

Ozon als luftgetragene Störkomponente (AMC) in der Halbleiterfertigung

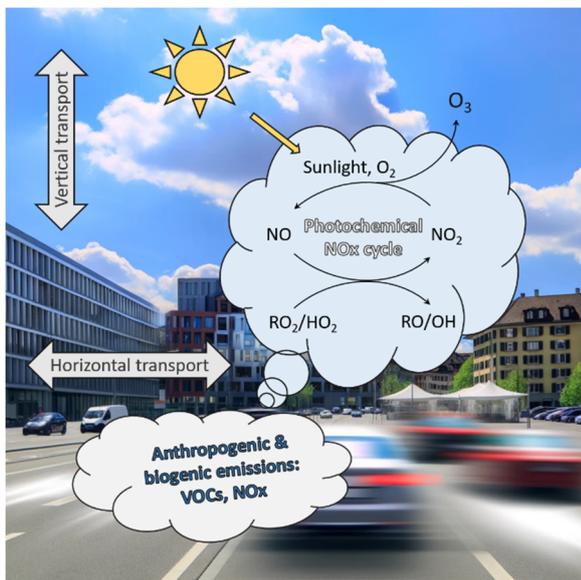
Neue Filtermaterialien mit langzeitstabiler Abscheideleistung

Technischer Bericht 2403001



Ozon (O_3) ist ein starkes Oxidationsmittel, das sich täglich in den bodennahen Schichten der Atmosphäre unter dem Einfluss des UV-Lichts der Sonneneinstrahlung in einem NO_x/VOC -unterstützten Zyklus in Gegenwart des reichlich vorhandenen atmosphärischen Sauerstoffs (O_2) bildet. [Fishman & Crutzen, 1978; Finlayson-Pitts & Pitts, 2000; Seinfeld & Pandis, 2016].

In einer Umgebung, in der NO_x (Stickoxide, $NO + NO_2$) und oxidierbare Kohlenwasserstoffe vorhanden sind, ist die Aufbaurrate maßgeblich durch die Strahlungsintensität und die relativen Konzentrationen von NO_x und VOC gesteuert. Die Aufbaurrate ist gut erforscht und die Beiträge hierzu durch Reaktionsgleichungen und Modellrechnungen gut beschrieben. [z. B. Crutzen, 1971, Finlayson-Pitts & Pitts, 2000]



Schemadarstellung: Ozonbildung in der bodennahen Atmosphäre; $NO_x/VOC/O_3$ -Zyklus

Mit abnehmender oder fehlender UV-Strahlung (Sonnenuntergang) sinkt die

Bildungsrate unter die Verlustrate für Ozon. Die Ozonkonzentration in der unteren Atmosphäre nimmt wieder ab. Verantwortlich dafür sind Verlustreaktionen im NO_x -Kreislauf, insbesondere die schnelle Verlustreaktion von Ozon mit Stickstoffmonoxid ($NO + O_3 = NO_2 + O_2$), sowie weitere Reaktionen, bei denen das reaktive und instabile Ozonmolekül als Oxidationsmittel wirkt und verbraucht wird. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Kontakt ozonhaltiger Luftmassen mit dem Erdboden oder anderen Oberflächen, an denen der Verlust stattfindet. [z.B. Jacob, 2000].

Durch die Kombination der oben genannten Bildungs- und Abbauprozesse ist es nicht verwunderlich, dass die Ozonkonzentrationen in der Umgebungsluft im Allgemeinen einen starken Tag-Nacht-Unterschied aufweisen, mit Spitzenwerten von bis zu 100 - 150 ppb_v am frühen Nachmittag und gleichzeitig potenziell niedrigen Werten von 10 - 15 ppb_v vor Sonnenaufgang am Morgen. [Monks et al., 2015].

Beispiele für typische Ozonkonzentrationen in der Schweiz während der Sommermonate zeigen Außenluftmessungen an den NABEL-Stationen (Abbildung 1) und in der Umgebung des Labors der artemis control AG im Grossraum Zürich, Schweiz. Die parallelen Messungen von Ozon, NO und NO_2 (NO_x) zeigen das Zusammenspiel der Ozonkonzentrationen, den morgendlichen Eintrag von NO in den Zyklus und die Verteilung von NO und NO_2 im Tagesverlauf. (Abbildung 2). Abbildung 3 zeigt zurückliegende Ozonmesswerte aus der Frischluftzufuhr einer Prototypenfertigung für Nanoelektronik mit anteiliger Frischluftfiltration.

