

Ozonentfernung aus Raumluft durch Adsorption an Gummiabfällen

Autoren

Prof. Dr. Manfred Sietz, B. Eng. Christian Rikus, B. Eng. Jens Ahle, B. Eng. David Ruszkiewicz *

* Hochschule OWL, FB 8, An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter

Stichworte

Bodennahe Ozonentstehung, Chemie des Ozons, Folienextrusion, Flexodruckverfahren, Koronavorbehandlung, Toxikologie, Ozonolyse, Gummi, Oberflächenreaktionen; Ozonreduktion

Einführung

Ozon ist ein aus drei Sauerstoffatomen bestehendes Molekül, das bei Zimmertemperatur gasförmig in der Luft enthalten ist. Ozon besitzt eine kurze Halbwertszeit, sodass es innerhalb einiger Tage zu dimeren Sauerstoff zerfällt. O_3 ist ein starkes Oxidationsmittel, das die Atemwege von Menschen und Tieren reizen kann. Das Ozon in der unteren Stratosphäre (die Ozonschicht) schützt das Leben auf der Erde vor der energiereichen ultravioletten Strahlung der Sonne [1].

Ozon entsteht in den oberen Atmosphärenschichten auf natürlichen Wege aus der Photolyse von Luftsauerstoff, dessen Moleküle (O_2) durch den UV-C - Anteil des Sonnenlichts in zwei Sauerstoffatome dissoziieren (Abb. 1).

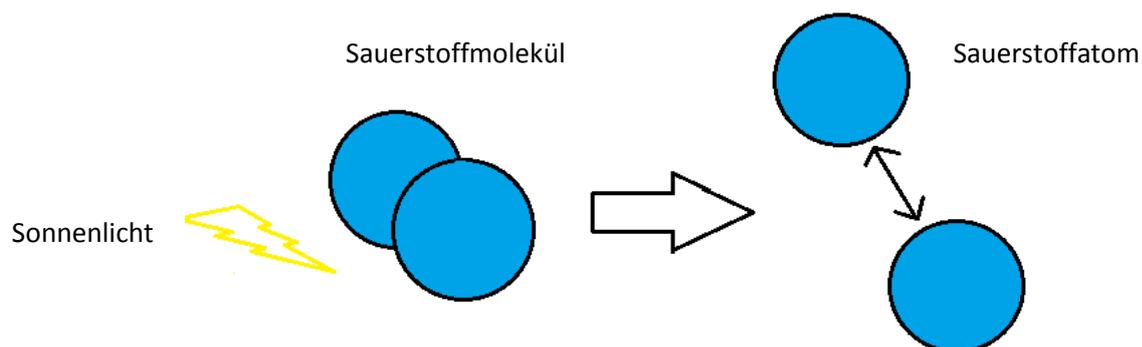


Abbildung 1: Photolyse Sauerstoffmolekül (eigene Abb.)

Daraufhin erfolgt eine Reaktion zwischen den Sauerstoffatomen und Molekülen sodass O_3 gebildet wird (siehe Abb. 2).

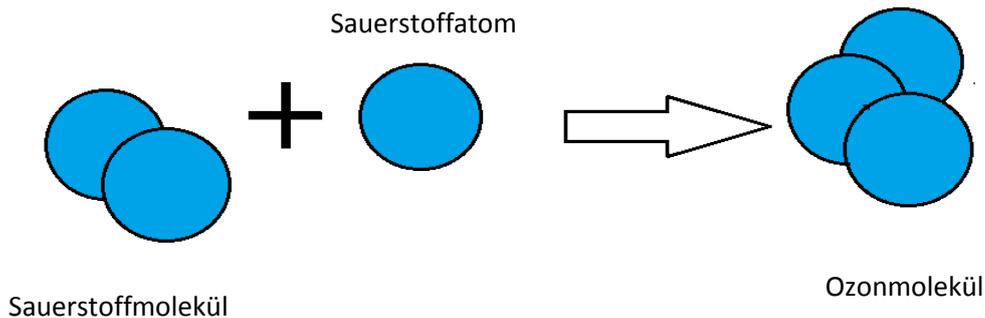


Abbildung 2: Bildung eines Ozonmoleküls

Toxikologie Ozon

Ozon wirkt reizend auf Schleimhäute und Augen und ist sehr reaktiv. Im Lungengewebe wird Ozon aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit absorbiert, da es in den oberen Atemwegen kaum zurückgehalten werden kann und bis in die Lungenbläschen vordringt [3].

Bei Versuchen mit Probanden in Inhalationskammern wurden je nach Konzentration des Ozons u. a. Geruchsbelästigungen, verstärkter Hustenreiz sowie eine verminderte sportliche Leistung beobachtet. Ab einer Konzentration von etwa $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zeigte sich bei ca. 6-stündiger Expositionsdauer eine Verminderung der Lungenfunktionen. Alle in den Versuchen aufgetretenen Auswirkungen des Ozons gehen nach Beendigung der Exposition wieder zurück.

Körperliche Belastung und ihre Dauer beeinträchtigen die gesundheitsgefährdende Wirkung des Ozons. Je tiefer man einatmet – zum Beispiel bei sportlicher Betätigung oder körperlicher Arbeit – desto mehr Ozon gelangt in die Lunge [3].

Um den Langzeiteffekten der Ozonexposition wie Lungenkrankheiten und einer Reduktion der Lungenleitung vorzubeugen, wurde ein Wert für die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) herausgegeben. Der MAK-Wert beschreibt die Konzentration, der ein Mensch ausgesetzt sein kann ohne langzeitliche Schäden davonzutragen. Trotz Einführung der AGW- Werte in 2005 gilt orientierend der letzte festgelegte MAK- Wert für Ozon in Höhe von $0,2 \text{ mg}/\text{m}^3$. [4].

Akute Wirkungen

Die akuten Wirkungen von Ozon auf den Menschen unterscheiden sich je nach Ozonkonzentration in der Luft. Akute Wirkungen, die nach mehrstündiger Exposition mit gleichzeitiger körperlicher Belastung auftreten können, sind unter anderem [5]:

- **Ab circa 100 bis 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$:** Veränderte Lungenfunktion, erhöhter Atemwegwiderstand.
- **Ab circa 120 bis 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$:** Die körperliche Leistungsfähigkeit nimmt ab.
- **Ab circa 150 bis 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$:** Möglichkeit zur Entstehung von entzündlichen Reaktionen in den oberen und den unteren Atemwegen.
- **Ab circa 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$:** Subjektive Befindlichkeitsstörungen wie Reizung der Atemwege, Husten, Kopfschmerz und Atembeschwerden, teilweise Tränenreiz

- **Ab circa 240 bis 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** : Die Häufigkeit von Asthmaanfällen nimmt zu [5].

