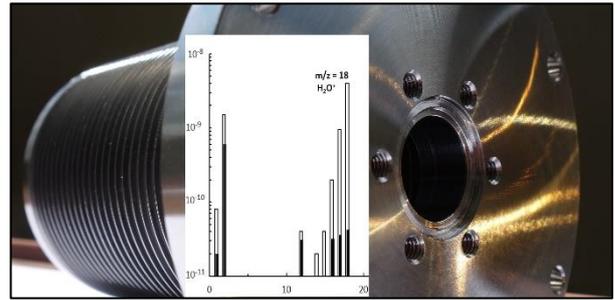


Wasser in Vakuumtechnik: Probleme und Lösungen

L.Gorkhover, Gutes Vakuum GmbH
E-Mail leonid.gorkhover@gutesvakuum.de

Dies ist eine Übersetzung aus dem Englischen.
Der Originalartikel wurde veröffentlicht in
e-Journal of Surface Science and Nanotechnology,
Issue 4, Vol.21; Japan, 2024;
DOI: [10.1380/ejsnt.2024-031](https://doi.org/10.1380/ejsnt.2024-031)



Zusammenfassung

Für viele Prozesse im Vakuum ist die Präsenz von Wasser unerwünscht, aber unvermeidbar. Diese Übersicht bietet einen qualitativen Einblick in ein breites Spektrum von wasserbedingten Problemen und deren Lösungen in der Vakuumtechnik. Zunächst werden in einem systematischen Überblick die wichtigsten technischen Innovationen und Veröffentlichungen der letzten Jahrzehnte dargestellt. Dabei werden auch Eigenschaften von Oberflächen, Materialien und anderen Quellen von Wassermolekülen diskutiert. Zweitens bietet der Artikel praktische Lösungen für eine Vielzahl von Anwendungen, von kompakten UHV-Laborgeräten über industrielle Beschichtungs- und Ätzmachines bis hin zu Großanlagen für die Weltraumsimulation und EUV-Lithografie. Ziel dieses Artikels ist es, Anwendern, Designern und Prozessingenieuren in der Grundlagenforschung und der Industrie einen vakuum-technischen Leitfaden zum effektiven Umgang mit Wasser zu geben.

Schlüsselworte: Ausgasung von Wasser; Kontamination; Permeation; Vakuumtechnik; Restgas.

I. Einleitung

Warum spielt Wasser eine so große Rolle in der Vakuumtechnik? Dafür gibt es mehrere Gründe, hier zunächst die zwei wichtigsten. Erstens haftet Wasser auf technischen Oberflächen auf eine sehr unbequeme Art: weder desorbiert es schnell, noch bleibt es dauerhaft gebunden. In vielen Fällen dominieren die Wassermoleküle das Restgas des Vakuumsystems wegen andauernder Ausgasung. Zweitens ist Wasser fast überall präsent: im Reinigungsbad, in der Luft, in der Kühlleitung usw. Probleme mit Wasser in der Vakuumtechnik werden in Handbüchern [1,2], anderen wissenschaftlichen Aufsätzen [3–13] und Übersichtspublikationen der letzten Jahrzehnte [14–16] ausgiebig diskutiert.

Die Hauptquelle von Wasser in einem Vakuumsystem ist die Luft; ihre Feuchtigkeit lagert sich auf den Oberflächen einer geöffneten Kammer durch Kondensation und Adsorption ab. Unter Normalbedingungen und relativer Luftfeuchtigkeit 40% beinhaltet ein Kubikmeter Luft rund 9 g Wasser. Diese Menge würde reichen, 10 m² innere Oberflächen einer Kammer mit Tausenden (!) Monolagen Wasser zu belegen. In diesem Sinne ist jede Belüftung mit normaler Atmosphäre ein sehr problematischer Schritt, weil die im Vakuum trocken gewordenen Oberflächen mit Wassermolekülen belegt werden.

Außerdem können Kunststoffteile Wasser in ihrem Volumen speichern und langsam ins Vakuum abgeben. Des Weiteren diffundiert das Wasser von außen durch die Komponenten aus Kunststoff, zum Beispiel Elastomerdichtungen.

Ein Prozessgas kann auch Wasser mitbringen; in der Liste der Verunreinigungen von vielen technischen Gasen steht H₂O an oberster Stelle.

II. Wasser beim Evakuieren

Die Wassermoleküle, die als Teil des Gases beim Start des Pumpstandes im Innenraum einer Vakuumkammer vorhanden sind, stellen in den meisten Fällen kein Problem dar (seltene

Ausnahmen wie Nebelbildung siehe in [SEKTION IX](#) und werden relativ schnell evakuiert samt Stickstoff, Sauerstoff und anderen flüchtigen Molekülen. Wassermoleküle, die an andere Wassermoleküle gebunden sind, haften nur schwach an Oberflächen und werden daher ebenfalls zügig entfernt. Je nach dem Feuchtigkeitsanteil der eingelassenen Gase, der Dauer der Exposition, der Temperatur und der Affinität der Bauteile zu Wasser können auf den Oberflächen mehrere, sogar bis zu hundert Monolagen Wasser sich befinden [3,11,13,17,18] und in den ersten Sekunden und Minuten verflüchtigen.

Die Desorption von letzten Monolagen Wasser ist dagegen ein langsamer Vorgang. Dies hängt mit der Bindungsenergie der Wassermoleküle auf den Oberflächen zusammen. Zitierend [Ref.2](#): „Unglücklicherweise für die Vakuumtechnik“ liegt die Desorptionsenergie von Wasser auf nichtrostendem Stahl und Aluminium im Bereich von 80–104 kJ mol⁻¹. Die Moleküle mit wesentlich kleinerer Desorptionsenergie (unter 71 kJ mol⁻¹) sind schnell weg, die Moleküle mit Desorptionsenergie über 105 kJ mol⁻¹ desorbieren kaum. Hinzu kommt, dass ein gerade desorbiertes Wassermolekül mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder auf eine Oberfläche trifft und dort adsorbiert wird. Die Re-Adsorption von Wasser ist damit ein Teil des Problems. Die „unglücklichen“ Bindungsenergien der Wassermoleküle auf den technischen Oberflächen führen dazu, dass das Restgas einer typischen, nicht ausgeheizten Vakuumkammer zu 80–90% aus Wasser besteht. In einem Ganzmetallsystem sinkt die Ausgasrate und somit der Druck bei konstanter Temperatur und Pumpleistung in etwa proportional zu Kehrwert der Zeit, $p \propto t^{-1}$. Das Ausgasen wird durch höhere Temperaturen, Plasma, Reibung und die Zufuhr anderer Energiearten beschleunigt; siehe [SEKTION VII](#) mit Reinigung *in situ* für weitere Details.

III. Wasser vs. Oberfläche

Unter dem Mikroskop betrachtet, sind die Oberflächen von Metallteilen bei Weitem nicht homogen und glatt, selbst wenn sie spiegelpoliert sind. Komponenten aus nichtrostendem

Stahl und Aluminium-Legierungen sind mit einer Oxidschicht belegt, die in ihren Mikrorissen, Poren und anderen Defekten eine Menge Wassermoleküle beherbergen und sehr lange ins Vakuum abgeben kann. Die Wasseremission von nichtrostendem Stahl nach 1 Std Pumpzeit bei Raumtemperatur liegt im Bereich von 10^{-9} mbar L cm⁻² s⁻¹. Die üblichen Aluminiumoxid-Schichten sind etwas schwammartiger, deshalb geben die Aluminium-Komponenten nach einer Belüftung um eine Größenordnung mehr Wasser ab, als Teile aus nichtrostendem Stahl [19–21].

