festgelegten Prüfzeit werden möglicherweise auftretende Risse visuell bewertet.

Ozone Resistance Testing - The Enemy is in the Air

Ozone in the air can cause severe cracking in certain elastomers under stress, which can lead to seal failure or, at the very least, a significantly shortened service life. To determine susceptibility to ozone cracking, test specimens are evaluated using a standardized procedure. In this process, they are mechanically pre-stretched and exposed to a specific ozone concentration in a test chamber at a constant temperature. After a specified test period, any cracks that may have formed are visually assessed.

1. Einleitung

Ozon ist eine besondere Verbindung aus Sauerstoffatomen. Während Sauerstoffmoleküle aus zwei Sauerstoffatomen (O_2) bestehen, werden Ozonmoleküle aus drei Sauerstoffatomen (O_3) gebildet. In der Stratosphäre schützt Ozon die Erde vor starker UV-Strahlung und ermöglicht so Leben auf unserem Planeten. Wenn man vom Ozonloch spricht, ist fehlendes Ozon in der Stratosphäre gemeint.

In unserem erdnahen Lebensbereich kommt Ozon als Gas in der Umgebungsluft vor und ist ein giftiges und sehr effektives Oxidationsmittel. In Bodennähe entsteht Ozon durch bestimmte chemische Reaktionen. Die wichtigsten Ausgangsstoffe sind flüchtige organische Verbindungen (VOC, z.B. in Lösemitteln oder Kraftstoffen) und Stickoxide (NO_x), wie sie bei der Verbrennung entstehen. Besonders bei hohen Temperaturen, wenig Wind und starker Sonneneinstrahlung (v.a. UV-Strahlung) entsteht aus den oben genannten Ausgangsstoffen Ozon. Aber auch bestimmte Geräte und Maschinen können bei ihrem Betrieb unerwünscht Ozon produzieren, wie z.B. ältere Laserdrucker und Kopierer, Hochspannungs- und Schweißanlagen oder bestimmte Luftreiniger. Bei Auftreten ho-

her Ozonkonzentrationen in der Umgebungsluft werden öffentliche Warnungen ausgesprochen, da es zu Reizungen von Augen und Atemwegen führen kann.

Für bestimmte Arten von ungesättigten Elastomeren (R-Kautschuke wie z.B. NR, NBR, CR u. ä.) ist Ozon auf Grund seiner hohen Oxidationsfähigkeit sehr schädlich, v.a. wenn die Gummibauteile einer bestimmten Vorspannung ausgesetzt sind. „Die größte Schädigung [wenige, große Risse] tritt bei einer Dehnung auf, die nur minimal über der kritischen Dehnung liegt.“¹

Autoren:

Dipl.-Ing.

Bernhard Richter,

Geschäftsführer, OPR Group GmbH

E-Mail:

bernhard.richter@oprgroup.de

Dipl.-Ing. (FH)

Ulrich Blobner,

Consultant, OPR Group GmbH

¹ TRIMBACH, Jürgen: Schutz von dienhaltigen Elastomeren gegen Ozonrisse in: GAK Gummi Fasern Kunststoffe, Heft 1, 2015, 68.

Unter „kritischer Dehnung“ versteht man die Dehnung unterhalb welcher in der Ozonprüfung keine Risse mehr auftreten. „Bei extremer Dehnung treten zwar sehr viele Risse auf, die häufig aber derart klein sind, dass sie mit bloßem Auge kaum zu erkennen sind.“² Ozonrisse können gravierende Dichtungsausfälle verursachen. (**Abb. 1**) In der langjährigen Statistik der OPR Elastolabs zu den häufigsten Schadensursachen rangieren Ausfälle durch Ozonrisse auf dem dritten Platz und stellen somit einen relativ oft auftretenden Schadensmechanismus dar.