Zudem zeigen Trends, dass eine erhöhte Ozonbelastung die Anfälligkeit der Atemwege für allergische Reaktionen bzw. die Reaktion auf Allergene wie Pollen, Stäube etc. vergrößern kann. Die Reaktionen der Allergiker werden durch hohe Ozonbelastungen verstärkt und die Anzahl der Reaktionen erhöht.

Bei wiederholter intensiver Ozonbelastung kann sich die Reaktionsbereitschaft der Bronchialmuskulatur anpassen, sodass Ozonkonzentrationen, die anfangs eine deutliche Wirkung hervorgerufen haben, nach wenigen Tagen nur noch zu schwächeren oder keinen erkennbaren klinischen Wirkungen führen. Allerdings kommt es weiterhin zu entzündlichen Reaktionen [5].

Chronische Wirkungen

Zu den langfristigen, nicht krebserregenden Auswirkungen häufiger Ozonbelastung beim Menschen ist bisher wenig bekannt. Die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen lassen darauf schließen, dass extreme und dauerhafte Ozonbelastungen zu irreversiblen Veränderungen des Lungengewebes führen können [5].

Kanzerogene Wirkung

Die Datenlage hinsichtlich der kanzerogenen Wirkung von Ozon ist derzeit nicht eindeutig. In Tierversuchen konnte bei lebenslanger Einwirkung sehr hoher Ozonkonzentrationen sowohl eine Erbanlagen schädigende Wirkung als auch die Entstehung von Metastasen im Lungengewebe festgestellt werden.

Beim Menschen besteht ebenfalls der Verdacht eines erhöhten Lungenkrebsrisikos. Eine amerikanische Studie gibt ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko bei Männern an, nicht jedoch bei Frauen [5].

Bodennahe Ozonentstehung

Im Gegensatz zu Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden entsteht Ozon nicht unmittelbar anthropogen. Ozon ist ein „sekundärer Luftschadstoff“, der sich unter Einwirkung von Sonnenlicht aus Vorläuferstoffen wie Stickstoffoxiden (NO_x) und leicht flüchtige organische Substanzen ohne Methan (NM VOC) bildet [6].

Die Hauptkomponente der Ozonbildung ist Stickstoffdioxid (NO_2), das unter dem Einfluss von UV-Strahlung aufgespalten wird. Dabei entstehen Stickstoffmonoxid (NO) und Ozon (O_3). Reagieren Stickstoffmonoxid und Ozon miteinander, entsteht wieder Stickstoffdioxid und Luftsauerstoff (O_2), sodass Ozonbildung und Ozonabbau sich die Waage halten und einen Kreislauf bilden[6].

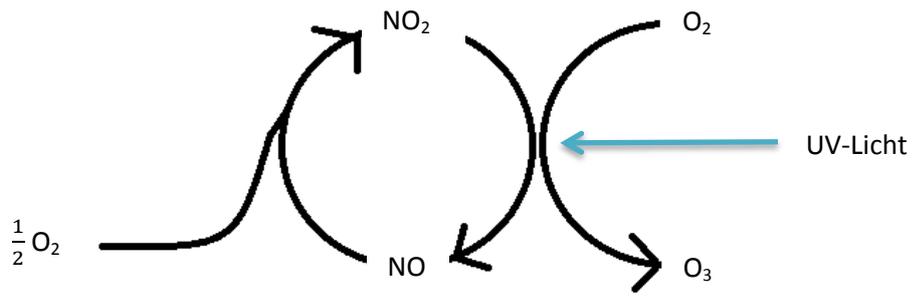


Abbildung 3: Bodennahe Ozonbildung, geändert nach [7]

Ohne UV-Strahlung (z.B. in der Nacht), findet ein Ozon-Abbau statt. Deshalb bilden sich Gleichgewichtszustände aus und die Ozonbelastung durch die Sonneneinstrahlung am Tag bleibt insgesamt gering. O₃ wird durch NO ständig wieder abgebaut, während NO₂ ozonaufbauend wirkt und dabei verbraucht wird [7].

Der Gleichgewichtszustand wird durch NM VOC wie CO, Aldehyde sowie Kohlenwasserstoffe beschleunigt, da deren Oxidation durch zwei katalytische Kreisprozesse mit der Ozonbildung gekoppelt ist. Durch die ablaufenden Kreisprozesse verbleibt die Konzentration von Stickstoffdioxid auf hohem Niveau und die Ozonkonzentration nimmt zu (siehe Abb. 4).