Nach Jahrzehnten Forschung herrscht ein breiter Konsens, wie die Ausgasung von Metallteilen effektiv reduziert werden kann: eine saubere und dichte Oxidschicht auf einer glatten, womöglich mechanisch oder elektrochemisch polierten Oberfläche stellt eine günstige universelle Lösung dar. Einer der letzten Arbeitsschritte für Teile aus nichtrostendem Stahl ist die s.g. Passivierung in einem Bad mit verdünnter Salpeter- oder Zitronensäure. Bei dem Verfahren, das nicht nur in Vakuumtechnik üblich ist, wird die „natürliche“ Schicht aus Chromoxid Cr₂O₃ noch dichter und schützender. In manchen Fällen werden Vakuumteile mit chemisch neutralen Schichten veredelt, zum Beispiel vergoldet. Vakuumteile aus normalem Stahl werden oft vernickelt, was u.A. Aufnahme von Wasser und folglich Ausgasung stark reduziert. Im Allgemeinen kann ein niedrigerer Partialdruck von Wasser durch eine Optimierung der Oberflächen erreicht werden.

Nicht jede gute Schicht hilft im Vakuum gegen Wasser. Die durch Eloxieren (Anodisieren von Aluminium-Legierungen) veredelten Oberflächen wirken wie ein sehr stark aufsaugender Schwamm, da die Schicht aus unzähligen parallelen Tausende Nanometer hohen Aluminiumoxid-Röhrchen besteht, siehe **ABBILDUNG 1**. Die Wasseraufnahme und -abgabe der Eloxal-Schichten ist deshalb um mehrere Größenordnungen höher als von den üblichen Oxidschichten, daher sind sie grundsätzlich ungeeignet für Vakuumssysteme, die öfters mit Luft in Berührung kommen.

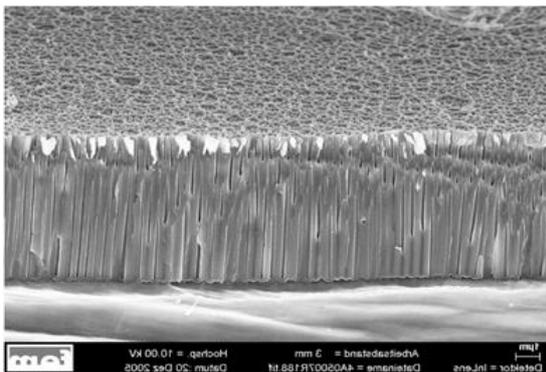


Abbildung 1: REM-Aufnahme typischer Eloxal-Schicht. Die Schicht mag das Bauteil aus Aluminium-Legierung sehr gut vor verschiedenen äußeren Einflüssen schützen, ist aber wegen ihrer porigen Struktur für Vakuumtechnik ungeeignet. Bild: fem Forschungsinstitut

Ähnliche Probleme sind bei Beschichtungsanlagen bekannt, deren Einbauten suboptimale, poröse Beläge bekommen. Mit jeder weiteren Charge werden sie dicker und gasen stärker aus. Für weniger Wasser im Restgas sollten die Prozesse und die Vakuumteile so gestaltet werden, dass das Wachstum der unnützen, schwammigen Schichten minimiert wird.

Teile aus Glas und Quarz mit ihrer „natürlichen“ glatten Oberfläche haben eine niedrige Ausgasungsrate von Wasser, vergleichbar mit Metallen wie Aluminium. Hochqualitative Keramik ohne Poren, z.B. aus 99.6% Al₂O₃ ist auch eine gute Wahl.

IV. Wasser vs. Kunststoffe

Zwei Phänomene sorgen für höhere Wasserabgabe von Kunststoffteilen im Vakuum: erstens kann Wasser in diesen Materialien gelöst werden, zweitens haben sie im Vergleich zu Metallen wesentlich höhere Permeabilität und lassen Wasser von außen durch [22–26].

Viton™ (The Chemours Company FC, LLC), PTFE (Polytetrafluorethylen) und andere Kunststoffe für Vakuumdichtungen können in ihrem Volumen größere Mengen Wasser speichern, bis zu 1% Eigengewicht! Die Ausgasrate von gelöstem Wasser aus Kunststoffteilen sinkt noch langsamer als bei Metallen, in etwa proportional zu $t^{-0.5}$ [6,27,28]. Die spezifische Ausgasung von Kunststoffteilen liegt nach zehn Stunden Evakuieren typischerweise im Bereich von 10^{-7} mbar L cm⁻² s⁻¹ und ist damit rund drei Größenordnungen höher als bei nichtrostendem Stahl.

Wasser diffundiert in Polymeren langsam, deshalb kann sich sowohl die Aufnahme als auch Abgabe von Wasser über mehrere Tage oder gar Wochen hinziehen. Diese Zeiten sind ebenfalls charakteristisch für die Permeation von Wasser durch Dichtungen und Schläuche aus Kunststoff. Der „lange Atem“ der Polymere ist am Beispiel von Viton-Dichtungen sehr eindrucksvoll in **Ref.29** gezeigt, siehe **ABBILDUNG 2**.

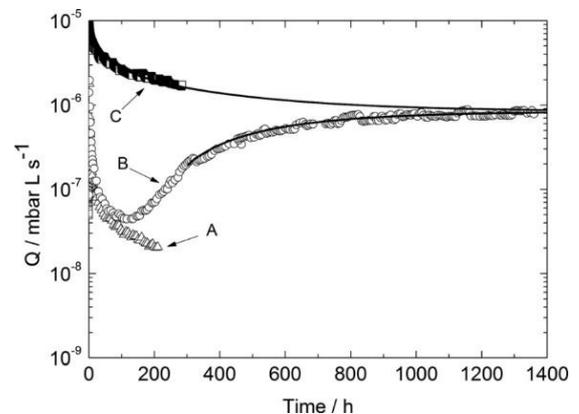


Abbildung 2: Gasabgabe Dichtung KF40 vs. Zeit. Gesamtleckrate von H₂O, N₂, O₂, Ar und CO₂ in einem Vakuumsystem über rund 2 Monate, bei Raumtemperatur. Anteil von H₂O beträgt 90% und mehr. Die durchgezogenen Linien stellen simulierte Verläufe dar, die Messpunkte zeigen Ausgasung des Systems mit: (A) einer Dichtung aus Aluminium, (B) einer im Vakuum ausgeheizten Viton-Dichtung und (C) einer Viton-Dichtung, gesättigt mit feuchter Luft. Die Abbildung wurde übernommen aus **Abb.2** in **Ref.29** [M. Sefa and J. Setina, *J. Vac. Sci. Technol. A* 35, 041603 (2017)]. Copyright (2017) by The American Vacuum Society.

Die Diffusion der in Dichtung gelöster Wassermoleküle bestimmt die Ausgasung die ersten paar Tage, vergleiche Kurven B und C. Nach 50-100 Stunden macht sich die Permeation durch die Dichtung immer mehr bemerkbar. Erst nach rund 40 Tagen „vergessen“ die Viton-Dichtungen (KF40,

ca. 5 mm dick) ihre Vorgeschichte, die Gasabgabe wird praktisch nur durch die Permeation bestimmt. Gelöstes Helium verlässt so eine Dichtung in wenigen Minuten [1]. Wasser braucht dafür einen Monat oder länger!

Aus der Luft dringen durch die Elastomer-Dichtungen meistens Wassermoleküle durch [23,25,29–32]. Die relativ günstigen Viton-Dichtungen gehören zu den besseren, ihre Permeabilität ist vergleichsweise niedrig.