Abb. 1: Hier hat „der Feind in der Luft“, nämlich das Ozon, zu einem Ausfall von einer NBR-Kabeltülle geführt. (Bild: OPR Group GmbH)

Besonders anfällig sind Kabel und Schläuche, die auf Grund von Biegungen lokal hohe Vorspannungen aufweisen. Aber es kommt auch häufig vor, dass an vormontierten Dichtungen in Baugruppen bereits bei der Zwischenlagerung Ozonrisse auftreten. Um Ozonrisse zu vermeiden, ist eine genaue Kenntnis der Schadensmechanismen und der dafür anfälligen Werkstofftypen sehr nützlich. Abhilfe in kritischen Anwendungen schafft die Vermeidung des Einsatzes von R-Kautschuken oder die Verwendung von Ozonschutzmitteln im Compound. Ein v.a. in Fahrzeugreifen sehr häufig eingesetztes und aktuell viel diskutiertes Ozonschuttmittel ist 6PPD. Auf Grund seiner geringen Ionisierungsenergie reagiert es viel schneller mit Ozon als das Elastomer selbst, womit es das schädliche Ozon abfängt und neutralisiert. Ist 6PPD an der Oberfläche verbraucht, migriert „frisches“ 6PPD (z.B. aus dem Rei-

feninneren) an die Oberfläche nach. Durch die Reaktion mit Ozon entsteht 6PPD-Chinon, welches über Regen in Gewässer gelangt und stark giftig für bestimmte Fischarten ist. Deswegen werden momentan von der Industrie Alternativen zu diesem Mischungsbestandteil gesucht, auch wenn er aktuell weder in den USA noch in Europa offiziell verboten ist.

2. Das Verfahren in Kürze

Bei der Ozonprüfung werden die Probekörper in eine Vorrichtung mit einer definierten Vorspannung eingebaut.

Sowohl die ISO 1431-1 als auch die ASTM D1149 empfehlen, dass die vorgespannten Probekörper vor der Prüfung in einer ozonfreien Umgebung in Dunkelheit für längere Zeit gelagert bzw. konditioniert werden sollen. (z.B. ISO 1431-1: zwischen 48h und 96h) Das erfolgt in der Regel in einer abgedunkelten Prüfkammer mit einer eingestellten Luftfeuchte von $50 \pm 5\%$. Dies soll dazu beitragen, dass die enthaltenen Ozonschutzwachse an die Oberfläche gepresst werden, um eine optimale Schutz- oder Barrierewirkung zu entfalten. Durch die Dehnung wird nämlich die bestehende Ozonschutzwachsschicht teilweise beschädigt und aufgebrochen, so dass in manchen Bereich der Elastomer ungeschützt vorliegt. Durch die Konditionierung im gespannten Zustand kann die Schutzschicht wieder „repariert“ werden. Das führt zwar zu einer besseren Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse an Prüfplatten, bildet aber die Anwendung nicht ab, wo in der Regel geringere Dehnungen vorliegen und damit das Ozonwachs langsamer an die Oberfläche migriert, durch welches die Barrierewirkung entsteht.

Es gibt noch einen zweiten Effekt, der die Konditionierung der vorgespannten Probekörper notwendig macht: Bei der mechanischen Dehnung von Elastomeren baut sich im Material sofort eine hohe mechanische Spannung auf. Diese Spannung bleibt jedoch nicht konstant, sondern nimmt in den ersten Stunden durch molekulare Umlagerungsprozesse rapide ab (Spannungsrelaxation). Würde man die Probekörper sofort nach dem Dehnen einer Ozonbelastung aussetzen, würde sich die Spannung während der ersten Teststunden massiv verändern. Die Ozonrissebildung ist aber stark von der anliegenden Spannung abhängig. Durch die vorgeschriebene Konditionierungszeit können sich die inneren Spannungen auf einem stabilen und konstanten Niveau einpegeln, bevor die Probekörper mit Ozon in Kontakt kommen.

² Ebd., S. 30

Die in einer Vorrichtung vorgespannten Probekörper werden im Inneren der Ozonkammer auf eine langsam rotierende Welle montiert. (**Abb. 2**) Dadurch wird sichergestellt, dass die Proben relativ gleichmäßig von Ozon umspült werden. Häufig wird bei einer Ozonkonzentration von 50 pphm über 48h bei 23°C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55% und einer 20%igen Dehnung der Probekörper geprüft. Zwar wird der Begriff Ozon häufig in der Öffentlichkeit genannt, jedoch ist in der Allgemeinheit wenig über Ozonkonzentrationen bekannt. Eine Ozonkonzentration von 50pphm (parts per hundred million) entspricht 0,5 ppm. Bei diesem Wert befinden sich ca. 1mg Ozon in einem Kubikmeter Luft. Der AGW (Arbeitsplatzgrenzwert) für Ozon liegt nach deutschen Vorschriften bei 0,1ppm.³