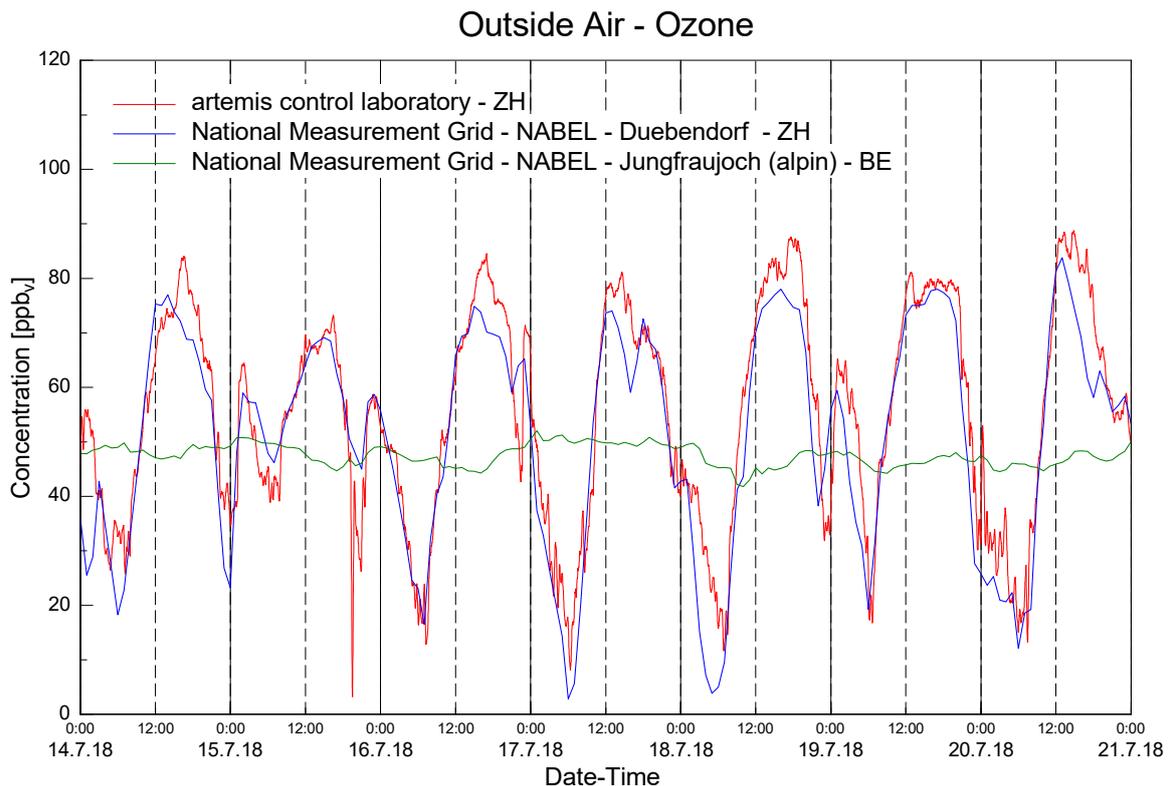


Abbildung 1: Ozon in der Außenluft – typische Konzentrationswerte & Tagesgänge in den Sommermonaten in Europa – Beispiele an den NABEL-Messstationen in der Schweiz sowie am Labor der artemis control AG, ZH, Schweiz

Man kann subjektiv annehmen, dass in den Tropen die bodennahen Ozonwerte und die Tagesspitzenkonzentrationen aufgrund der hohen Anzahl „sonniger Tage“ am höchsten sind. Dies ist insofern richtig, als dass die jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung und der UV-Intensität in den Tropen geringer ist, als in höheren Breiten der nördlichen oder südlichen Hemisphäre. [Cooper et al., 2014, Monks, 2000] Jedoch ist im späten Frühjahr und frühen Sommer – also rund um die sogenannte Sonnenwende – die Tageslänge und Dauer der Lichteinstrahlung in der jeweiligen Hemisphäre i.a. erheblich länger, als zeitgleich in den Tropen. Trifft zu dieser langen Einstrahlungsdauer noch eine hohe Strahlungsleistung bei klarem Himmel auf einen günstigen NO_x/VOC -Mix,

so übersteigen die Ozonspitzenkonzentrationen in den hohen Breiten schnell die typischen mittleren Tagesspitzen in den Tropen. [Monks, 2000].

Zusätzlich können günstige mikrometeorologische Bedingungen, wie geringe Luftbewegung während der Nacht oder geringe NO -Einträge, dazu führen, dass das tagsüber gebildete Ozon nachts nicht abgebaut wird und ein „Sockel“ von 30 - 40 ppb_v verbleibt, auf dem die Ozonbildung am nächsten Tag weiter aufbaut (siehe auch Abbildung 3). Ein ähnlicher Mechanismus führte z.B. während des COVID-19-Lockdowns in Ostchina zu einem signifikanten Nettoanstieg der bodennahen Ozonproduktion. [Chen et al., 2021].