Bei höheren Temperaturen diffundiert Wasser und andere Gase durch die Kunststoffe schneller [2,33]. So steigt Permeation von Wasser durch Viton in etwa um Faktor 4-5 bei 80-100°C. Um die in einem Kunststoffteil gelösten Gase auszutreiben, wird es je nach Dicke über einige Tage im Vakuum geheizt. Eine 5-10 mm dicke Dichtung aus Viton braucht in einem Vakuumofen etwa 2-3 Tage bei 100-150°C. Unmittelbar danach gast sie zunächst nicht viel mehr Wasser aus als eine Metaldichtung, siehe Kurve B in **ABBILDUNG 2**.

Das Problem der Permeabilität von O-Ringen aus Elastomeren lässt sich gänzlich vermeiden, wenn sie durch Metaldichtungen ersetzt werden, siehe **ABBILDUNG 3**. Dies können Spitzkantendichtungen aus weichem Metall, z.B. reines Aluminium oder Kupfer sein. Eine andere Variante der Metaldichtungen stellen elastische Teile mit C-förmigem Profil dar, i.d.R. aus Inconel™ (The Special Metals) gefertigt; oft haben sie eine Ummantelung aus Aluminium. Mit besonders feinen Ausführungen solcher Dichtungen können sogar Glasscheiben abgedichtet werden. Metaldichtungen sind wesentlich teurer, brauchen mehr Anpresskraft, können nur einmal verwendet werden und stellen höhere Anforderungen an die Beschaffenheit der Dichtflächen. Trotz der Nachteile wird manch eine gummigedichtete Kammer für saubere Prozesse mit Metaldichtungen nachgerüstet.

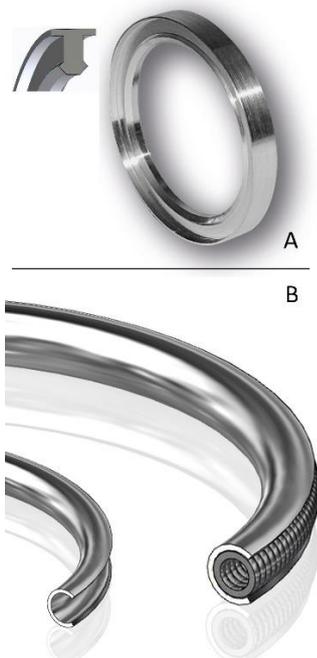


Abbildung 3: Metaldichtungen als Ersatz für O-Ringe aus Polymeren. (A) Spitzkantendichtung, Lagerware für Verbindungen nach DIN 28403/ISO 2861 und DIN 28404/ISO 1609. Mit Erlaubnis von Schwer Fittings GmbH. (B) C-Ringe, oft verstärkt mit Spiralfeder. Mit Erlaubnis von GFD-Gesellschaft für Dichtungstechnik mbH.

Dort, wo eine Metaldichtung nicht in Frage kommt, zum Beispiel an einer Anlagentür, können doppelte O-Ringe mit Zwischenabsaugung [25,30] helfen. Die Zwischenabsaugung muss dabei nicht besonders leistungsfähig sein, ein Druck kleiner 1 mbar reicht bereits aus, um die Permeation aus der Luft um Faktor 1000 zu reduzieren.

Die Ausgasung einiger Hochtemperatur-Polymere, wie Polyetheretherketon (PEEK) und Kapton™ (Dupont Electronics), wurde neulich in **Ref.27** untersucht, einschließlich Messungen bei Raumtemperatur sowie bei 100°C und 200°C. Nach 10-stündigem Abpumpen bei Raumtemperatur ist die Wasserabgabe dieser Materialien hoch und liegt im Bereich von 10^{-7} mbar L cm⁻² s⁻¹, wobei sie etwa proportional zu $t^{-0.5}$ abnimmt. Dünne Kapton-Folien (≤ 0.05 mm) bilden eine Ausnahme, da ihre Ausgasung von Wasser mit nichtrostendem Stahl vergleichbar ist. Daher sind Glas oder dichte, saubere Keramik die bevorzugten Isolatoren im Vakuum. Alternativ kann die Dicke von Polymerteilen auf ein Minimum reduziert werden.

V. Auswirkung von Wasser auf Prozesse und Komponenten

In einem Vakuumsystem kann Wasser unterschiedlichste Probleme verursachen. Eine vollständige Auflistung würde den Rahmen dieser Übersicht sprengen, nennen wir die drei meist schwerwiegenden Effekte. Erstens, mechanische Vorvakuumpumpen können ausfallen, wenn ihre beweglichen Teile durch Eiskristalle beschädigt werden. Zweitens, beim Betrieb mit aggressiven Gasen, zum Beispiel in den Ätzanlagen der Halbleiterfertigung, sollen Oberflächen so wenig wie möglich mit Wasser kontaminiert werden, sonst können sie viel schneller korrodieren [34]. Drittens, Wasser stört oft bei Beschichtungsprozessen, seine Präsenz kann das Schichtwachstum und -eigenschaften stark beeinflussen [35,36].

Zu den wenigen positiven Auswirkungen von Wasser im Vakuum zählt, dass Teile ohne Schmierung und ohne spezielle Schichten wesentlich besser aufeinander gleiten, solange sie mit Wassermolekülen belegt sind. Die „natürliche“ Wasserschicht verhindert auch das Kaltverschweißen bzw. Reibverschweißen der Oberflächen. Die schmierende Wirkung der adsorbierten Wassermoleküle merken wir üblicherweise nicht, sie ist unter normalen Bedingungen einfach vorhanden. Erst wenn diese Schmierschicht fehlt, können die reibenden Teile plötzlich versagen, sei es in einem sauberen Vakuumsystem oder in einem Mechanismus, der mit einem trockenen Gas dauerhaft gespült wird [37,38].

Das Zuführen von Wasser zu einem Prozess ist in Vakuumtechnik nicht weit verbreitet und klingt paradox, kann aber doch eine günstige Lösung für einige Anwendungen darstellen: manchmal stört nicht das Wasser selbst, sondern die Tatsache, dass sein Partialdruck nicht reproduzierbar ist bzw. sich mit der Zeit ändert. Ein definierter, etwas erhöhter Partialdruck von Wasser kann helfen, die Auswirkung von Wasser stabil zu halten und den Prozess besser zu beherrschen. Dafür kann Wasser aus einem Behälter über eine kleine Öffnung zugeführt werden; so ein kontrollierter Gasfluss von Wasser ist jedenfalls technisch viel leichter zu bewerkstelligen als das mühsame Eliminieren von Wassermolekülen.

VI. Wasseraufnahme vor dem Prozess reduzieren

Zu den häufigsten und wirksamsten Maßnahmen gegen Wasser zählt das Be- und Entladen einer Kammer über eine Schleuse. Diese Vorrichtung erhöht zwar den Preis und Abmessungen einer Vakuumanlage, beschleunigt aber Prozesse enorm. Vakuumschleusen ermöglichen die Aufrechterhaltung optimaler Vakuumbedingungen ohne Unterbrechung, selbst während eines Substrattransfers. Sie werden verwendet in Maschinen für Bearbeitung von Wafern, Elektronenmikroskopen, Anlagen für Oberflächenanalyse im Ultrahochvakuum (UHV) und vielen anderen. Die Taktzeiten können durch Verwendung einer Schleuse von Tagen und Wochen auf Minuten reduziert werden. Üblicherweise ist die Schleuse als eine zusätzliche Vakuumkammer ausgeführt, in etwa so groß wie die Teile, die ein- und ausgeschleust werden, siehe **ABBILDUNG 4**.