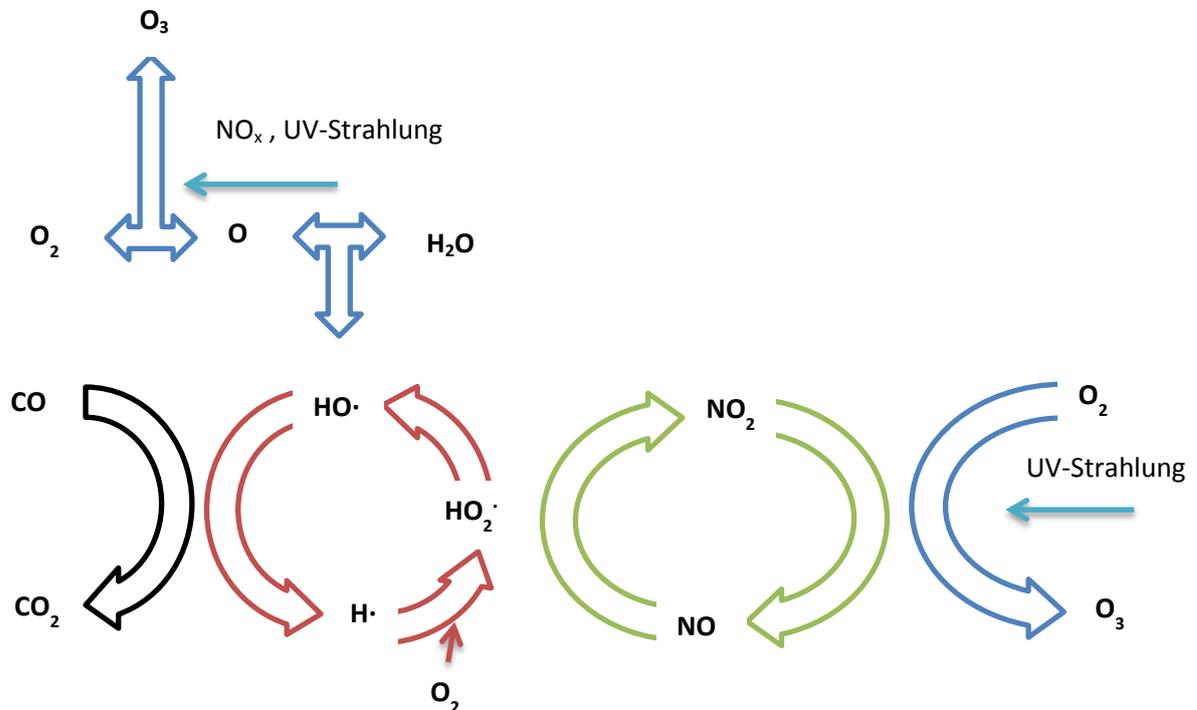


Abbildung 4: Katalytische Kreisprozesse, geändert nach [7]

Abbildung 4 zeigt die Wirkungsweise der katalytischen Kreisprozesse bei der bodennahen Ozonbildung. HO[•]-Radikale geben ihr Sauerstoffatom an Kohlenmonoxid ab, wobei ein Wasserstoffradikal H[•] zurückbleibt (roter und schwarzer Kreislauf). Das Wasserstoffradikal H[•] verbindet sich mit Sauerstoffmolekülen und es bilden sich Hydroperoxidradikale HO₂[•], die daraufhin NO zu NO₂ oxidieren (roter und grüner Kreislauf). Unter Einwirkung von Licht mit Wellenlängen < 420 nm oder hohen Sommertemperaturen reagiert NO₂ mit weiteren Sauerstoffmolekülen zu Ozon.

Ähnliche Prozesse laufen bei der industriellen Herstellung und Bedruckung von Kunststoffen, zum Beispiel bei der Anwendung des Flexodruckverfahrens, ab. Im Laufe des Herstellungsprozesses kommt es zur Anreicherung von Ozon in der Luft der Fertigungshallen von Betrieben, sodass diese dann über Belüftungsanlagen gereinigt und ausgetauscht werden muss.

Flexodruckverfahren

Der Flexodruck ist ein direktes Hochdruckverfahren, das bedeutet die Druckplatte gibt die Farbe beim Druck direkt auf den Druckträger ab. Beim Flexodruckverfahren werden flexible Druckplatten aus Fotopolymer oder Gummi in Kombination mit niedrigviskosen Druckfarben verwendet. Der Flexodruck zeichnet sich durch seine vielseitigen Einsatzgebiete aus [8].

Mittels Flexodruck ist es möglich, Verpackungen aus Kunststoff wie PE, PET, PVC, PS, PP, PC, metallisierte Folie, Papier, Karton und Pappe zu bedrucken. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind Klebefolien, Isolationspapier, Getränkeverpackungen, Servietten, Durchschreibesätze, Tapeten und Latexballons.

Um Kunststoffe bedrucken zu können, müssen diese erst vorbehandelt werden. Die Bedruckbarkeit von Kunststofffolien wird durch Vorbehandlung des Bedruckstoffes mittels Koronabehandlung ermöglicht [8].

Vorbehandlung mittels Koronabehandlung

Polyethylen-, Polypropylen- und Polyesterfolien haben eine unpolare, elektrisch gut isolierende und wasserabweisende Oberfläche. Diese Eigenschaften führen dazu, dass sie durch Druckfarben, Lösemittel, wässrige Kunststoffdispersionen, Klebstoffe oder Haftvermittler nur schlecht benetzbar sind. Das Bedrucken solcher Kunststoffe oder ihre Weiterverarbeitung durch Kaschieren oder Beschichten ist ohne Koronabehandlung nicht möglich, da die Druckfarben nicht haften würden [9].

Die Koronabehandlung wird bei der Folienherstellung am Ende des Fertigungsprozesses durchgeführt. Dabei wird die Folienbahn einer elektrischen Hochspannungs-Entladung ausgesetzt. Die Wirkungsweise der Koronabehandlung ist trotz weiter Verbreitung und zahlreicher Publikationen noch nicht vollständig geklärt. Oxidationsprozesse führen dazu, dass je nach Folie, verschiedene polare funktionelle Gruppen (z.B. Alkohole, Aldehyde, Carbonsäuren, Ester, Ether, Peroxide) gebildet werden. Ein Polymerabbau ist ebenfalls nachgewiesen [9].

Durch die Koronabehandlung kommt es zur Erhöhung von Glasübergangstemperatur und Schmelztemperatur. Daraus lässt sich schließen, dass es bei der Koronabehandlung zu einer Neuvernetzung der Makromoleküle kommt. Die Elektrische Entladung führt zu einer Ionisierung der Luft, was zur lokalen Bildung von Ozon führt [9].

Mesomere Struktur Ozon

Das Ozonmolekül ist gewinkelt aufgebaut. Die Bindungen zwischen den Sauerstoffatomen sind gegenüber Einfachbindungen etwas verkürzt und haben einen partiellen Doppelbindungscharakter, sodass man von mesomeren Grenzzuständen zwischen den Atomen ausgehen kann.

Die Doppelbindungen sind beim Ozonmolekül entweder links oder rechts vom zentralen O-Atom lokalisiert. Diese Grenzzustände können nur beschrieben werden, indem Polarisierungen aufgrund von Ladungstrennungen angenommen werden (siehe Abb.5) [10].

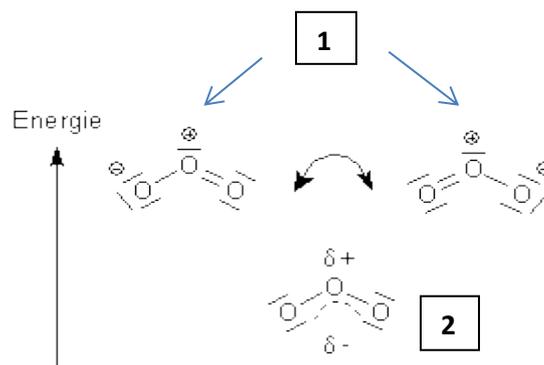


Abbildung 5: Ladungstrennung Ozonmolekül, geändert nach [10]

Die Polaritäten liegen jedoch nicht fest. Die Elektronen sind nicht in Doppelbindungen fixiert, sondern delokalisiert. Dieser *mesomere Zustand* ohne deutliche Ladungstrennung ist energetisch günstiger als die völlige Ladungstrennung.