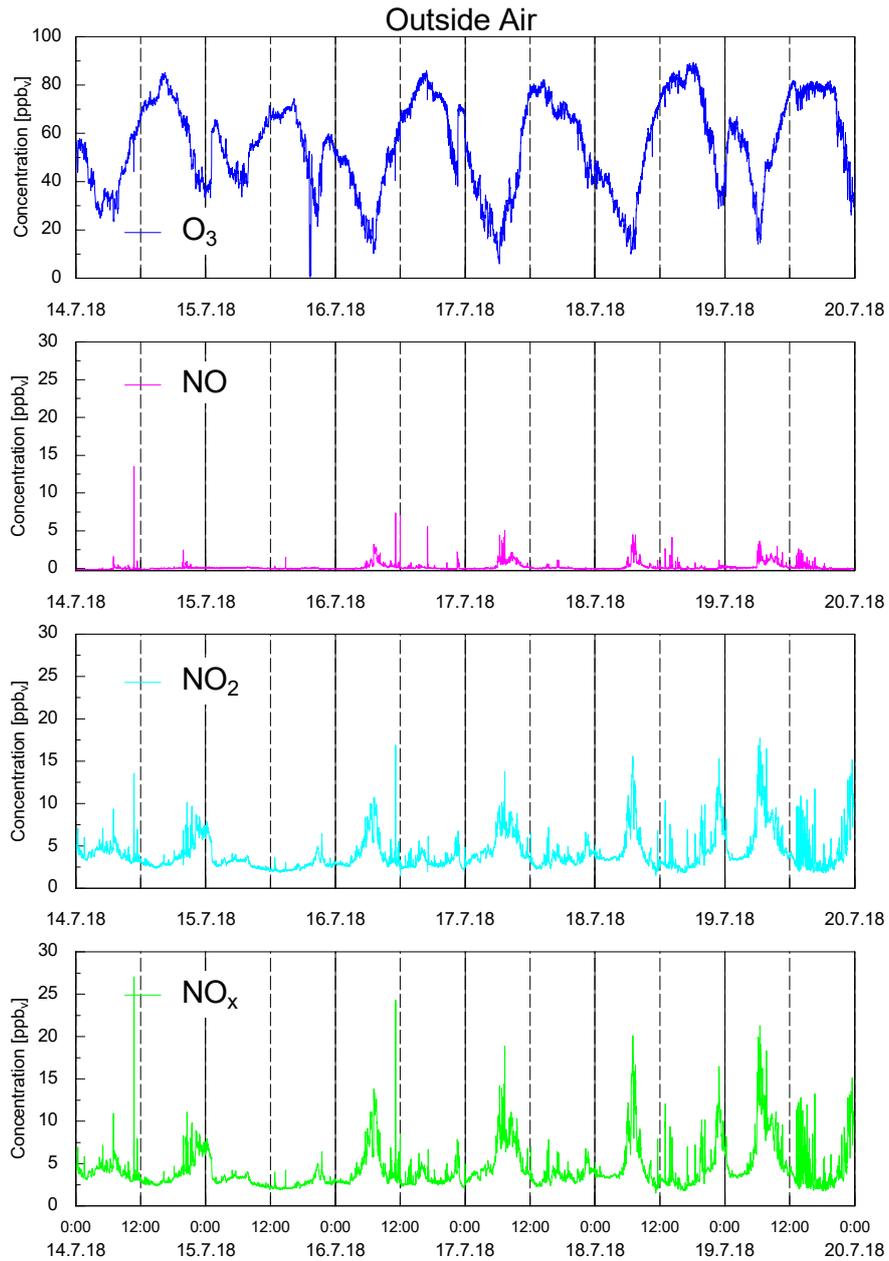


Abbildung 2: Parallelmessungen von Ozon, NO und NO₂ (NO_x) am Labor der artemis control AG, Region Zürich, Schweiz. Die Verläufe zeigen die Wechselwirkungen der Ozonkonzentrationen, den morgendlichen Eintrag von NO in den Zyklus und die Verteilung von NO und NO₂ im Tagesverlauf.

In diesen Situationen kommt es nicht selten zu den regionalen Überschreitungen von Ozongrenzwerten [Monks et al., 2015], die über Berücksichtigung der Einwirkungen auf das Atmungssystem insbesondere älterer oder gesundheitlich geschwächer Personen gesetzt und ausgesprochen werden [Bell et al., 2005, Jerrett et al., 2009]. Bei Überschreitungen der Grenzwerte wird den gefährdeten Personen die Empfehlung ausgesprochen anstrengende Tätigkeiten an der Außenluft zu vermeiden und einen Aufenthalt in Innenräumen vorzuziehen. Dies aufgrund der i.a. geringeren Ozonkonzentrationen in Innenräumen, in denen praktisch nur Verlustreaktionen stattfinden.

Auch die Fertigungsprozesse im der Nanoelektronik können durch Ozon in der Umgebungsluft der nanoelektronischen Struktur und dessen oxidierender Wirkung betroffen sein. [Park et al., 2001]

Am einfachsten verständlich ist dies für den noch jungen und kleinen Bereich der Polymerelektronik bzw. der organischen polymeren Leiter und Halbleiter. Denn das Grundgerüst der polymeren Leiter sind konjugierte Polymerhauptketten, die aus einer streng alternierenden Abfolge von Einfach- und Doppelbindungen bestehen. Die Polymere besitzen dadurch ein delokalisiertes («bewegliches»)

Elektronensystem, welches Halbleitereigenschaften, und nach chemischer Dotierung Leitfähigkeit ermöglicht.

Allerdings sind ungesättigte (C=C) Doppelbindungen bevorzugte Angriffspunkte für das Oxidationsmittel Ozon und führen im Rahmen der «Ozonolyse» zu einem oxidativen Kettenaufbruch und damit zu einer Zerstörung des (leitenden) Polymers.¹ [Petrick & Dubowski, 2009] Abhängig von der Art des leitenden Polymers und seinem Verarbeitungs- und Lagerungsprozess werden bereits Ozonkonzentrationen von > 5 ppb_v in der Umgebungsluft als prozesskritisch und schädigend eingestuft.

In der silizium-basierten Halbleitertechnik wird die Einwirkung von Ozon (neben anderen Oxidationsmitteln) für die ungewollte, da nicht kontrollierte, Bildung von Siliziumoxid-Schichten auf reinen Si-Oberflächen verantwortlich gemacht. Als ebenfalls betroffen werden native Metalloberflächen leicht oxidierbarer Metalle eingestuft.

Park et al. (2001) berichten von einem Si-O Wachstum von 0.015 – 0.07 Angström/Minute bei der Einwirkung von Ozon im Konzentrationsbereich von 20 – 200 ppb_v. Dieses Si-O Wachstum führte zu einer ungewollten Veränderung der kapazitiven Eigenschaften einer Speicherzelle und ist zu vermeiden.

¹ Die durch Ozon ausgelöste Spaltung von Polymeren wurde bereits im 19. Jahrhundert an chemisch unstabiliertem Naturkautschuk/Gummi beobachtet. Andere Redoxreaktionen mit Ozon

wurden zum Beispiel in elektrochemischen Prozessen zur Untersuchung der vertikalen Verteilung von Ozon in der Atmosphäre eingesetzt, siehe Referenzen in [Kames & Schmidt, 1992].

Mittel zur Begrenzung der Ozonkonzentrationen in der Reinraumluft

Der maßgebliche Prozess für die Bildung von Ozon ist die bereits beschriebene photolytische Bildung in der Aussenluft. Die maßgebliche Quelle für Ozon in der Reinraumluft ist der Eintrag von Aussenluft in den Reinraum durch das make-up air/Frischluf-System. Lokal können im Reinraum Quellreaktionen für Ozon aus der Anwendung von UV-Licht oder Hochspannung auftreten, die jedoch in ihrem Beitrag begrenzt sind.

Bei Tagesspitzenwerten von 60 - 150 ppb_v in der Außenluft über mehrere Stunden ist eine aktive Ozonabscheidung aus der Make-up-Luft erforderlich, um Schwellenwerte von nicht mehr als 5 ppb_v einzuhalten.

Es ist richtig, dass ein Ozongehalt von z.B. 60 ppb_v in der Außenluft aufgrund der begrenzten Frischluftrate von 5-7% der Umluftrate nicht sofort zu einer entsprechenden Konzentration im Reinraum führt. Dies wird - neben dem Wandverlust von Ozon im Luftkanalsystem - durch weitere Rückreaktionen und geringe Austauschraten und Verlustreaktionen im Umluftkreislauf verhindert. Typisch bildet sich in einem Reinraum ohne aktive Ozonabscheidung innerhalb von zwei Stunden ein Peak aus, der dem Pegelverlauf in der Außenluft nachgebildet ist.