Eine andere Variante einer Schleuse kann ein gasgespülter Behälter sein, zum Beispiel ein Handschuhkasten, der an die Vakuumkammer angedockt wird bzw. sie umschließt, siehe **ABBILDUNG 5**. Solche Schleusen sind i.d.R. günstig, weil sie nicht vakuumfest sein müssen und keinen Pumpstand brauchen. Die Vakuumkammer muss zwar bei Benutzung einer gasgefüllten Schleuse unter Atmosphärendruck gesetzt und danach wieder abgepumpt werden. Wenn dabei das Fluten der Kammer und die Schleusenvorgänge mit einem sauberen trockenen Gas durchgeführt werden [18], gelangen nur ganz wenige Wassermoleküle in das Vakuumssystem.

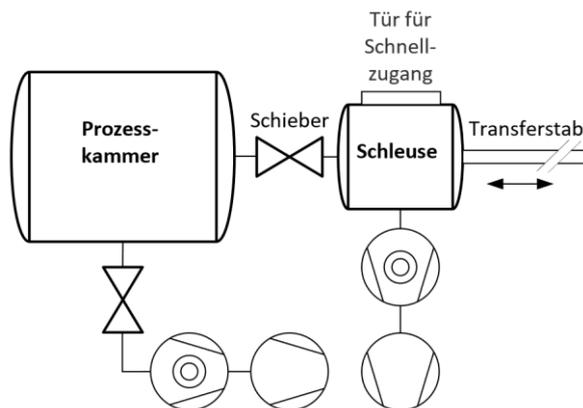


Abbildung 4: Typische Laboranlage mit einer Vakuumschleuse. Die Schleusentür und das Schieberventil haben einen Innendurchmesser von 6", passend für die sichere Behandlung von 4"-Wafern. Eine Turbomolekularpumpe mit Saugvermögen von 200 L s^{-1} an der Schleuse ermöglicht eine Waferübergabe in die Prozesskammer bei 10^{-6} mbar bereits nach einer $\frac{1}{2}$ Stunde Pumpzeit.



Abbildung 5: Eine Sektion einer Anlage für metallorganische chemische Gasphasenabscheidung (MOCVD). Der Handschuhkasten links schützt die Reaktorkammer vor Luft beim Service, über den Handschuhkasten rechts werden die Substrate ein- und ausgeschleust. Mit Erlaubnis von Fa. AIXTRON SE.

Wenn keine gasgespülte oder Vakuum-Schleuse verwendet wird, kann das Eindringen von Wasser in eine Vakuumkammer beim Service, Be- und Entladen nicht ausgeschlossen, aber gemindert werden, und zwar mit folgenden Maßnahmen.

Erstens soll die Kammer mit trockenem Gas geflutet und sein leichter Überdruck aufrechterhalten werden bis das Abpumpen gestartet wird. So hat die Luftfeuchte buchstäblich mit einem Gegenwind zu kämpfen. Verwirbelungen und sonstige Ursachen einer Einströmung von Luft sollten dabei gemieden werden, die Öffnung soll möglichst klein sein. Zweitens soll das Innere der Kammer vor und während der Belüftung so warm sein wie möglich. Damit wird Adsorption von Wasser auf den Vakuumteilen reduziert und die Kondensation verhindert. Drittens sollte die Dauer der Belüftung so kurz wie möglich sein. Für Metallteile ist es unwesentlich, ob die Kammer drei Stunden oder drei Tage geöffnet ist, weil die Oberflächen bereits nach einer Stunde mit etwa einer Monolage Wasser belegt werden, selbst wenn der Partialdruck von Wasser weit unter 1 mbar liegt. Es macht allerdings einen großen Unterschied, ob die Exposition zur Feuchtigkeit auf wenige Minuten oder gar Sekunden beschränkt wird [4]. Die Elastomere wie Viton nehmen zwar Wasser nach Tagen immer noch auf, aber auch hier zählen die Minuten am Anfang der Belüftung viel mehr [31].

Zu guter Letzt sollte der Wassergehalt in der Luft niedrig gehalten werden. Die Teile, die ins Vakuum eingebracht werden, sollten ebenfalls möglichst trocken sein. Insbesondere bei den Maschinen mit Polymer-Dichtungen und porösen Schichten korreliert die Wasseraufnahme und -ausgasung mit der Luftfeuchtigkeit während des Beladens [11]. Es kann sich also lohnen, die Feuchtigkeit der Umgebungsluft auf ca. 40% zu begrenzen, was aus der Sicht vom Arbeitsschutz immer noch ausreichend ist. Auch das Ausatmen in die Kammer sollte auf ein Minimum reduziert werden, da die ausgeatmete Luft bis um den Faktor 3 feuchter sein kann als die Raumluft.

VII. Wassermoleküle vor dem Prozess entfernen – *in-situ* Reinigung

Das Ausheizen ist die übliche *in-situ* Reinigungsmethode in Ultrahochvakuum-Technik [2]. Dabei wird die gerade belüftete Kammer zunächst evakuiert, dann erwärmt und anschließend wieder abgekühlt, siehe **ABBILDUNG 6**. In den Ganzmetallsystemen kann Wasser mit den Ausheiztemperaturen bis zu 450°C praktisch restlos entfernt werden. Ein Ausheizen bei 150-200°C reicht für eine radikale Reduzierung der Ausgasung von Wasser aus [39]. Nach 24 Std bei 150°C ist die Hauptkomponente des Restgases einer Kammer aus nichtrostendem Stahl i.d.R. nicht mehr Wasser, sondern Wasserstoff; der Partialdruck von Wasser ist dann um 2-3 Größenordnungen kleiner als in einem nicht geheizten System, siehe **ABBILDUNG 10**. Bei den Temperaturen werden die Elastomer-Dichtungen von Ventilen und Türen nicht übermäßig strapaziert. Die max. zulässige thermische Belastung von Turbomolekularpumpen bzw. anderen Komponenten kann ein guter Grund sein, nur bis zu 100-120°C zu heizen. Aber auch ein Ausheizen bei 60-80°C senkt den Partialdruck von Wasser merklich.

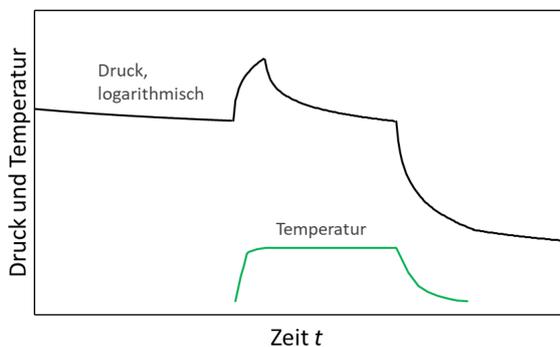


Abbildung 6: Druck- und Temperaturverlauf beim Ausheizen, schematisch. Weil Wasser das Restgas nach einer Belüftung dominiert, ist die Druckkurve auch für Partialdruck von Wasser charakteristisch. In den Phasen konstanter Temperatur vor und während des Heizens fällt der Druck mit der Zeit in etwa $p \propto t^{-1}$, danach viel langsamer.

Ein Ausheizvorgang wird oft erst im Bereich von Fein- bzw. Hochvakuum gestartet, um die Hochvakuumpumpe auch beim Druckanstieg während des Heizens weiterhin verwenden zu können. Typischerweise dauert das Heizen 12-48 Stunden, manchmal aber auch eine Woche. Es ist sinnvoll, in dieser Zeit die internen Komponenten des Vakuumsystems, die im Betrieb geheizt werden, ebenfalls zu heizen – Kathoden, Heizelemente usw.