Abb. 2: Einbau der in einer Vorrichtung vorgespannten Probekörper in einen Ozonprüfschrank (Bild: Tobias Ehmer)

Nach Ende der Prüfzeit von mindestens 24h und selten mehr als 168h werden die Proben im noch gedehnten Zustand unter Vergrößerung, z.B. 7-fach, begutachtet. Finden sich Risse auf der Oberfläche der Prüflinge, gilt die Probe als nicht ozonbeständig. In Ausnahmefällen wird auch mittels Vergleichsbildern die Intensität der gefundenen Risse beurteilt (siehe frühere Ozonprüfnorm DIN 53509⁴). Allerdings ist es dann schwierig, die unterschiedlichen Ausprägungen von Rissen aus anwendungstechnischer Sicht zu bewerten.

³ Vgl. SCHÖNWEIZ, Andreas: Lebensdauer unter Ozon-Einfluss – Ozonprüfung für Gummimaterialien und Kabelisolierungen, Onlineartikel von KGK Rubberpoint, 20.04.2016, (zuletzt aufgerufen am 12.06.2026): <https://www.kgk-rubberpoint.de/lebensdauer-unter-ozon-einfluss-a-f124c40f059b69811c62650f07168862/>

⁴ DIN 53509-1:2001-01 Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung der Beständigkeit gegen Rissbildung unter Ozoneinwirkung – Teil 1: Statische Beanspruchung und DIN 53509-1 Berichtigung 1: 2003-05 (Normen zurückgezogen)

⁵ ISO 1431-1:2024-07 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Resistance to ozone cracking – Part 1: Static and dynamic strain testing

In den einschlägigen Prüfnormen gibt es verschiedene Prüfverfahren zur Ozonbeständigkeit, darunter auch dynamische. In unserer Prüfpraxis sind allerdings nur statische Prüfungen von Relevanz, weil sich damit ein Großteil der industriellen Anforderungen und Fragestellungen abdecken lässt. Bei der ISO 1431-1 ist das Verfahren A das am häufigsten angefragte.

Einsatzbereich	Kosten des Prüfverfahrens
Werkstoffprüfung ☒	Bis 100€ ☐
Fertigteilprüfung ☒	100 bis 200 € ☐
Fertigungsqualität ☐	200 bis 500 € ☒
Wareneingangskontrolle ☐	500 bis 2.000 € ☐
Schadensanalyse ☒ (selten)	>2.000 € ☐

„Zur wirksamen Absicherung gegen Ozonrisse sollten die Nachweisprüfungen der Beständigkeit immer an Fertigteilen bei der Erstbemusterung durchgeführt werden, um chargenbedingte Unterschiede zur Prüfplatte als Fehlerursache auszuschließen.“

Bernhard Richter,
Geschäftsführer

3. Wichtigste Prüfnormen

Im Laboralltag ist die ISO 1431-1⁵ die am häufigsten angewendete Prüfmethode, auch die die ASTM D 1149⁶ wird regelmäßig verlangt. Die typischen Ozonkonzentrationen liegen zwischen 50 und 200 pphm v/v.

Zu erwähnen ist noch die zurückgezogene DIN 53509-1⁷, die u.a. eine Bewertung der Ausprägung der Rissbilder in verschiedene Stufen beschrieb. Die aktuell gültige ISO1431-1, Ausgabe 2024-07, verweist im Anhang A auf Seite 16 auf diese DIN-Norm.

Außerdem gibt es noch zahlreiche firmeninterne Anweisungen zur Ozonprüfung und Normen für Spezialgebiete, wie der Elektrotechnik. Elektrokabel werden bspw. nach DIN EN 60811-403⁸ über Prüfdorne aus

⁶ ASTM D 1149:2018 Standard Test Methods for Rubber Deterioration – Cracking in an Ozone Controlled Environment, Reapproved 2025

⁷ DIN 53509-1: Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung der Beständigkeit gegen Rissbildung unter Ozoneinwirkung – Teil 1: Statische Beanspruchung, Ausgabe: 2001-01 und DIN 53509-1 Berichtigung 1: 2003-05

⁸ DIN EN 60811-403:2012-12 und VDE 0473-811-403:2012-12: Kabel, isolierte Leitungen und Glasfaserkabel – Prüfverfahren für nichtmetallene Werkstoffe – Teil 403: Sonstige Prüfungen -Prüfung der Ozonbeständigkeit für vernetzte Mischungen (IEC 60811-403:2012); Deutsche Fassung EN 60811-403:2012

Messing oder Aluminium gebogen, um realitätsnahe Vordehnungen zu erhalten, welchen den Ozonangriff an der Kabelisolierung ermöglichen.