Zur Reduzierung der Ozongehalte in der Make-up-Luft empfiehlt sich der Einsatz von AMC-Filtern in der Außenluftanlage. In Außenluftanlagen nach dem Stand der Technik sind für Reinnräume zur Fertigung von Nanoelektronik in der Regel mindestens eine, besser zwei Stufen zur Reinigung der Make-up-Luft von AMC vorgesehen.

Im Vordergrund steht jedoch häufig die Reduzierung und Stabilisierung der eingetragenen Gehalte an Säuren bzw. Säurebildnern, organischen und siliziumorganischen Luftbestandteilen sowie basischen Komponenten.

Für die filternde Entfernung von Ozon aus der Luft wird im Allgemeinen der Mechanismus verwendet, der neben dem reaktiven Verlust mit NO den Hauptverlustweg in der Außenluft darstellt. Dies ist der reaktive Verlust mit Oberflächen und die Rückbildung von Ozon zu Sauerstoff.

Als ein filterndes System mit großer Oberfläche wird landläufig ein AMC-Filter auf der Basis von Aktivkohle betrachtet. Aktivkohle als hochporöses Material hat in der Tat eine «innere Oberfläche» von 900 – 1200 m²/g des Sorbents. Für die Spurengasfiltration geeignete Aktivkohle besitzt ein System von Transportporen und Mikroporen, welche für ein kleines, bewegliches Molekül wie Ozon leicht zugänglich sind.

In orientierenden Laborversuchen erweisen sich daher nahezu alle nach dem Stand der Technik entwickelten AMC-Filter auf Aktivkohlebasis als geeignet. In solchen Tests können an neuwertigen Filtern und bei erhöhten Konzentrationen kurzzeitig Abscheidegrade von >98% problemlos nachgewiesen werden. Diese Versuche werden häufig auch bei stark überhöhten Ozonkonzentrationen durchgeführt und im Sinne einer «Kapazitätsleistung» über die Größe einer Dosis in ppb_vh auf eine nutzbare Einsatzdauer unter typischen Außenluftbelastungen hochgerechnet.

Ozone removal by AC-1 in the month of May

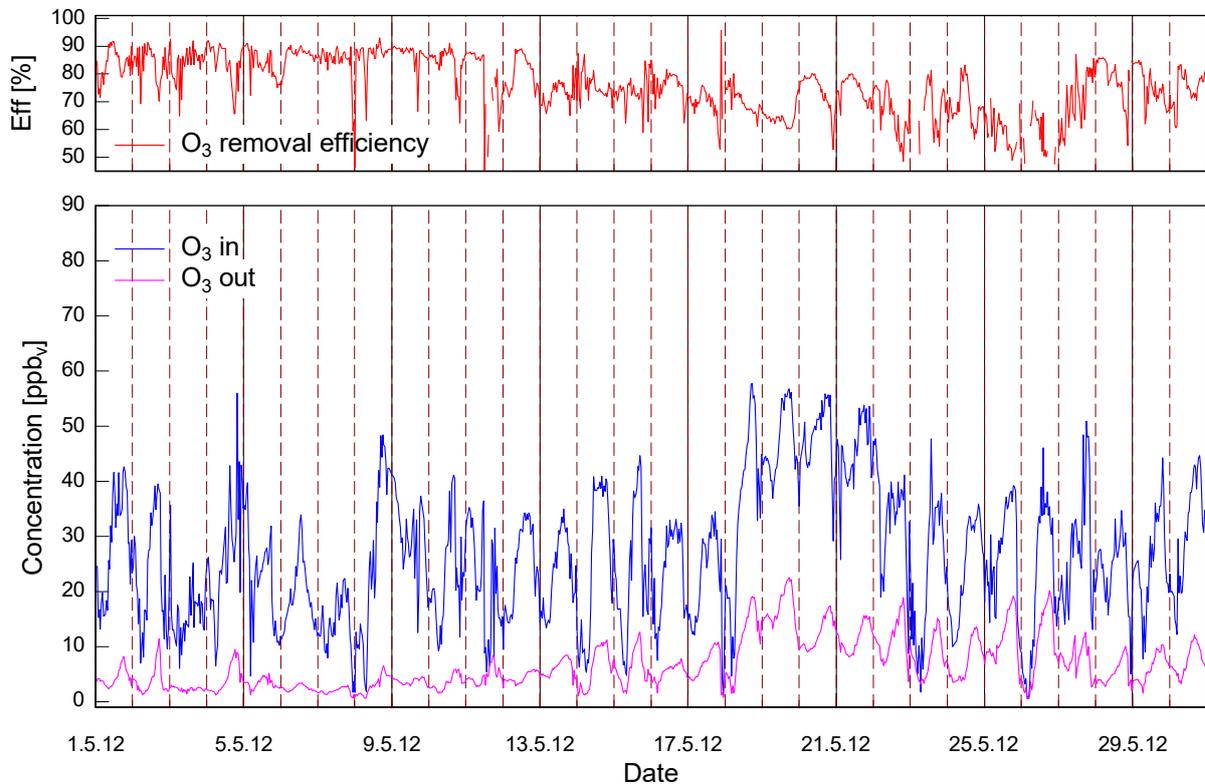


Abbildung 3: Verfolgung der Ozonmesswerten („O₃ in“ in der Außenluft, „O₃ out“ hinter den Filtern der Außenluftanlage) und Ozonabscheidung an einer Außenluftanlage ausgerüstet mit Filtern des Typs AC-1 (Pilotfertigung Nanoelektronik). Die Tage mit konstant erhöhten Konzentrationen von Ozon in der Außenluft führen zur Bildung von einem „Sockel“ von ca. 40 ppb_v, der auch nachts verbleibt, wobei sich ein „Memory-Effekt“ und eine verminderte Leistung für die Ozonabscheidung für diesen Filtertyp (AC-1) ausprägt. Der Effekt ist reversibel jedoch unerwünscht, da sich der Verlauf der Außenluftkonzentrationen nicht steuern oder vorhersagen lassen.

Abscheideleistungen, die in so ausgestatteten Tests gefunden werden, stellen sich leider in der Praxis häufig so nicht ein. Die Ursache liegt in der Kombination des Abscheidemechanismus und den Anforderungen an die Leistung bei in Praxis niedrigeren, jedoch periodisch auftretenden Spitzenkonzentrationen in begründet.