Der vergleichbar große Zeitaufwand für ein Ausheizen wird dadurch belohnt, dass das Wasser gründlicher als mit den anderen *in-situ* Reinigungsmethoden entfernt wird. Die erhöhten Temperaturen sorgen nicht nur für stärkere Desorption und weniger Re-Adsorption, sondern haben auch eine Tiefenwirkung: sie beschleunigen Diffusion aus Kunststoffen sowie aus den porösen Teilen und Schichten.

Eine andere Methode, Reinigung mit Plasma kann ebenfalls Desorption von Wasser beschleunigen; sie braucht viel weniger Zeit. Im einfachsten Fall wird eine Glimmentladung (**ABBILDUNG 7**) verwendet. Typischerweise wird Plasma in Argon oder Helium gezündet, oft mit Zusatz von Sauerstoff, was die passivierenden Oxidschichten auf den technischen

Oberflächen verbessert. Der Druck liegt dabei im Bereich von einigen Hundertstel mbar. Die Wassermoleküle auf den Oberflächen werden mit Plasma sehr schnell und effektiv abgetragen; dank der hohen Energie der Plasmateilchen reichen oft schon 10-30 Minuten. Dabei wärmt das Plasma die Einbauten kaum auf. Allerdings werden die Poren und andere „Verstecke“ nicht so gut gereinigt wie beim Ausheizen.



Abbildung 7: Glimmentladung in einer Beschichtungskammer. Der lange helle Bogen in unterer Hälfte ist der Glimmstab. Mit freundlicher Erlaubnis von Fa.Marquis.

Bei allen *in-situ* Reinigungsmethoden sollte das Vakuumsystem möglichst gleichmäßig geheizt bzw. gereinigt werden. Sonst werden die Wassermoleküle an den kälteren bzw. verdeckten Stellen re-adsorbiert und gasen weiterhin von dort aus. Deshalb sind die eher lokal reinigenden Methoden wie Bestrahlung mit UV-Licht, Ionen u.Ä. weniger wirksam und lohnen sich nur in Einzelfällen.

Bei einigen Anwendungen sind weder Ausheizen noch Plasmareinigung möglich bzw. sinnvoll. In diesen Fällen kann ein zyklisches Spülen mit trockenen Gasen helfen [9,16,40,41]. Die Methode ist sehr schonend, sie wird u.A. in Halbleiterfertigung seit Jahrzehnten benutzt, um Kontaminationen aller Art zu entfernen. Besonders hilfreich ist sie gegen Wasser in labyrinthartigen Komponenten wie Gasverteiler und bei extrem engen Geometrien wie in den Flachbildschirmen 40 cm × 40 cm × 75 µm. Typischerweise wird hier in Dutzenden Zyklen trockener, womöglich warmer Stickstoff eingelassen und abgepumpt, der Druck wechselt ständig, im Minutentakt, zwischen etwa 50 mbar und 0.1 mbar. Die Reinigungswirkung besteht darin, dass die Gasmoleküle das adsorbierte Wasser durch die unzähligen Stöße verdrängen. Die Energiezufuhr und somit die Wahrscheinlichkeit der Desorption ist im Vergleich mit den anderen *in-situ* Reinigungen eher gering. Dafür aber werden die desorbierten Wassermoleküle mit Gewalt der viskosen Strömung aus entlegensten Ecken entrissen und haben wenig Chancen auf eine Re-Adsorption. Glücklicherweise sind verschiedene Arten der Vorvakuumumpen gerade in diesem Druckbereich besonders effektiv, was schnelle Gasflüsse ermöglicht. So eine Reinigung dauert in etwa eine Stunde, bei größeren Volumina und kleineren Pumpen mehrere Stunden.

Selbstverständlich werden die o.g. *in-situ* Reinigungsmethoden oft kombiniert, um bessere Ergebnisse zu erreichen. Die Methoden helfen nicht nur gegen Wasser,

sondern gegen andere, insbesondere organische Kontaminationen.

VIII. Wassermenge während des Prozesses reduzieren

Kryopumpen sind ein mächtiges Werkzeug mit dem man die Anzahl der störenden Wassermoleküle verringern kann. Die modernen, als Katalogware erhältlichen Refrigerator-Kryopumpen fangen praktisch jedes eintretende Wassermolekül ab. Deshalb haben die Pumpen speziell für Wasser ein sehr hohes Saugvermögen. Meissner-Fallen [42], eine Unterart von Kryopumpen, sind noch hilfreicher gegen Wasser. Sie werden i.d.R. direkt in einer Vakuumkammer platziert, dabei wird ihre Pumpleistung nicht durch die Leitwerte eines Pumpstutzen und der Ventile beschränkt. Damit wird die lange Kette von mehrfacher Desorption und Re-Adsorption am effektivsten unterbrochen und Partialdruck von Wasser um mehrere Größenordnungen gesenkt. Mit einem Quadratmeter Oberfläche kann eine Meissner-Falle bis zu $150\,000\text{ L s}^{-1}$ Wasser aufnehmen, siehe **ABBILDUNG 8**. Ursprünglich waren die Meissner-Fallen mit flüssigem Stickstoff auf ca. 77 K gekühlt. Solche Lösungen, manchmal als aufwendige Abschirmungen mit Hohlräumen komplexer Geometrie, werden immer noch benutzt, z.B. für Molekularstrahlepitaxie (Molecular Beam Epitaxy).

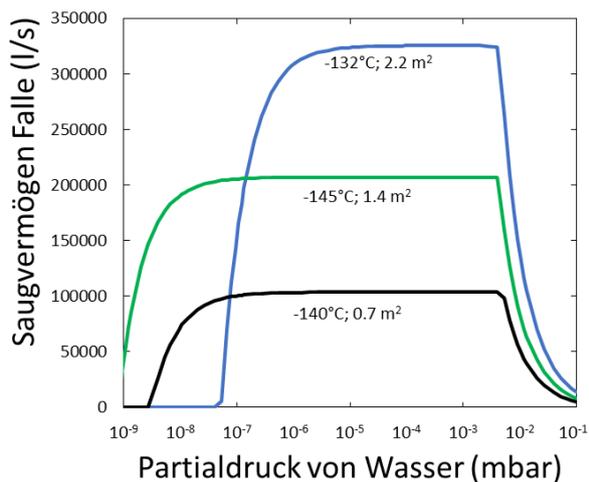


Abbildung 8: Saugvermögen Kühlfallen, gerechnet für Wasserdampf. Legenden beinhalten die Temperatur und die Fläche der Kühlfalle. Daten von Fa. Edwards Vacuum LLC

In den letzten 30-40 Jahren werden immer mehr Meissner-Fallen mit Refrigeratoren verwendet. Typischerweise werden hier die Fallen aus einem Rohr geformt, meistens aus Kupfer oder auch nichtrostendem Stahl, siehe **ABBILDUNG 9**. Moderne Kühlaggregate bringen die Fallen innerhalb von wenigen Minuten auf Betriebstemperaturen unter -130°C und vergleichbar schnell wieder auf die Raumtemperatur. Das Saugvermögen ist in etwa proportional zur Fläche der Falle im Fein- und Hochvakuum, vergleiche die blaue und schwarze Kurve in **ABBILDUNG 8**. Um einen Partialdruck von Wasser im UHV-Bereich zu erreichen, muss die Falle auf -140°C oder tiefer abgekühlt werden, siehe grüne und schwarze Kurve in **ABBILDUNG 8** sowie die **TABELLE 1**. Dank gigantischem Saugvermögen für Wasser und der Schnelligkeit beim Kühlen bzw. Aufwärmen sind die Fallen für viele Prozesse attraktiv. Meissner-Fallen sind vor allem in Beschichtungsanlagen von

großem Nutzen: sie verkürzen die Taktzeiten erheblich und sorgen für stabilere Ergebnisse. Die adsorbierten Wassermoleküle schützen dabei Oberflächen von Fallen vor Beschichtung.