4. Interpretation der Messergebnisse bzw. Bewertung des Verfahrens

Seit den 1950er⁹ bzw. 1960er¹⁰ Jahren gibt es ASTM-, DIN- und später ISO-Normen zur künstlichen Ozonalterung in Ozonprüfkammern. Das Verfahren ist also weltweit etabliert und von Anwendern angenommen.

Schwierig ist jedoch die Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen und deren Bewertung. Normen wie die ISO 1431-1 erlauben die Variation von Prüfparametern in einem großen Umfang. So gibt es vier Abstufungen in der Ozonkonzentration (**Abb. 3**), je nach Anfälligkeit des zu untersuchenden Werkstoffes. Es sind drei Prüftemperaturen möglich (23°C, 30°C und 40°C), drei Luftfeuchtigkeitsgrade, verschiedene Prüfzeiten und bei den Vordehnungen sind sogar 10 verschiedene Stufen erlaubt.



Abb. 3: Um die richtige Ozonkonzentration in der Ozonprüfkammer sicherzustellen, wird diese von zwei unabhängigen Sensoren gemessen, der erste ist für die Regelung verantwortlich, der zweite zur Kontrolle bzw. Überwachung. (Bild: OPR Group GmbH)

Da nur Prüfergebnisse mit den gleichen Prüfparametern bei gleicher Probekörpergeometrie und Prüfzeit verglichen werden können, müssen vergleichende Untersuchungen meist konkret geplant und gemeinsam durchgeführt werden. Angaben zur Ozonbestän-

digkeit auf Materialdatenblättern haben deswegen in vielen Fällen nur eine sehr eingeschränkte Aussagekraft. Hinzu kommt, dass wichtige Prüfparameter auf diesen Datenblättern oft gar nicht angegeben sind. Für praktische Anwender geht es bei der Ozonprüfung meistens darum, ob Risse auftreten oder nicht. (**Abb. 4**) Will man sich besonders absichern, werden verschärfte Prüfbedingungen empfohlen (siehe unten). Wenn man tiefer in die Materie einsteigt, wird der Zusammenhang zwischen Ozonrissen und der aufgetragenen Dehnung schnell ziemlich komplex. „Die Anzahl der Risse auf einem Probekörper ist abhängig von ihrer Größe, und dieser Zusammenhang ist, je nach Art des Materials, abhängig von der kritischen Dehnung für eine bestimmte Prüfdauer und Dehnung.“¹¹ Bei dynamischen Prüfungen wird die Beurteilung der Rissbildung noch schwieriger, da sich Ozon- und Ermüdungsrissbildung überlagern können. Interessierte Leser seien auf den Fachartikel „Ermüdungsrisse – Fehlstellen und Ozon – die unterschätzten Auslöser“¹² verwiesen.



Abb. 4: NBR-Streifenprobe 125 x 10 mm nach Ozonprüfung nach ISO 1431-1A (Konditionierung 48-96h, Prüfzeit 72h, rel. Feuchte max. 65%, Dehnung 20%, Ozonkonzentration 50pphm) (Bild: OPR Group GmbH)

Für Dichtungsanwender empfiehlt sich folgende Vorgehensweise:

1. Qualifikationsprüfungen für die Ozonbeständigkeit immer an den Fertigteilen durchführen, gute Prüfplattenergebnisse alleine reichen zur Absicherung nicht aus.
2. Im Zweifelsfall verschärfte Prüfbedingungen anwenden, was konkret heißt:
 - keine Konditionierung vorsehen, siehe oben, wo durch eine vorgelagerte Prüfung unter Dehnung die Ozonschutzwachse ausgepresst werden, was in der Anwendung auch nicht in diesem Umfang stattfindet.