Vergleichende Untersuchung von AMC- Filtersystemen zur Abscheidung von Ozon – Materialvarianten und Lebensdauer

Der Verlust von Ozon an Festkörperoberflächen ist unter anderem eine Rekombination zu Sauerstoff ($2 O_3 \rightarrow 3 O_2$) sowie eine Reaktion mit Stoffen auf den Oberflächen im Sinne einer sorptiv unterstützten Reaktion.

Hinzutreten können eine Reaktion mit dem Material der Oberfläche selbst oder eine Kombination der genannten Mechanismen.

Somit ist es verständlich, daß es Materialien und Oberflächen gibt, die sehr wenig Ozon abbauen und in diesem Sinne auch genutzt werden (Glas, PTFE [Cano-Ruiz et al., 1993]) sowie Materialien, die effizient und andauernd Ozon abbauen (z.B. beheizte Ozonfilter mit Metall/Metalloxid-Strukturen an Anlagen und Geräten).

Im Bereich der AMC-Filtration kommen sinnvoll nur Systeme zum Einsatz, die bei kleinen, jedoch dynamisch veränderlichen Konzentrationen ohne zugeführte thermische Leistung und unter Berücksichtigung anderer in der Luft vorhandener AMC dauerhaft eine Unterschreitung

von Grenzwerten von 2 – 5 ppb_v im Abströmbereich der Filter gewährleisten. Die Systeme sollen frei von Nebenprodukten - z.B. aus der reaktiven Umsetzung des Ozons - einsetzbar sein.

Wir zeigen in *Tabelle 1* im Vergleich die anfängliche Abscheideleistung von Ozon an vier AMC-Filtern. Den AMC-Filtern AC1 - AC4 ist gemeinsam, daß es sich beim Sorptionsmaterial im Grundkörper um Aktivkohle handelt. Unterschiedlich sind die Ausprägungen der inneren Oberflächen der Aktivkohlen.

Zum Vergleich ist die Abscheidung von Ozon an AMC-Filtern aus Funktionspolymeren (FP-B und FP-A) aufgeführt, die – entsprechend den Erwartungen und dem Materialdesign – gezielt keine Abscheidung von Ozon zeigen sollen und dies auch nicht tun.

Tabelle 1: Die anfängliche Abscheideleistung von Ozon an verschiedenen AMC-Filtern; die Typen AC («activated carbon») basieren alle auf Aktivkohle-Verbundmaterialien, die Typen FP («functional polymer») auf porösen organischen Polymerstrukturen

	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	FP-B	FP-A
Eintritt [ppb _v]	10–75	10–75	10–75	10–75	10-75	10-75
Austritt [ppb _v]	1–15	1–5	1–4	1–5	10-75	10-73
Entfernung	90–70%	96–85%	98–94%	96–90%	0%	0–2%

Tabelle 2: Die Ozonabscheideleistung an AMC-Filtern nach lediglich 6'000 ppb_vh Eingangsdosis

	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	FP-B	FP-A
Eintritt [ppb _v]	10–75	10–75	10–75	10–75	10-75	10-75
Austritt [ppb _v]	10–20	1–5	1–4	1–5	10-75	10-73
Entfernung	90–60%	96–80%	98–94%	96–84%	0%	0–2%

In der Fortführung der Untersuchungen zeigen wir in einem Langzeitversuch unter realistischen Betriebsbedingungen das Verhalten verschiedener AMC-Filter unter einer fortwährenden kontrollierten zyklischen Tag-Nacht-Belastung (Abbildungen 4 und 5).

Dabei ist erkennbar, daß der AMC-Filter des Typs AC-2, ein Filter mit der Zielanwendung «VOC und Condensables» unter den realitätsnahen Testbedingungen

eine anfänglich hohe Abscheideleistung erbringt, die das Einhalten des <5 ppb, Kriteriums gewährleisten kann. Dieses Bild verändert sich nach längerem Einsatz von – in diesem Test – drei Monaten unter gleichmäßig hoher Belastung (entspricht einer gesamten Dosis von ca. 100'000 ppb,h). Die Abscheideleistung geht zurück und hält bei Spitzenkonzentrationen nicht mehr den Zielwert ein (vergleiche Zustände «neuwertig» und «gealtert» in Abbildung 4).