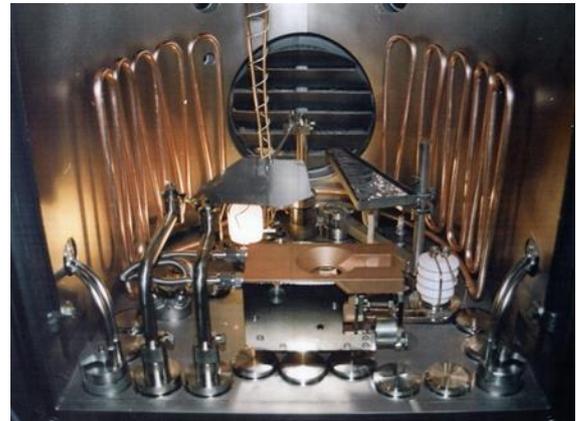


Abbildung 9: Meissner-Falle (Mäander aus Kupferrohr) in einer Beschichtungsanlage. Bild: Fa. Edwards Vacuum LLC

Tabelle 1: Sättigungsdampfdruck von Wasser

Temperatur °C	Druck, K	Druck, mbar	Bemerkung
-143	130.16	$< 2 \cdot 10^{-10}$	UHV
-100	173.16	$< 2 \cdot 10^{-5}$	HV
0	273.16	~ 6	Tripelpunkt
19	292.16	22	\sim Raumtemperatur
100	373.16	~ 1000	Siedepunkt

Werden bei einem Prozess Gase eingelassen, könnten sie das Wasser mitbringen. Selbst bei Raumtemperatur und einem Partialdruck von Wasser im Bereich von 10^{-9} mbar kann die Wassermenge auf einer Oberfläche zunehmen, wobei die Zunahme sehr stark von dem Partialdruck abhängt [11]. Deswegen müssen für ganz trockene Prozesse alle Gase ebenfalls extrem trocken sein. So zum Beispiel könnte der Wassergehalt von wenigen ppm störend sein bei einem Prozessdruck von 0.01 mbar. Dabei kann entweder die Gasquelle (Flasche, Druckminderer, Filter usw.) bereits zu viel Wasser beinhalten, oder auch die Komponenten des Gaseinlasssystems zu viel Feuchte aus der Atmosphäre durchlassen wegen Permeation von Kunststoff-Schläuchen, Gummidichtungen u.Ä. Je weniger Gas durch die Leitungen fließt, desto höher kann seine Feuchtigkeit infolge der Permeation werden. Das Problem ist z.B. bei den Turbomolekularpumpen bekannt, die nur ab und zu mit Stickstoff geflutet werden. Wassermenge aus dem Gaseinlass lässt sich reduzieren, indem Polymer-Komponenten gemieden, die Gasleitungen permanent gespült und / oder Gase unmittelbar vor der Vakuumkammer gezielt getrocknet werden.

IX. Nebelbildung verhindern

Wird feuchte Luft schnell evakuiert, kann sie sich so weit abkühlen, dass ein Wasseraerosol entsteht. Das interessante Phänomen kann nur unter ganz bestimmten Bedingungen auftreten, es braucht vor allem ein schnelles Pumpen. Damit die Gasexpansion adiabatisch verläuft, also praktisch ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, muss außerdem das

Volumen relativ groß und frei von Metallteilen sein. Solche Situation entsteht z.B. in einer nahezu kubischen Kammer 10 m^3 beim Evakuieren mit $25000\text{ m}^3\text{ Std}^{-1}$. Unter welchen Bedingungen sich der Nebel bildet, ist gut erforscht und lässt sich mit dem s.g. Zhao-Faktor beschreiben [1,9,16].

Die Auswirkung von Wasserdampf kann für empfindliche Oberflächen kritisch sein. Das Problem: Die Tropfen hinterlassen Flecken und Partikel, welche optische Eigenschaften, Schichthftung, Nanostrukturen usw. stören können. Warum Kondenswasser zu erhöhter Partikelbelastung auf Oberflächen führt, ist nicht intuitiv verständlich, die Tropfen könnten ja spurlos verdampfen. Meistens aber begünstigen sich die Tropfen und Partikel gegenseitig: die Nebeltropfen bilden sich an den Partikeln in der Luft und bringen sie auf die Oberflächen mit; sonst wären die Partikel beim Abpumpen einfach weggeblasen [43]. In Ref.44 ist eine weitere mögliche Erklärung für die Kontamination in einer Anwendung vorgestellt: die Tröpfchen bestehen womöglich nicht nur aus reinem Wasser, sondern beinhalten Spuren von Schwefelsäure.

Maßnahmen gegen die Bildung von Aerosolen lassen sich schnell aufzählen. Erstens kann das Abpumpen verlangsamt werden; dabei reicht es, den Pumpstand nur im kritischen Bereich, also bei Drücken über 600 mbar zu drosseln. Alternativ bzw. zusätzlich könnte die feuchte Luft vor dem Abpumpen durch ein trockenes Gas ausgetauscht werden. Für die beiden Varianten geht allerdings etwas Prozesszeit verloren. Eine andere Maßnahme, ganz ohne Zeitverlust, ist in Ref.45 aufgeführt: nah der kritischen Oberfläche werden Metallteile platziert. Damit wird der Wärmeaustausch zwischen dem feuchten Gas und den umliegenden Einbauten verstärkt, es kühlt langsamer und nicht so tief ab. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein Gas mit hoher Wärmeleitfähigkeit räumlich und zeitlich begrenzt beizumengen, zum Beispiel Wasserstoff oder Helium. So eine gut dosierte, gerichtete Zufuhr von einem warmen, trockenen, gut wärmeleitenden Gas in der Nähe der wichtigen Oberflächen (vergleichbar mit minimal invasiver Chirurgie) könnte eine pragmatische Lösung sein, die die Prozesszeiten nicht wesentlich verlängert.

X. Komponenten für Lecksuche vorbereiten

Wasser gefriert im Vakuum, deshalb können Leckstellen mit Eis abgedichtet werden und bei einer Helium-Leckprüfung unentdeckt bleiben [1]. Wegen möglicher Eisbildung sollte man Vakuumteile vor einem Helium-Dichtheittest nicht ins Wasser eintauchen bzw. nach einer Wasserdruckprüfung unbedingt trocknen.

Aus dem gleichen Grund soll ein Kühlkreis in einer Vakuumkammer vor einer Helium-Lecksuche getrocknet werden. Zunächst kann die Flüssigkeit einfach mit Druckluft entfernt werden. Die effektivste Art, die Wasserreste komplett aus allen Spalten und Verwinkelungen eines Kühlkreises zu entfernen, ist das Evakuieren mit einer Vakuumpumpe. Dies kann bei Raumtemperatur zum Beispiel eine Membranpumpe mit einem Enddruck kleiner 10 mbar bewerkstelligen. Damit Wasser die Pumpe nicht verstopft oder gar beschädigt, sollte sie immer wieder mit Ballastgas durchgespült werden, wie in Vakuumtrocknungsanlagen üblich ist. Der Druck in einem labyrinthartigen Kühlkreis mag dabei Stunden und Tage unverändert hoch bleiben im Bereich des

Sättigungsdampfdrucks von Wasser bei gegebener Temperatur. Der Druck wird schlagartig sinken, sobald sich der letzte Tropfen Wasser verflüchtigt hat. Danach kann der Kühlkreis belüftet werden, Helium-Lecksuche kann starten.