⁹ Die US-amerikanische Norm zur künstlichen Ozonprüfung ASTM D1149 erschien erstmals 1951

¹⁰ Die inzwischen durch die ISO 1431-1 ersetzte DIN 53509-1 (Bestimmung der Beständigkeit gegen Rissbildung unter Ozoneinwirkung) erschien erstmals 1964.

¹¹ DIN ISO 1431-1: Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Widerstand gegen Ozonrissbildung – Teil 1: Statische und dynamische Prüfung (ISO 1431-1:2004 + Amd 1:2009), S.20 (A.2

Prüfung mit statischer Dehnung), Mai 2011

¹² BLOBNER, U. und RICHTER, B.: Ermüdungsrisse- Fehlstellen und Ozon – die unterschätzten Auslöser, Onlineartikel des O-Ring Prüflabor Richter, 07/2020, digital abrufbar: https://o-ring-prueflabor.de/wp-content/uploads/2024/09/fachwissen_schaden_ermuedungsrisse_07_2020.pdf

- als Prüftemperatur 23°C wählen, da auch erhöhte Temperaturen zu einer beschleunigten Migration der Ozonschutzwachse an die Oberfläche führen
- als Ozonkonzentration mindestens 50 pphm wählen, mit 200pphm erhöht sich die Aussagekraft der Ozonprüfung weiter
- als Prüfzeit mindestens 72h oder 168h wählen
- die Luftfeuchte tendenziell höher ansetzen, z.B. 60+/-5%

Damit erhält man einen belastbaren Nachweis über die Wirksamkeit des Ozonschutzes.

5. Zukunft des Verfahrens

Insbesondere die Ozonprüfung an Fertigteilen wird weiterhin an Bedeutung gewinnen, nicht nur als Qualifikations- sondern auch als Serienprüfung, da nur so ein wirksamer Schutz gegen Ozonrisse möglich ist. Dies ist besonders bei global beschafften Elastomerbauteilen wichtig, da die Lieferketten oft nicht transparent sind.

Hinzu kommt, dass viele Entwicklungsabteilungen großer Unternehmen unter hohem Kostendruck stehen und versuchen höherwertige Elastomere durch kostengünstigere zu ersetzen oder mit bestehenden einfachen Werkstoffen erweiterte Anwendungsspektren abdecken müssen (z.B. längere Lebensdauer, höhere Vorspannungen usw.). Dies ist nur möglich, wenn der Einsatz alternativer Werkstoffe bzw. wenn erweiterte Anwendungen prüftechnisch abgesichert werden können.

Auch ist zu erwarten, dass es bei den für den Ozonenschutz eingesetzten Chemikalien aus Umweltschutzgründen zu Veränderungen kommen wird, z.B. beim Alterungsschutzmittel 6PPD, was weitere Qualifikationsprüfungen von Ersatzchemikalien zur Folge haben wird.

Im Vergleich zu kompletten Umweltsimulationen mit Temperaturwechseltests und UV-Bestrahlungen stellt die einfache Ozonprüfung ein wesentlich preiswerteres Prüfverfahren dar und ist einigen Fällen in Bezug auf ihre Aussagekraft schon ausreichend. Daher wird diese Prüfung weiterhin eine große Bedeutung in der Praxis haben.

6. Praktische Hinweise für eine Auftragsvergabe

Für die Ozonprüfung werden Probekörper aus Prüfplatten mit einer Stärke von 2mm ausgestanzt. Meist werden längliche rechteckige Probekörper verwendet, aber es können auch Schulterstäbe wie beim Zugver-

such oder schmale Schulterstäbe nach ISO 1431-1 zum Einsatz kommen.

Ebenso können Fertigteile in Ozonatmosphäre geprüft werden. Hierbei empfiehlt sich eine Absprache mit dem Prüflabor, wie das jeweilige Bauteil verspannt und welche Bereiche bewertet werden sollen.

Die Standarddurchlaufzeit im Labor (Ankunft der Prüfplatten bzw. Fertigteile bis Versand des Ergebnisberichts an den Kunden) beträgt ca. 5 bis 10 Arbeitstage bei einer maximalen Prüfzeit von 72h.

7. Weiterführende Links

Kurzvideo der OPR Elastolabs zur Thematik:

<https://www.youtube.com/watch?v=fxb6bycYhK4>