Beim Ozon vergleicht man den mesomeren Zustand (2) mit den zwei Lewis-Strukturen (1), bei denen es zu inner-molekularen Ladungstrennungen kommt. Die sind hochenergetisch, allerdings als Grenzstrukturen nur theoretisch vorhanden oder durch Energiezufuhr zu erreichen. Die mesomere Form mit der positiven Partialladung am mittleren Sauerstoffatom und negativen Partialladungen an den äußeren Sauerstoffatomen ist im Vergleich dazu zwar energieärmer, allerdings ist Ozon an sich sehr reaktiv [10].

Ozonolyse

Die Ozonolyse beschreibt die Zerstörung einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung durch ein Ozonmolekül siehe (Abb. 6) [11].

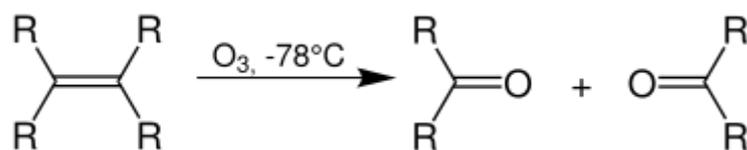


Abbildung 6: Ozonolyse Organylrest [11]

R entspricht einem Organylrest. Je nach Aufarbeitung erhält man aus dem Alken als Produkte Carbonylverbindungen (insbesondere Aldehyde), Alkohole oder Carbonsäuren. Bei der Ozonolyse wird sowohl die pi-Bindung als auch die sigma-Bindung zwischen den Kohlenstoffatomen gebrochen [11].

Reaktionsbedingungen und Mechanismus

Zuerst wird das polare Ozon über eine 1,3-dipolare Cycloaddition an das Alken addiert. Es bildet sich dabei das so genannte Primärozonid. Das Primärozonid zerfällt durch Bruch der C-C-Bindung und einer der beiden O-O-Bindungen im Ozon in eine Carbonylverbindung und ein instabiles Carbonyloxid. Die Carbonylverbindung und das Carbonyloxid bilden durch eine weitere 1,3-dipolare Cycloaddition das so genannte Sekundärozonid [11].

Wenn an der Doppelbindung sperrige Substituenten vorhanden sind, kommt es bei der Ozonierung nicht zur Bildung von Primärozoniden, sondern zur Bildung von Epoxiden, die sich zu Aldehyden umlagern können. Durch weitere Oxidation werden Carbonsäuren mit einem unveränderten Kohlenstoffgerüst gebildet [11].

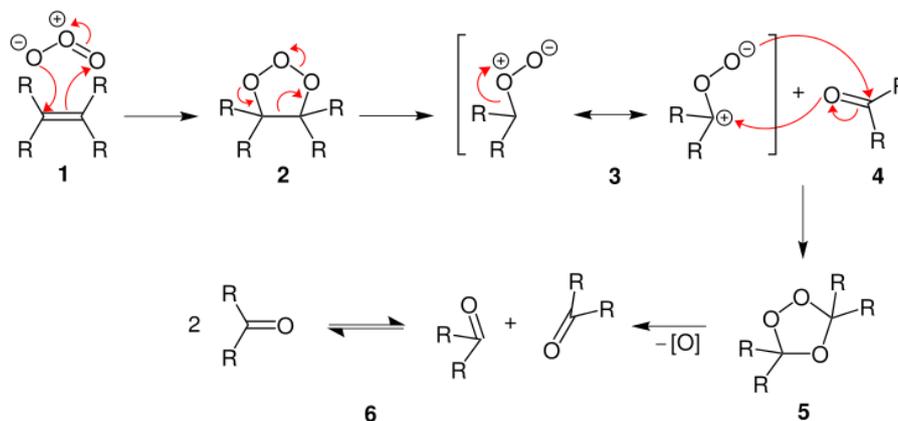


Abbildung 7: Ozonolyse am Beispiel "Alken" [11]

Ein Alken (1) reagiert mit Ozon und es bildet sich ein Primärozonid (2). Daraufhin zerfällt das Primärozonid in ein Carbonyloxid (3) und eine Carbonylverbindung (4). (3) und (4) sind wiederum Grundlage für die Bildung eines Sekundärozonids (5). Unter reduzierenden Bedingungen entstehen zwei Ketone (6) [11].

Versuche bei der Firma Wentus Kunststoff GmbH, Höxter

Die Firma Wentus aus Höxter hat im Rahmen ihres Umweltprogramms das Problem der Ozonbildung an den Produktionsmaschinen erkannt und Lösungsansätze für dieses Problem in ihr Umweltmanagementsystem aufgenommen. Das Ozon wird im Rahmen der Vorbehandlung für das Bedrucken gebildet. Um die Haftung von verschiedenen Lacken oder Farben auf den Kunststoffoberflächen zu verbessern, ist es notwendig die Oberfläche anzurauen.

Dies geschieht in diesem Fall durch elektrische Hochspannungsentladung induzierte Oxidationsprozesse an der Kunststoffoberfläche („Koronabehandlung“). Dabei wird im Elektrodenzwischenraum chemisch Ozon gebildet, das in der Lage ist, die chemische Struktur des

Kunststoffmoleküls oxidativ durch Bildung sauerstofffunktioneller Gruppen zu verändern, den Kontaktwinkel zu verringern und den Bedruckungsvorgang dadurch positiv zu beeinflussen.

Aufgrund der reizenden Wirkung von Ozon auf die Atemwege von Menschen und das häufige Auftreten von Schläfenkopfschmerzen beim Einatmen von Ozon wird dieses durch ein spezielles Lüftungskonzept erfasst und im Weiteren durch eine verfahrenstechnische Behandlung aus der Abluft entfernt.