XI. Partialdruck von Wasser erfassen

Die Menge der Wassermoleküle, die sich im Volumen einer Vakuumkammer bewegen, kann mit Hilfe von einem Massenspektrometer gemessen werden. Daraus lassen sich Rückschlüsse über Verhalten und Störwirkung von Wasser in verschiedenen Phasen des Prozesses ziehen. Für die Aufgabe empfehlen sich die s.g. Restgasanalytoren (RGA), die meist verbreitete, günstige Art von Massenspektrometern [1,2]. Viel wichtiger als Eigenschaften des RGA, und in der Regel aufwendiger als das Gerät selbst, ist eine sorgfältige Integration des Messkopfes in die Anlage. Idealerweise soll das RGA ununterbrochen betrieben werden, am besten in seiner eigenen, permanent geheizten, kleinen UHV-Kammer, über ein Schieberventil an die Prozesskammer angeschlossen. So lassen sich verschiedene Messartefakte vermeiden und schon kleinste Mengen von H_2O zuverlässig messen. Der maximale Betriebsdruck eines typischen RGA ist $\sim 10^{-5}$ mbar, denn die mittlere freie Weglänge der Ionen muss vergleichbar oder größer sein als die Länge des Massenfilters $\sim 0.1\text{ m}$. Wenn die Prozessdrücke höher sind, wird eine differentielle Pumpstufe verwendet, das Schieberventil wird durch eine Reihe von kleineren Ventilen und Drosseln ersetzt.

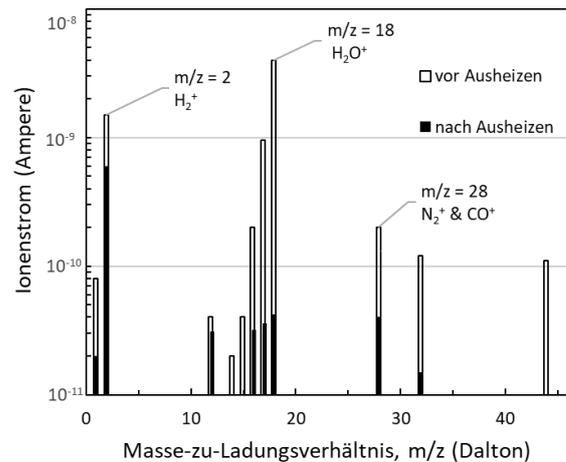


Abbildung 10: Typische Massenspektren einer Kammer vor und nach dem Ausheizen bei 120°C .

Nach dem Ausheizen sank der Gesamtdruck (entspricht der Summe aller Peaks) um eine Größenordnung, während der Partialdruck von Wasser (Peaks bei m/z 18 und 17) um den Faktor 100 abnahm.

Der Hauptgrund für den permanenten Betrieb in einer eigenen beheizten Kammer ist die sehr heiße Kathode, die in der Ionenquelle eines jeden RGA verwendet wird; siehe zwei dünne Drähte um das Gitter (Anode) in ABILDUNG 11. Die Kathode emittiert bei Temperaturen über 1300°C nicht nur Elektronen zur Ionisierung der Moleküle des Restgases, sondern auch Wärmestrahlung. Deshalb misst ein RGA in den ersten 12-24 Std hauptsächlich die Ausgasung seiner eigenen Ionenquelle und anderer Oberflächen, die durch die Kathode zunehmend erwärmt werden.



Abbildung 11: Analysator-Kopf eines RGA's. Seine Hauptkomponenten sind eine Ionenquelle, ein Massenfilter und ein Detektor von Ionenstrom (nicht gezeigt). Ionenquelle ist auf der weißen Keramik aufgebaut. Hinter der Keramik sind vier Stäbe des Massenfilters zu sehen, zwischen zwei Haltestäben. Bild: Fa. SRS Stanford Research Systems.

Interpretation von Massenspektren kann komplex sein, jedoch liefert ein sorgfältig und unter gut definierten Bedingungen betriebener RGA wertvolle Informationen über das Verhalten von Wasser in verschiedenen Phasen des Prozesses.

Literaturverzeichnis

- [1] J. F. O'Hanlon, and T. A. Gessert, *A Users Guide to Vacuum Technology* (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2024).
- [2] K. Jousten, *Handbuch Vakuumtechnik* (Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018).
- [3] M. Li, and H. F. Dylla, *Model for the outgassing of water from metal surfaces*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** (1993), no. 4, 1702–1707.
- [4] M. Li, and H. F. Dylla, *Model for water outgassing from metal surfaces. II*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12** (1994), no. 4, 1772–1777.
- [5] M. Li, and H. F. Dylla, *Modeling of water outgassing from metal surfaces (III)*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** (1995), no. 4, 1872–1878.
- [6] B. B. Dayton, *Outgassing rate of preconditioned vacuum systems after short exposure to the atmosphere: Outgassing rate measurements on Viton-A and copper*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** (1995), no. 2, 451–461.
- [7] Y. Shiokawa, and M. Ichikawa, *Measurement and control of sticking probability of H₂O on stainless steel surfaces*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **16** (1998), no. 3, 1131–1136.
- [8] Y. Tuzi, T. Tanaka, K. Takeuchi, and Y. Saito, *Effect of surface treatment on the adsorption kinetics of water vapor in a vacuum chamber*, *Vacuum* **47** (1996), nos. 6–8, 705–708.
- [9] J. F. O'Hanlon, *Ultrahigh vacuum in the semiconductor industry*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12** (1994), no. 4, 921–927.
- [10] O. Sneh, M. A. Cameron, and S. M. George, *Adsorption and desorption kinetics of H₂O on a fully hydroxylated SiO₂ surface*, *Surf. Sci.* **364** (1996), no. 1, 61–78.
- [11] J. R. Chen, H. T. Hsu, J. Y. Lee, T. H. Shen, G. Y. Hsiung, and S. L. Chang, *Elucidating the mechanism of water adsorption on aluminum surface by SIMS*, *Appl. Surf. Sci.* **235** (2004), nos. 1–2, 207–213.
- [12] Y. Liu, J. Huang, C. Wu, and J. Chen, *Thermal outgassing study on aluminum surfaces*, *Vacuum* **44** (1993), nos. 5–7, 435–437.
- [13] M. Sefa, J. Setina, and B. Erjavec, *Investigation of a method for measurement of water vapor coverage on technical surfaces*, *Vacuum* **131** (2016), 201–208.
- [14] P. Chiggiato, *Outgassing properties of vacuum materials for particle accelerators*, *Proceedings of the 2017 CERN–Accelerator–School course on Vacuum for Particle Accelerators (Glumslöv, Sweden, 2017)* pp. 143–189.
- [15] H. F. Dylla, *The Problem of Water in Vacuum Systems*, in *CERN Accel. Sch. 2006*, Platja D'Aro, Spain, 2006. <https://cas.web.cern.ch/sites/default/files/lectures/platjadaro-2006/dylla-2.pdf>
- [16] A. Berman, *Water vapor in vacuum systems*, *Vacuum* **47** (1996), no. 4, 327–332.
- [17] J. R. Chen, G. Y. Hsiung, Y. J. Hsu, S. H. Chang, C. H. Chen, W. S. Lee, J. Y. Ku, C. K. Chan, L. W. Joung, and W. T. Chou, *Water adsorption–desorption on aluminum surface*, *Appl. Surf. Sci.* **169–170** (2001), 679–684.
- [18] C.-K. Chan, Y.-T. Cheng, G.-Y. Hsiung, B.-J. Chan, Y.-C. Ou, C.-Y. Yang, and J.-R. Chen, *Effect of environmental humidity on rate of thermal outgassing*, *Vacuum* **84** (2009), no. 5, 747–750.
- [19] H. F. Dylla, D. M. Manos, and P. H. LaMarche, *Correlation of outgassing of stainless steel and aluminum with various surface treatments*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11** (1993), no. 5, 2623–2636.