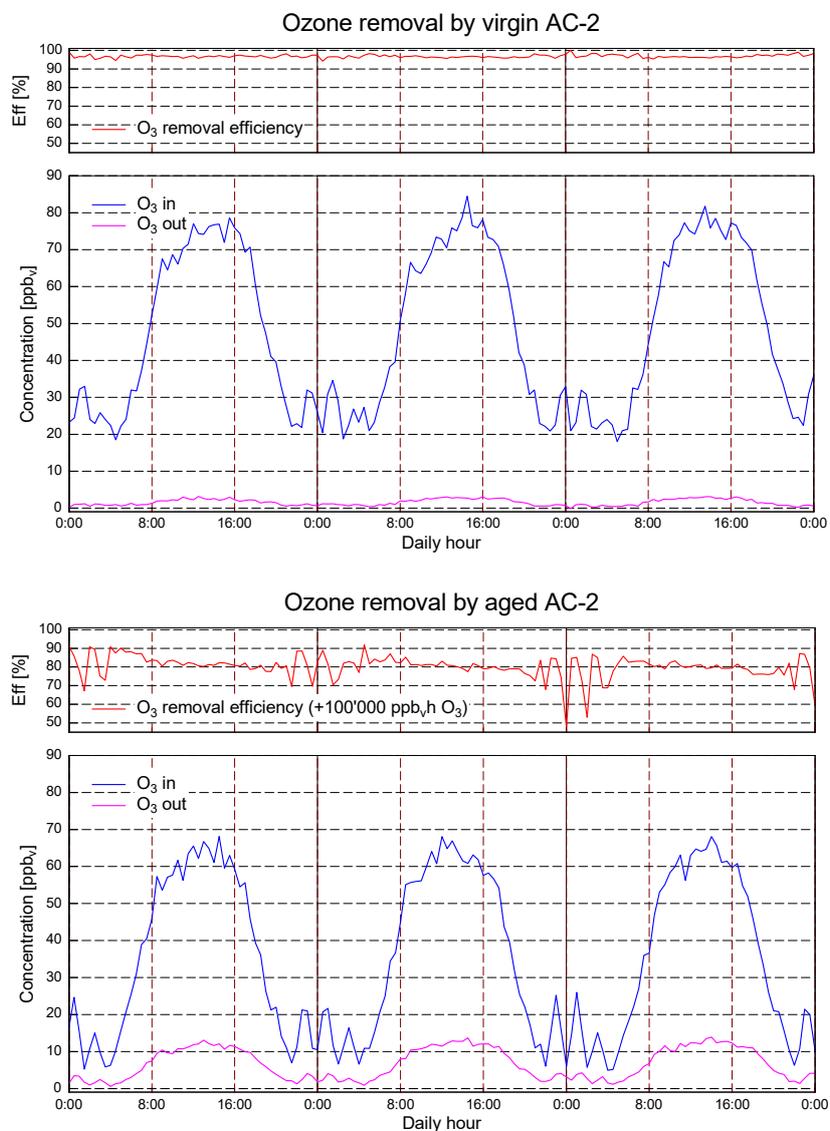


Abbildung 4: Vergleich von anfänglicher Abscheideleistung von Ozon am AMC-Filter AC-2 mit der Abscheideleistung dieses Filter im gealterten Zustand (bis zur Dosis von 100'000 ppb,h Ozon)

Gleichzeitig geht die gegenüber der Eingangskonzentration ermittelte Abscheideleistung bei kleineren Konzentrationen nochmals zurück. Dies insbesondere in den Zeitabschnitten abfallender Konzentration, die auf die Tagesspitzenbelastung folgen. Wir führen dieses Verhalten auf eine zeitweise Sättigung der reaktiven Oberfläche bei gehemmter Abreaktion

zurück, die man als «Memory-Effekt» betrachten kann. Der Filter behält einen Einfluss aus der vorhergehenden Phase zurück, der den Abbau von neu einströmendem Ozon geringerer Konzentration anteilig verhindert und zu einer messbaren Verminderung der spontanen Ozonleistung führt.

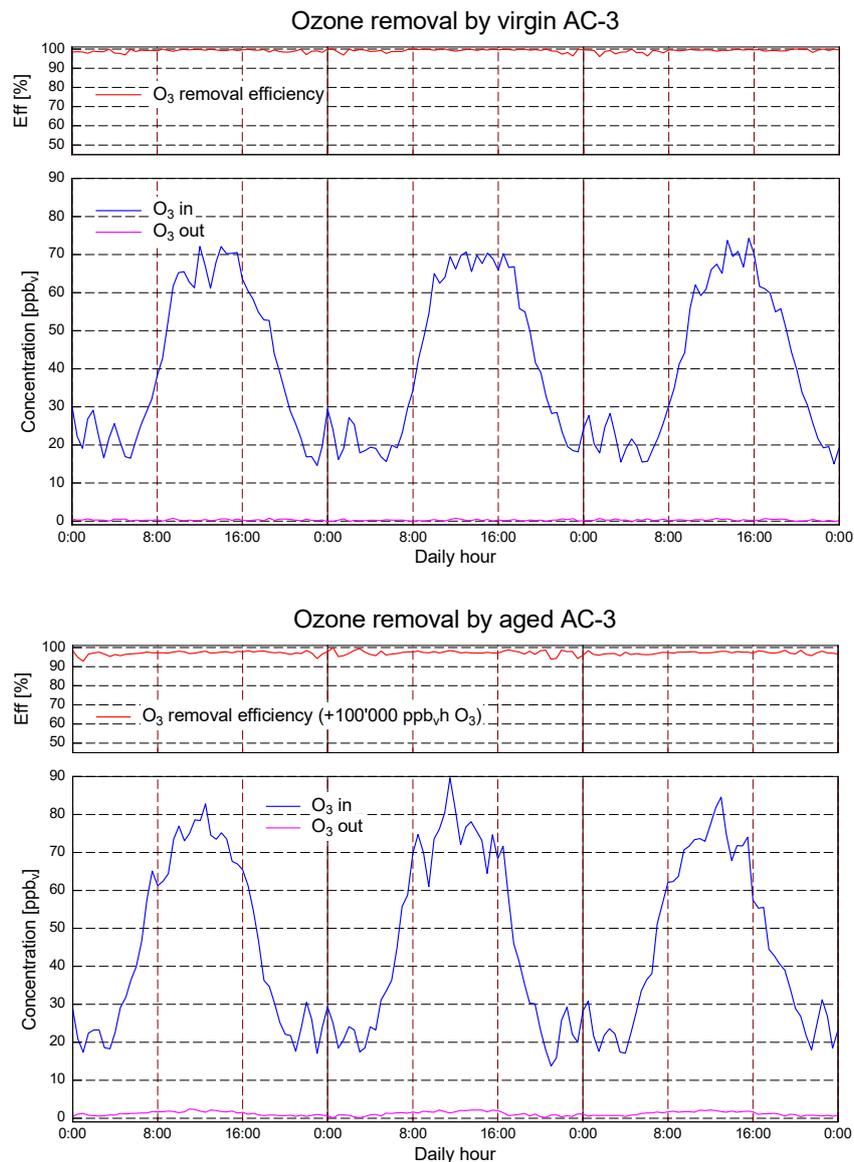


Abbildung 5: Vergleich von anfänglicher Abscheideleistung von Ozon am AMC-Filter AC-3 mit der Abscheideleistung dieses Filter im gealterten Zustand (bis zur Dosis von 100'000 ppb_vh Ozon)

Der «Memory-Effekt» ist eine Grundeigenschaft vieler gängiger Aktivkohletypen und wurde beim Betrieb von AMC-Filtern wiederholt beobachtet. Dies tritt insbesondere dort auf, wo keine spezifische Materialauswahl für das Kriterium der stabilen Ozonabscheidung gefordert und umgesetzt wird. (Siehe das Beispiel der Anwendung von AC-1 für eine Frischluftzufuhr (Pilotanlage Nanoelektronik) in *Abbildung 3*).

Im Vergleich dazu zeigen die AMC-Filter vom Typ AC-3 (und AC-4) diese unerwünschte Eigenschaft nicht - weder nach längerer Betriebszeit noch in detaillierter zeitlicher Auflösung der Leistung in einer Phase steigender oder fallender Ozon-Eingangskonzentrationen. Eine fortschreitende Hemmung der Abreaktion ist nicht erkennbar und beruht auf der spezifischen, an die Aufgabe angepassten Materialauswahl (*Abbildung 5*).

Bei der Betrachtung und Untersuchung von AMC-Filtern aus dem Einsatz im Reinraumbetrieb (Betrieb in Außenluftanlagen, Aufprägung unterschiedlicher AMC-Summenbelastungen bestimmt durch die örtlichen Gegebenheiten der Anlagenauslegung, der natürlichen und aufgeprägten AMC-Quellen im Umfeld) können die oben dargestellten Untersuchungen durchweg bestätigt werden.

Der Filtertyp AC-2 - ein Filter, der in seiner Auslegung auf die Behandlung von

VOC & Condensables ausgelegt ist - erfährt im Anlagenbetrieb unter dem Einfluss von organischen & anorganischen VOC sowie Ozon einen Verlust an VOC-Abscheideeffizienz, der in % ausgedrückt vor allem im Nachlauf zu Spitzenbelastungen und in Perioden mit hohem Ozonsockel im Tag/Nacht-Wechsel auftritt. Bezogen auf die Beurteilung der Leistung bei niedrigeren Konzentrationen erscheint der Filter «verbraucht» und «nicht mehr wirksam». Es kann jedoch gezeigt werden, dass die Abscheideleistung einige Zeit nach diesen Episoden wieder zunimmt. Da die Dauer und Häufigkeit der Episoden jedoch nicht vorhersehbar und beeinflussbar sind, kann eine sichere Einhaltung der Reinraumgrenzwerte mit Filtern vom Typ AC-2, VOC & Condensables allein nicht gewährleistet werden.

Im Vergleich dazu ist der Verlust der Abscheideleistung bei der Filtertype AC-3 auch nach mehr als 18 Monaten im Dauerbetrieb gering bis nicht nachweisbar. Der Einsatz dieses Filtertyps ermöglicht zu jedem Zeitpunkt und unter allen vorhersehbaren Umständen die Einhaltung der Forderung nach einer geringen austrittsseitigen Konzentration. Für AMC-Filter, die auf den Filtermaterialien AC-3 und AC-4 basieren, werden diese Leistungen von der artemis control AG in den Produktinformationen angegeben, spezifiziert und garantiert. Sie sind für den Anwender über den Produktcode erkennbar.

Schlussfolgerungen

Ozon (O_3) ist eine luftgetragene Störkomponente (AMC Airborne Molecular Contamination) in einer Reihe von Prozessschritten der Halbleiterfertigung, die zu einer ungewollten und nicht kontrollierbaren Bildung von Oxidschichten führt. Bei polymeren Leitern kann die Einwirkung von Ozon zu Kettenspaltungen und zur Verminderung der Leitfähigkeit führen.

Aus den genannten Gründen gibt es für eine Vielzahl von Prozessen und Lagersituationen spezifische Festlegungen für die maximal tolerierbare Ozonkonzentration in der Reinraumluft bzw. in der Prozessanlage, in denen die Materialeigenschaften und die Zykluszeiten der Prozesse berücksichtigt wurden.

Die tolerierbaren Grenzwerte für Ozonkonzentrationen im Prozess liegen in der Regel im Bereich weniger ppb_v, in jedem Fall aber weit unter den typischen Konzentrationen in der Außenluft bei sonnigem Wetter.

Da die Quelle für Ozonkonzentrationen in Reinräumen im Wesentlichen die Außenluft bzw. Frischluft ist, beginnt die Kontrolle der Ozonkonzentrationen häufig bereits bei der AMC-Filtration der Frischluft und kann auf Reinraumzonen oder spezifische Prozessanlagen ausgedehnt werden.

Obwohl in orientierenden und kurzzeitigen Materialtests nahezu alle porösen Materialien wie Aktivkohlen, Zeolithe etc. eine Reduktionswirkung gegenüber dem instabilen Ozonmolekül zeigen, sind Langzeiteffekte, wie sie z.B. bei der

Ozonfiltration auftreten, nicht auszuschließen.

Langzeiteffekte, wie eine passivierende Veränderung der Oberflächen, werden dabei nicht erfasst. Diese Langzeiteffekte können lange Zeit unbemerkt bleiben, führen aber in Phasen erhöhter Dauerbelastung zu einem plötzlichen Abfall der Abscheideleistung und im ungünstigsten Fall zu einer Verletzung der spezifizierten Prozessgrenzwerte. Diese Verletzungen können aufgrund der genannten Ursache spontan auftreten und wieder verschwinden, was zu einem «Phantomphänomen» führt und viele Unsicherheiten bezüglich der Prozessstabilität auslöst. Grundsätzlich sind AMC-Filter für die breitbandige Abscheidung von VOC/Condensables aus der Luft in erster Linie keine langzeitstabilen AMC-Filter für Ozon.

Der Einsatz spezifischer Sorbentien mit modifizierten und stabilisierten Oberflächen in derart spezifizierten AMC-Filtern verhindert den genannten Leistungsverlust. Dies führt bei Einhaltung der Betriebsanleitung zur Einhaltung der Prozessgrenzwerte über einen sehr langen Betriebszeitraum und über einen weiten Bereich von Eintrittskonzentrationen einschließlich Tagesspitzen.

artemis control bietet AMC-Filter an, die speziell für die Aufgabe der effizienten und langzeitstabilen Ozonreduktion aus der Luft ausgelegt sind.

Bitte kontaktieren Sie uns, wenn Sie weitere Informationen, Beratung oder eine AMC-Filterlösung für diese Aufgabenstellung benötigen.

Über artemis control

artemis control ist ein führender Anbieter von Lösungen zur Kontaminationskontrolle, einschließlich AMC-Filtern, Partikelfiltern und Analysedienstleistungen für die Halbleiter- und generelle Nanotech-Industrie. artemis control ist nach ISO 9001:2015 zertifiziert und verfügt über Produktionsstätten, Kundendienst und/oder Forschungseinrichtungen, die die wichtigsten globalen Standorte der genannten Industrien bedienen. Weitere Informationen finden Sie unter www.artemis-control.com

Literatur

- Bell, M. L., Dominici, F., & Samet, J. M. (2005). A Meta-Analysis of Time-Series Studies of Ozone and Mortality with Comparison to the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. *Epidemiology*, **16**(4), 436–445. DOI: 10.1097/01.ede.0000165817.40152.85
- Cano-Ruiz, J. A., Kong, D., Balas, R. B., & Nazaroff, W. W. (1993). Removal of Reactive Gases at Indoor Surfaces: Combining Mass Transport and Surface Kinetics. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, **27**(13), 2039–2050. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90276-5](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90276-5)
- Cooper, O. R., Parrish, D. D., Ziemke, J., Balashov, N. V. & Cupeiro, M., (2014). Global Distribution and Trends of Tropospheric Ozone: An Observation-Based Review. *Elementa: Science of the Anthropocene*, **2**(1), 000029. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000029>
- Crutzen, P. J. (1971). Ozone Production Rates in an Oxygen-Hydrogen-Nitrogen Oxide Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, **76**(23), 7311–7327.
- Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, J. N. (2000). Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. *Academic Press*.
- Fishman, J., & Crutzen, P. J. (1978). The Origin of Ozone in the Troposphere. *Nature*, **274**(5669), 855–858.
- Jacob, D. J. (2000). Heterogeneous Chemistry and Tropospheric Ozone. *Atmospheric Environment*, **34**(12–14), 2131–2159.
- Jerrett, M., Burnett, R. T., Pope, C. A., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., et al. (2009). Long-Term Ozone Exposure and Mortality. *New England Journal of Medicine*, **360**(11), 1085–1095. DOI:10.1056/nejmoa0803894
- Kames, J., Schmidt, R.W.H. Ozon-Meßinstrumente für Stratosphäre und Troposphäre, *Labor 2000*, 6-19 (1992)
- Monks, P. S. (2000). A Review of the Observations and Origins of the Spring Ozone Maximum. *Atmospheric Environment*, **34**(21), 3545–3561.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., et al. (2015). Tropospheric Ozone and its Precursors from the Urban to the Global Scale from Air Quality to Short-Lived Climate Forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**(15), 8889–8973. DOI:10.5194/acp-15-8889-2015
- Park, Y.-K., Kim, H.-J., Kim, D.-W., & Park, J.-H. (2001). Environmental Ozone Effect on the Growth of Hemispherical Grained Silicon for ULSI DRAM Stacked Capacitor. *Journal of the Electrochemical Society*, **148**(8), F170. <https://doi.org/10.1149/1.1385379>
- Petrack, L., & Dubowski, Y. (2009). Heterogeneous Oxidation of Squalene Film by Ozone under Various Indoor Conditions. *Indoor Air*, **19**(5), 381–391. doi:10.1111/j.1600-0668.2009.00599.x
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. *John Wiley & Sons*.
- Wang, H., Huang, C., Tao, W. et al. Seasonality and Reduced Nitric Oxide Titration Dominated Ozone Increase during COVID-19 Lockdown in Eastern China. *npj Clim Atmos Sci* **5**, 24 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00249-3>

artemis control - Kontakte

Europe – Headquarter

Schweiz

artemis control AG
Seestrasse 147
CH-8610 Uster
Switzerland

Telephone: +41 43 366 40 10
Fax: +41 43 366 40 11
E-Mail: info-eu@artemis-control.com
www.artemis-control.com

North East Asia

Taiwan

artemis control Co., Ltd.
N° 241-3, Sec 1, Youth Rd.
Youth Industrial Park
Yang Mei, Taoyuan, Taiwan 326, ROC

Telephone: + 886 3 496 23 45 ext. 606
Fax: + 886 3 496 39 97
Mobile: + 886 97 522 30 90
E-Mail: info-nea@artemis-control.com

Deutschland

artemis control GmbH
Magdeburger Strasse 38
D-47800 Krefeld
Germany

Telephone: +49 2151 74 77 800
Fax: +49 2151 74 77 801
E-Mail: info-eu@artemis-control.com
www.artemis-control.com

South East Pacific

Singapore

artemis control Pte Ltd
21 Bukit Batok Crescent
#12-79 WCEGA Tower
Singapore 658065
Singapore

Telephone: + 65 6631 48 54
Fax: + 65 6826 43 32
E-Mail: info-sea@artemis-control.com

Inhalt und Haftungsausschluss

artemis control geht davon aus, dass die Informationen in diesem Dokument zum Zeitpunkt seiner Veröffentlichung korrekt sind. Alle Spezifikationen und Designs können ohne Vorankündigung geändert werden. artemis control haftet nicht für Fehler oder Auslassungen in diesem Dokument. artemis control übernimmt keine Verpflichtung zur Aktualisierung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen. Sie dürfen dieses Dokument nicht in Verbindung mit einer Rechtsverletzung oder einer anderen technischen oder rechtlichen Analyse in Bezug auf die hierin beschriebenen Produkte von artemis control verwenden. Dieses Dokument gewährt weder ausdrücklich noch stillschweigend, durch Rechtsverwirkung oder auf andere Weise eine Lizenz für geistige Eigentumsrechte.

Der Inhalt und die Struktur dieses technischen Berichts der artemis control AG sind urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung von Informationen oder Daten, insbesondere die Verwendung von Texten, Textteilen oder Bildmaterial, Logos bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung von artemis control. Die jeweiligen Markenrechte und die Urheberrechte der verwendeten Bilder verbleiben bei den Eigentümern. Sollten irgendwelche Marken oder Rechte verletzt werden, informieren Sie uns bitte.