Verfahrensprinzip

Im Bereich der Gummiindustrie ist schon lange bekannt, dass Ozon einen Einfluss auf die Struktur von Gummiprodukten hat. Dieser Effekt basiert auf der Ozonolyse, bei welcher das Ozon mit dem mit Schwefel vulkanisierten Naturkautschuk (Gummi) an der C=C Doppelbindung reagiert. Dies geschieht durch eine elektrophile Addition des Ozons an die Doppelbindung wodurch das Molekül an dieser Stelle gespalten wird. Bei diesem Vorgang entsteht ein instabiles Primärozonid, welches in eine Carbonylverbindung und Carbonyloxid zerfällt.

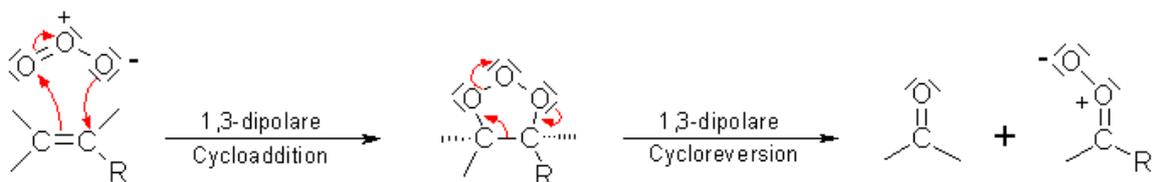


Abbildung 8: Ozonolyse Alkene, Teil 1 [12]

Die Carbonylverbindung und das Carbonyloxid reagieren in einem weiteren Schritt zu einem Sekundärozonid.

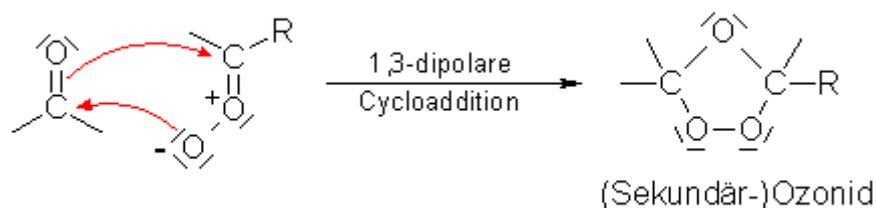


Abbildung 9: Ozonolyse Teil 2 [12]

Dieser chemische Ozonabbau wird im anschließenden verfahrenstechnischen Aufbau genutzt um das Ozon aus der Raumluft zu entfernen.

Chemische Oberflächenreaktion zw. Gummi und Ozon

Das eingesetzte Adsorbens Schnittstücke aus Gummi. Bei dem Produkt handelt es sich um Kühlwasserschläuche, die zum größten Teil in der Fahrzeugindustrie eingesetzt werden. Bei der Produktion dieser Schläuche fallen große Mengen Schlauchabschnitte als Abfall an, die als Adsorptionsmittel verwendet werden können (Abb. 11).

Der Hauptbestandteil der Schlauchabschnitte ist EPDM-Kautschuk (Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer), welcher zusätzlich mit synthetischen Garnen als Druckträger versehen ist. Das Garn hat keine Auswirkungen auf die Messergebnisse. EPDM-Kautschuk ist ein terpolymeres Elastomer (*Gummi*) und somit ein synthetischer Kautschuk. Die Oberflächenstruktur dieser Elastomer-Werkstoffe ist glatt, abriebfest, witterungs- und ozonbeständig.



Abbildung 10: Gummiadsorbens



Abbildung 11: Mischung 2:1 Gummiadsorbens und Latexadsorbens

Die eingesetzten Schnuller bestehen aus Latex. Die Größe und Form der Schnuller variiert. Die Schnuller, die als Adsorptionsmittel eingesetzt werden, bestehen aus reinem Latex und sind ebenfalls Abfallprodukte.

Bei ungesättigten Polymeren wie z.B. dem verwendeten Latex werden die Polymerketten durch Ozonolyse zerstört (siehe Abb. 12). Die Wirkung von Ozon auf ungesättigte Polymere ist davon abhängig, ob die Polymere gleichzeitig auch mechanisch beansprucht werden [13].

Ohne mechanische Beanspruchung bildet sich auf der Latexoberfläche eine ozonisierte Schicht, die als Schutzschicht wirkt und das weitere Eindringen von Ozon in die Masse hemmt. Bei mechanischer Beanspruchung entstehen auf dem Gummi Ozonrisse. Es ist anzunehmen, dass bei mechanischen Belastungen die ozonisierte „Schutzschicht“ mechanisch zerstört wird. Die dadurch frei werdende neue Oberfläche ermöglicht weitere Reaktionen zwischen Ozon und Elastomer [13], erfordern aber von der Reaktionskinetik her eine ausreichende Kontaktzeit.

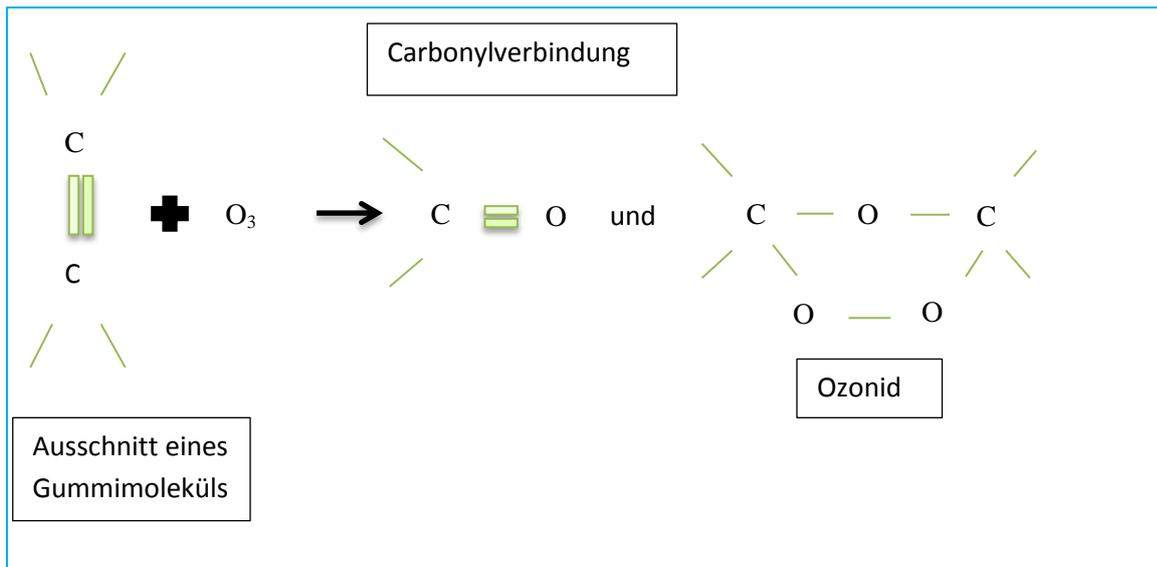


Abbildung 12: Chemische Oberflächenreaktion Gummi mit Ozon

Abbildung 12 zeigt die chemische Ozonolyse eines Gummimoleküls über eine Carbonylverbindung zum Ozonid. Die Oberflächen-„Wirkung“ des Ozons kann auch adsorptiv sich vorgestellt werden, siehe hierzu eine mechanistische Modellvorstellung in Abb. 13:

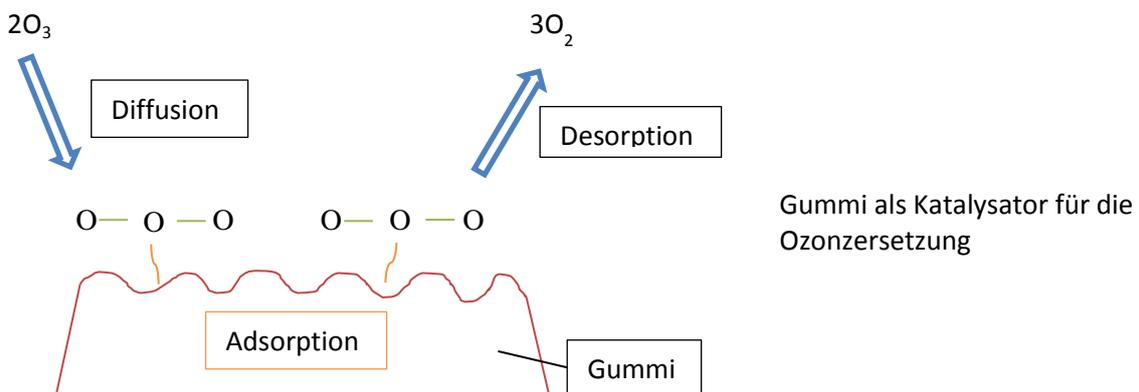


Abbildung 13: Katalytische Reaktionen an der Gummioberfläche

Vermutlich laufen an der Gummioberfläche sowohl chemisch-reaktive, als auch adsorptive Prozesse gleichzeitig ab. Der besondere „Charme“ des eingesetzten Gummi besteht darin, dass die Schlauchschnitte als industrieller Abfall anfallen und vergleichsweise teuer zu entsorgen sind. Die chemisch – reaktiven und adsorptiven Prozesse führen zu einem interessanten Verwertungspotential der Gummiabfälle.

Dies zu untersuchen ist Hauptgegenstand der nachfolgenden Praxisprüfungen, die bei dem Unternehmen Wentus in Höxter in 2013 durchgeführt wurden.

Verfahrensaufbau

Die ozonbelastete Luft wird zunächst durch ein bereits vorhandenes Lüftungssystem am Entstehungsort gefasst und über ein Rohr DN 150 abgeführt. Der speziell entwickelte Verfahrensaufbau muss dementsprechend in dieses vorhandene Rohrsystem integriert werden, welches anschließend die vom Ozon bereinigte Luft über Dach führt. Aus dieser Überlegung der Integration wird klar, dass der Reaktor der zum Zweck einer einfachen Integration Anschlüsse der Größe DN 150 haben sollte.



Abbildung 14: Verfahrensaufbau

Der Reaktor wird auf Grund der Effekte des bereits erläuterten Verfahrensprinzips mit Gummiformteilen gefüllt. Der durch die Gummiformteile gegebene Porenanteil und die vorgegebene Luftmenge ergaben hinsichtlich der strömungshydraulischen Betrachtungen einen Reaktordurchmesser von ca. 500 mm. Die Höhe des Reaktors ergab sich durch die gewünschte Gummi-Adsorbensmenge von ca. 200 L. Auf Grund dieser Basisdaten wurde durch uns, der auf Abbildung 14 gezeigte Reaktor konstruiert und gebaut. Die besonderen Anforderungen einer ozonhaltigen Atmosphäre und die dadurch resultierenden Effekte auf Metalloberflächen und Dichtungen wurden durch eine spezielle Innenbeschichtung mit Flüssigkunststoff, sowie die Verwendung von Papierdichtungen berücksichtigt. Der Reaktor wurde, wie auf der Abbildung 14 zu sehen, der Firma Wentus für einen Prototypenversuch zur Verfügung gestellt.

Funktion Rührchen

Um die Ozonreduktionsleistung des Prototypen zu überprüfen, wird der Ozongehalt an den dafür vorgesehenen Messstellen gemessen. Dazu werden sog. Dräger Rührchen verwendet. Die Funktion der Dräger Rührchen ist vergleichsweise einfach. Durch eine Handpumpe wird eine definierte Menge Luft eingesogen und dabei durch die Messrührchen in den Blasebalg der Pumpe gesogen. Durch das in der Luft enthaltene Ozon wird der Farbstoff in den Messrührchen bis zu einem gewissen Grad ausgebleicht. Eine Skala am Rührchen ermöglicht dann eine Bestimmung des Ozongehaltes der eingesogenen Luft.

Prototypentestlauf

Im ersten Prototypen-Testlauf wurde ein Reaktor mit einem Nennvolumen von ca. 200 L im Lüftungssystem integriert und täglich die Ozonkonzentration im Zu- sowie Abstrom des Reaktors mit Hilfe von Dräger-Rührchen ermittelt. Die ermittelten Ergebnisse wurden in einem Diagramm (Abb. 15), bezogen auf den Reduktionsgrad in Prozent und die Messdauer in Stunden, aufgetragen.

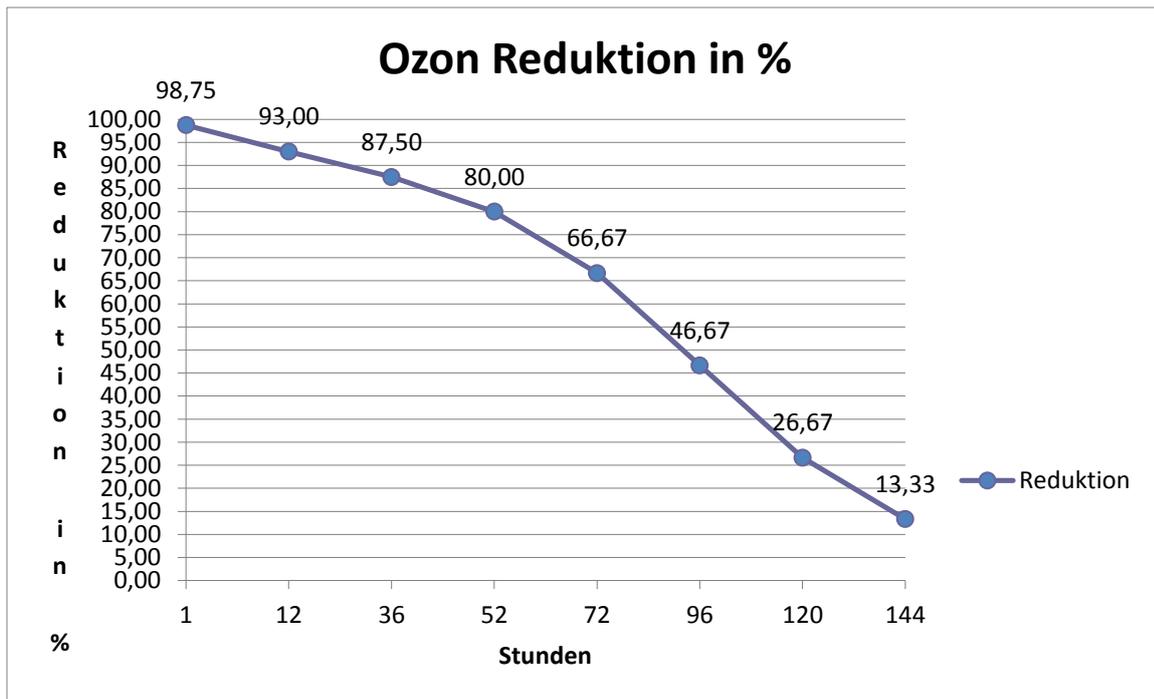


Abbildung 15: Ozonreduktion 1. Messreihe mit einem Reaktor (B. Eng. C. Rikus)

Die Ozonreduktion lag am ersten Tag bei 98,75 % und damit deutlich über den ersten Erwartungen der Entwicklergruppe. Die Messreihe zeigt allerdings ab Stunde 52 eine immer stärker abfallende Kurve, sodass hier Optimierungsbedarf besteht. Um diesem Prozess entgegen zu wirken, wurde anschließend eine Kolonnenlösung von 2 Reaktoren entwickelt.

Der Vorteil einer Kolonnenlösung besteht darin, dass in der Theorie der erste Reaktor zunächst einen großen Teil des Ozons adsorbiert und der zweite Reaktor lediglich mit langsam steigenden Ozonbelastungen beaufschlagt wird. Dieser Vorgang soll eine bessere Ausnutzung des Gummi-Adsorbens gewährleisten. Um diese Annahmen bestätigen zu können wurde ein weiterer Reaktor gebaut, in Reihe geschaltet und eine weitere Versuchsreihe durchgeführt (siehe Abb. 16).

Beide Reaktoren wurden wie in der ersten Versuchsreihe mit frischen Gummiformteilen (Adsorptionsmittel) befüllt.

Eine doppelte Menge an Adsorptionsmittel sollte die Standzeit deutlich erhöhen. Nach der Installation der Reaktoren und einer Dichtheitsprüfung vor Ort wurde die zweite Versuchsreihe gestartet.

Die Messungen erfolgen an drei Messstellen, Zustrom des ersten Reaktors, zwischen den Reaktoren und am Abstrom des zweiten Reaktors. Die Messungen erfolgten wie in der ersten Versuchsreihe mit Dräger-Röhrchen in einem 24-Stunden Rhythmus.

Die in der zweiten Messreihe ermittelten Ergebnisse werden in dem folgenden Diagramm (Abb. 17) dargestellt.



Abbildung 16: Kolonnenlösung

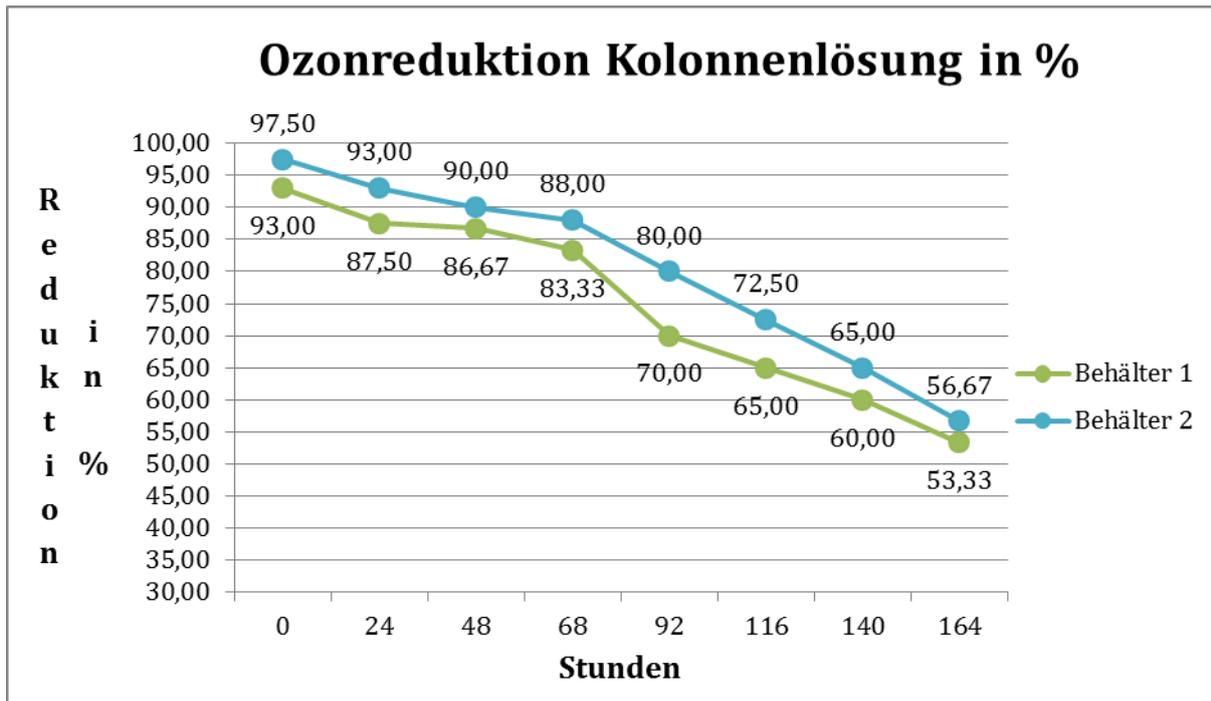


Abbildung 17: Ozonreduktion 2. Messreihe Kolonnenlösung [B. Eng. C. Rikus]

Wie im Prototypen-Testlauf ist die Reduktion des Ozons zunächst bemerkenswert. Obwohl die Ozonkonzentration im Abstrom des ersten Reaktors sehr gering war, konnten jedoch mit dem zweiten Reaktor keine vollständige Adsorption erreicht werden. Die Annahme, dass die doppelte Menge an Adsorptionsmittel die Standzeit auf das doppelte erhöht, ist anhand der Messergebnisse erwiesen. Aufgrund der stark oxidativen Eigenschaften des Ozons ist nach ca. 7 Tagen ein stetiger Abfall der Kurve zu erkennen. Für die Zielsetzung müsste das Adsorptionsmittel nach ca. 11 Tagen in beiden Reaktoren getauscht werden.

Ergebnis

Die Ozonreduktion des Einzelreaktors lag am ersten Tag bei 98,75 %. Die Messreihe zeigt allerdings auch, dass die Ozonreduktion nach ca. 52 Stunden immer stärker abfällt, sodass hier noch weiterer Optimierungsbedarf besteht. Um diesem Prozess entgegen zu wirken wurde anschließend eine Kolonnenlösung von 2 Reaktoren entwickelt.

Die Kolonnenlösung erhöht die Standzeit der Reaktoren deutlich. Die Reaktoren haben nach 140 Stunden noch eine Adsorptionsleistung von 60 % (Behälter 1) und 65 % (Behälter 2). Allerdings ist auch bei der Kolonnenlösung, aufgrund der Ozoneinwirkung auf das Adsorptionsmittel, ein stetiger Abfall der Adsorptionsleistung zu beobachten, sodass nach einer Standzeit von ca. 164 Stunden die Adsorptionsleistung noch bei ca. 53 % (Behälter 1) bzw. 56 % (Behälter 2) liegt.

Fazit

Insgesamt ist der Eindruck über die Wirkungsweise des neu entwickelten Ozonentferners positiv. Durch die Kolonnenlösung konnte die Standzeit der Reaktoren deutlich verbessert werden, obgleich die anvisierte Standzeit von mind. 30 Tagen noch nicht erreicht werden konnte. Um die Standzeit

noch weiter zu verlängern, könnte man die vorhandenen Reaktoren durch größere Reaktoren ersetzen bzw. Praxisversuche durchführen in Richtung Absenkung der durchströmenden Luftmenge, um dem Ozon kinetisch mehr Zeit zu geben, chemisch- reaktiv bzw. adsorptiv sich an das Gummi zu binden. Es wäre zudem ggf. die Zusammensetzung des Adsorbens zu verändern oder die Gummioberfläche vorzubehandeln. Im Laufe der Versuchsreihen hat sich angedeutet, dass eine Reduzierung der Abluftströme im Zustrom des Reaktors die Standzeit des Reaktors erhöht.

Der Vorteil des Einsatzes des Abfallgummis zur Ozonreduktion liegt klar auf der Kostenseite, auch durch innerbetriebliche Stromeinsparungen unterstützt in Richtung Lüftungsreduktion.

Weiterführende Praxisuntersuchungen müssen das positive Bild des neu entwickelten Ozonentferners noch abrunden; die bisherigen Untersuchungsergebnisse sind diesbezüglich sehr ermutigend.

Danksagung

Wir danken der Firma Wentus Kunststoff GmbH, Eugen-Diesel-Straße 12, 37671 Hötter, für ihre Unterstützung bei unseren Versuchen und die Möglichkeit, die Messreihen unter Produktionsbedingungen durchzuführen.

Quellen

[1] Wikipedia (2014)

Ozon in <http://de.wikipedia.org/wiki/Ozon>

Abgerufen am 22.05.14

[2] Wikipedia (2014)

Ozonbildung in <http://de.wikipedia.org/wiki/Ozonschicht>

Angerufen am 22.05.14

[3] Bayrisches Landesamt für Umwelt

Toxikologie in http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_47_bodennahes_ozon.pdf

Abgerufen am 06.06.14

[4] lenntech

Toxikologie in <http://www.lenntech.de/bibliothek/ozon/toxikologie/ozon-giftigkeit.htm>

Abgerufen am 06.06.14

[5] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Wirkung Ozon in <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/luftqualitaet/ozon/wirkung.php>

Abgerufen am 10.06.14

[6] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen

Bodennahe Ozonbildung in <http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/luftqualitaet/ozon/bodennah.php>

Abgerufen am 12.06.14

[7] Chemieunterricht

Ozonsmog in <http://www.chemieunterricht.de/dc2/ozon/smog.htm>

Abgerufen am 12.06.14

[8] Wikipedia

Flexodruck in <http://de.wikipedia.org/wiki/Flexodruck>

Abgerufen am 13.06.14

[9] Wikipedia (2014)

Koronabehandlung in <http://de.wikipedia.org/wiki/Coronabehandlung>

Abgerufen am 13.06.14

[10] Chemieunterricht

Mesomere Struktur Ozon in <http://www.chemieunterricht.de/dc2/ozon/oz-mesom.htm>

Abgerufen am 16.06.14

[11] Wikipedia (2014)

Ozonolyse in <http://de.wikipedia.org/wiki/Ozonolyse>

Abgerufen am 16.06.14

[12] Chemgapedia

Ozonolyse in

http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/12/oc/vlu_organik/alkene/reaktionen_alkene.vlu/Page/vsc/de/ch/2/oc/reaktionen/formale_systematik/oxidation_reduktion/oxidation/addition_sauerstoff/ozonolyse_alkene/mechanismus.vscml.html

Angerufen am 17.06.14

[13] Universität Wuppertal

Einfluss Ozon auf Silicongummi in http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/disido_cy/de/exp/prop06.htm

Abgerufen am 17.06.14