XII. Schlussbemerkungen

In über 100 Jahren der Vakuumtechnik sind Probleme mit Wasser wohl das größte Sorgenkind geblieben. Minuten und Stunden nach dem Belüften und Evakuieren beträgt der Wasseranteil im Restgas 80% oder mehr. Viele Prozesse beginnen daher eher in Wasserdampf, welcher somit als ein unvermeidliches Prozessgas betrachtet und entsprechend behandelt werden sollte.

Bis heute ist die Datenlage zu einigen Aspekten dieses Themas unzureichend. Beispielsweise mangelt es an umfassenden Publikationen zur Permeation verschiedener Polymere über einen breiten Temperaturbereich. Ebenso wäre es wünschenswert, die Porosität handelsüblicher technischer Keramiken, hochqualitativer Aluminiumoxide, bearbeitbarer Glaskeramiken und anderer Materialien zu quantifizieren.

Darüber hinaus wäre eine systematische Studie zum Ausgasen von Wasser in Abhängigkeit von Temperatur und Dauer des Ausheizens für viele Anwendungen äußerst hilfreich.

Danksagungen

Der Autor dankt für Unterstützung und hilfreiche Diskussionen Hin-Yiu Anthony Chung, Gennady Fedosenko und Tais Gorkhover.

- [20] J. A. Fedchak, J. K. Scherschligt, S. Avdiaj, D. S. Barker, S. P. Eckel, B. Bowers, S. O'Connell, and P. Henderson, *Outgassing rate comparison of seven geometrically similar vacuum chambers of different materials and heat treatments*, *J. Vac. Sci. Technol. B* **39** (2021), no. 2, 024201.
- [21] J.-R. Chen, and Y.-C. Liu, *A comparison of outgassing rate of 304 stainless steel and A6063-EX aluminum alloy vacuum chamber after filling with water*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **5** (1987), no. 2, 262–264.
- [22] L. de Csernatony, *The properties of Viton "A" elastomers: I. Determination of the sorption and air solubility characteristics of Viton "A" and their effect in vacuum applications of the material*, *Vacuum* **16** (1966), no. 1, 13–15.
- [23] N. Yoshimura, *Water vapor permeation through Viton O ring seals*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **7** (1989), no. 1, 110–112.
- [24] N. Yoshimura, *Vacuum Technology* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2008).
- [25] M. L. Johnson, D. M. Manos, and T. Provost, *Gas permeation and leakage through reusable seals*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **15** (1997), no. 3, 763–767.
- [26] L. W. McKeen (Ed.), *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* (Elsevier, Amsterdam, 2017).
- [27] K. Battes, C. Day, and V. Hauer, *Outgassing behavior of different high-temperature resistant polymers*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **36** (2018), no. 2, 021602.
- [28] R. N. Peacock, *Practical selection of elastomer materials for vacuum seals*, *J. Vac. Sci. Technol.* **17** (1980), no. 1, 330–336.
- [29] M. Sefa, and J. Setina, *Comparison of permeation of atmospheric gases through Viton O-ring gaskets for different initial conditions*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **35** (2017), no. 4, 041603.
- [30] L. de Csernatony, *The properties of Viton "A" elastomers II. The influence of permeation, diffusion and solubility of gases on the gas emission rate from an O-ring used as an atmospheric seal or high vacuum immersed*, *Vacuum* **16** (1966), no. 3, 129–134.
- [31] J. Šetina, M. Sefa, B. Erjavec, and D. Hudoklin, *Measurement and Modeling of Water-Vapor Diffusion in Elastomers with Impact in Humidity and Vacuum Measurements*, *Int. J. Thermophys.* **34** (2013), no. 3, 412–423.
- [32] P. Sturm, M. Leuenberger, C. Sirignano, R. E. M. Neubert, H. A. J. Meijer, R. Langenfelds, W. A. Brand, and Y. Tohjima, *Permeation of atmospheric gases through polymer O-rings used in flasks for air sampling*, *J. Geophys. Res. Atmospheres* **109** (2004), no. D4, D04309.
- [33] C. Ma, E. Shero, N. Verma, S. Gilbert, and F. Shadman, *Permeation of Moisture and Oxygen Through Polymeric O-Rings*, *J. IEST* **38** (1995), no. 2, 43–46.
- [34] P. Duval, *Pumping chlorinated gases in plasma etching*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **1** (1983), no. 2, 233–236.
- [35] B. Ling, H. He, and J. Shao, *Effects of water vapor in high vacuum chamber on the properties of HfO₂ films*, *Chin. Opt. Lett.* **5** (2007), no. 8, 487–489.
- [36] T. Zeng, M. Zhu, Y. Chai, C. Yin, N. Xu, K. Yi, Y. Wang, Y. Zhao, G. Hu, and J. Shao, *Effects of water adsorption on properties of electron-beam HfO₂/SiO₂ high-reflection coatings*, *Thin Solid Films* **697** (2020), 137826.
- [37] K. I. Johnson, and D. V. Keller, *Effect of Contamination on the Adhesion of Metallic Couples in Ultra-High Vacuum*, *J. Appl. Phys.* **38** (1967), no. 4, 1896–1904.
- [38] J. Andersson, R. A. Erck, and A. Erdemir, *Frictional behavior of diamondlike carbon films in vacuum and under varying water vapor pressure*, *Surf. Coat. Technol.* **163–164** (2003), 535–540.
- [39] B. Cho, S. Lee, and S. Chung, *Creation of extreme high vacuum with a turbomolecular pumping system: A baking approach*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** (1995), no. 4, 2228–2232.
- [40] L. D. Hinkle, *Effect of purge pressure on desorbing water removal rate*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** (2004), no. 4, 1799–1803.
- [41] A. Reisman, M. Berkenblit, and S. A. Chan, *Single-Cycle Gas Panel Assembly*, *IBM J. Res. Dev.* **22** (1978), no. 6, 596–600.
- [42] C. R. Meissner, *Liquid Nitrogen Cold Traps*, *Rev. Sci. Instrum.* **26** (1955), no. 3, 305–305.
- [43] D. Chen, and S. Hackwood, *Vacuum particle generation and the nucleation phenomena during pumpdown*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** (1990), no. 2, 933–940.
- [44] Y. Ye. Benjamin, Y. H. Liu, and D. Y. H. Pui, *Condensation-Induced Particle Formation during Vacuum Pump Down*, *J. Electrochem. Soc.* **140** (1993), no. 5, 1463–1468.
- [45] J. H. Kim, C. Asbach, S.-J. Yook, H. Fissan, K. J. Orvek, A. Ramamoorthy, P.-Y. Yan, and D. Y. H. Pui, *Protection schemes for critical surface in vacuum environments*, *J. Vac. Sci. Technol. A* **23** (2005), no. 5, 1319–1324.



Dieser Artikel steht unter der [CC BY 4.0-Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Sie dürfen teilen: das Material in jedwedem Format oder Medium vervielfältigen und weiterverbreiten und zwar für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Sie dürfen bearbeiten: das Material remixen, verändern und darauf aufbauen und zwar für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Der Lizenzgeber kann diese Freiheiten nicht widerrufen solange Sie sich an die Lizenzbedingungen halten. Sie müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben machen, einen Link zur Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders.