



WHITE PAPER

AluVaC®: Vollständig aus Aluminium gefertigte
CF-Vakuumkomponenten und -kammern
Teil 2 – DE

Ausgasraten von Aluminium im Vergleich zu Edelstahl



- Extrem geringe Ausgasraten:
Im Bereich von $1 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s/cm²
- Einfache Behandlungsmethoden:
Kein Wasserstoffarmglühen erforderlich
- Energieeffiziente Prozesse:
In-situ-Ausheizen bei 120 °C für 24 Stunden

2016-06, #WP00002 Rev. A

Ausgasraten von Aluminium im Vergleich zu Edelstahl

Zum Erreichen und Aufrechterhalten sehr niedriger Drücke im Bereich des Ultrahochvakuums (UHV, $p < 1 \cdot 10^{-07}$ mbar) und des Extremen Ultrahochvakuums (XHV, $p < 1 \cdot 10^{-11}$ mbar) ist eine äußerst geringe Ausgasung des Materials entscheidend. Zahlreiche Untersuchungen der letzten Jahrzehnte präsentieren Aluminiumwerkstoffe als ausgasarme und attraktive Alternative zu etablierten Edelstählen. Doch erst mit Entwicklung der AluVaC[®]-Produktserie sind Ausgasmessungen an vollständig aus Aluminium bestehenden, realen und einsatzbereiten Vakuumkammern und -komponenten für UHV-Anwendungen durchführbar. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen im Vergleich mit baugleichen Edelstahlreferenzen werden im Folgenden präsentiert. Teil der Untersuchungen sind neben gedrehten CF-Komponenten kleinerer Nennweiten auch komplett geschweißte Vakuumkammern mit Nennweiten von DN200CF.

Aluminium als Vakuumwerkstoff

Aluminium ist wegen seiner geringen Dichte ($2,7 \text{ g/cm}^3$) und der sehr guten Verarbeitbarkeit ein attraktiver Konstruktionswerkstoff. Daher ist die Verwendung von Aluminiumwerkstoffen im allgemeinen Maschinenbau, im Fahrzeugbau und in der Gebäudetechnik in den letzten Jahrzehnten stetig angestiegen.

Für Vakuumanwendungen bieten Aluminiumlegierungen weitere vorteilhafte Eigenschaften, wie beispielsweise eine sehr geringe magnetische Permeabilität ($\mu_r < 1,00005$) und eine geringe Strahlungsaktivierung.

Wenn es um Vakuumreinigung und energieeffiziente Prozesse für Anwendungen im UHV/XHV geht, wird die Ausgasrate eines Werkstoffes zum entscheidenden Auswahlkriterium. Um die Ausgaseigenschaften von Aluminium und Edelstahl im Vakuum zu bestimmen, wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Forschungsaktivitäten durchgeführt [1].

Da die veröffentlichten Ergebnisse jedoch mit verschiedensten Testparametern wie Legierungen, Behandlungsverfahren oder Messmethoden ermittelt wurden, erlauben sie keinen direkten Vergleich der Ausgasraten der beiden Werkstoffe. Hinzu kommt, dass bisher keine vollständig aus Aluminium bestehenden CF-Kammern oder CF-Komponenten verfügbar waren, um die Ausgasraten unter realistischen Bedingungen zu testen.

Materialanforderungen für UHV/XHV-Anwendungen

Abhängig von ihrer finalen Anwendung existieren für Werkstoffe zur Anwendung im UHV/XHV-Bereich verschiedene Anforderungen bezüglich chemischer Zusammensetzung, Gaspermeation und Ausgasverhalten. Spezifische Angaben können entsprechenden öffentlich einsehbaren Leitlinien oder Werksnormen entnommen werden [2,3,4].

Bei Ausgasmessungen im Vakuum wird prinzipiell zwischen in situ ausgeheizten und nicht

in situ ausgeheizten Systemen unterschieden. Unter in situ ausgeheizten Systemen versteht man solche, die nach dem Ausheizen unter Vakuum hermetisch abgeschlossen bleiben, d. h. die Kammerwände haben nach dem Ausheizen keinen Kontakt mehr zur Atmosphäre. Die Oberfläche ist dann bereits „freigeheizt“. In diesem Fall wird das Ausgasen durch Diffusion und Emission von Teilchen aus dem Grundwerkstoff heraus bestimmt. Bei Edelstählen ist dabei Wasserstoff der dominierende Gasanteil.

Im Gegensatz dazu werden bei nicht in situ ausgeheizten Systemen vorrangig die zuvor aus der Umgebung aufgenommenen und oberflächlich adsorbierten Teilchen wie Atmosphärenbestandteile oder Schmutz abgelöst. Die Restgasspektren werden demzufolge von diesen Adsorbaten dominiert, die Gesamtausgasraten liegen einige Größenordnungen über denen in situ ausgeheizter Systeme.

Ausgasraten von Aluminium und Edelstahl in der Literatur

In der Literatur finden sich zahlreiche Ergebnisse zu Ausgasmessungen an Aluminium- und Edelstahlwerkstoffen. Prüflinge, hergestellt aus unterschiedlichsten Legierungen, mit verschiedenen Fertigungstechnologien und Oberflächenbehandlungen, wurden mit verschiedenartigen Messmethoden und -apparaturen untersucht. Für in situ ausgeheizte, metallische Werkstoffe wurden Ausgasraten im Bereich von $10^{-12} \dots 10^{-14}$ mbar·l/s/cm² [5] gemessen. Die Zusammenfassung von Wong [1] gibt eine Übersicht über die wichtigsten veröffentlichten Ergebnisse zur Bestimmung von Vakuumausgasraten unterschiedlicher metallischer Werkstoffe.

Eine, den direkten Vergleich der beiden Werkstoffe Aluminium und Edelstahl beinhaltende Veröffentlichung, ist die von Young [6]. Er bestimmte die Ausgasraten zweier ähnlich gebauter, jeweils aus einem der beiden Werkstoffe bestehenden Behälter. Während der Edelstahlbehälter poliert und einem intensiven Ausheizprozess (250 °C für 30 h, danach 450 °C für 17 h) unterzogen wurde, erreichte der Behälter aus Aluminium eine vergleichbare Ausgasrate durch einfache Reinigung und deutlich kürzere Ausheizprozesse bei gleichzeitig geringerer Temperatur (250 °C). Für beide Behälter ergab sich eine flächenbezogene Ausgasrate von $4 \cdot 10^{-13}$ Torr·l/s/cm² (d. h. etwa $5 \cdot 10^{-13}$ mbar·l/s/cm²). Weiter reduzierte Ausgasraten können für Edelstahl durch Wasserstoffarmglühen bei rund 950 °C für mehrere Stunden erreicht werden. Hierbei wird die Wasserstoffkonzentration im Grundmaterial durch Diffusionsprozesse herabgesetzt. Die damit erreichte, nach Wong [1] geringste Ausgasrate eines geglühten Edelstahlbauteils nach In-situ-Ausheizen beträgt $1,6 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s/cm².

Die vielen Ergebnisse machen vor allem deutlich, dass sich gemessene Ausgasraten trotz gleicher verwendeter Werkstoffe um mehrere Größenordnungen unterscheiden können. Folglich hängen die Ausgasraten stark von der Art und Form der Prüflinge, den Behandlungen der Oberfläche und den verwendeten Messmethoden und Versuchsaufbauten ab. Die in der Literatur aufgeführten Werte können somit nur eine Orientierung geben, nicht aber als allgemeingültige Berechnungsgrundlage für artverschiedene Systeme verwendet werden. Stattdessen ist für jedes System eine individuelle Bestimmung des Ausgasverhaltens erforderlich.

Besondere Aufmerksamkeit ist außerdem geboten, wenn die Druckmessung mit einem gasartabhängigen Sensor wie beispielsweise einem Bayard-Alpert-Sensor erfolgt. Hier muss bei der Berechnung der Ausgasrate auch die Zusammensetzung des Restgases beachtet werden.

Methoden zur Bestimmung der Ausgasraten im Vakuum

Zur vergleichenden Bestimmung der Ausgasraten von Aluminium mit herkömmlich eingesetzten Edelstählen wurden für drei unterschiedliche Messmethoden jeweils baugleiche Prüflinge aus den beiden Werkstoffen untersucht. Vor der Ausgasmessung durchliefen alle Prüflinge die im Unternehmen standardisierten Reinigungs- und Behandlungsprozesse unter Reinraumbedingungen. Die Ausgasrate von nicht in situ ausgeheizten Bauteilen wurde mittels Restgasanalyse (RGA) in (1) Gasdurchsatzmethode bei Raumtemperatur ermittelt. Die (2) Akkumulationsmethode und (3) Druckanstiegsmethode wurden eingesetzt, um die Ausgasraten von in situ ausgeheizten Bauteilen zu messen. Die Messmethoden (1) und (2) liefern Aussagen über die Prozessqualität und die Eigenschaften der Grundwerkstoffe. Bei der (3) Druckanstiegsmethode hingegen wird

das Ausgasverhalten einer einsatzbereiten, vollständig aus Aluminium gefertigten UHV-Kammer, mit Schweißnähten und mehreren blindgeflanschten CF-Anschlüssen, untersucht. Am verwendeten Messaufbau konnte neben der Bestimmung des Totaldrucks auch die Zusammensetzung des Restgases ermittelt werden.

(1) Gasdurchsatzmethode

Bei der Gasdurchsatzmethode wird das Prinzip der vakuuminduzierten Desorption von Molekülen von der Werkstoffoberfläche genutzt. Für einige Stunden werden dazu Bauteile in einer Vakuumkammer platziert, welche durchgängig mit einem konstanten Saugvermögen gepumpt wird. Dieser Aufbau ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Die Ausgasrate der Bauteile wird bei Raumtemperatur durch Messung des Totaldrucks p in der Vakuumkammer bestimmt. Bei konstantem Saugvermögen und bekannter Probenoberfläche A ergibt sich die Gesamtausgasrate q_A pro Oberfläche zu:

$$q_A = p \cdot \frac{S}{A}$$

Zur Ermittlung der Zusammensetzung des Restgases bzw. der entsprechenden Partialdrücke werden während der Messung periodisch Massenspektren aufgenommen. Um die desorbierten Gasanteile der Messapparatur selbst zu eliminieren, wird zu jeder Messung eine Leermessung (oft Hintergrundmessung genannt) durchgeführt. Dieses Spektrum wird dann von der Gesamtmessung (Kammer mit Probe bestückt) abgezogen. Das bei dieser Methode entstehende Restgas ist in der Regel von oberflächlich

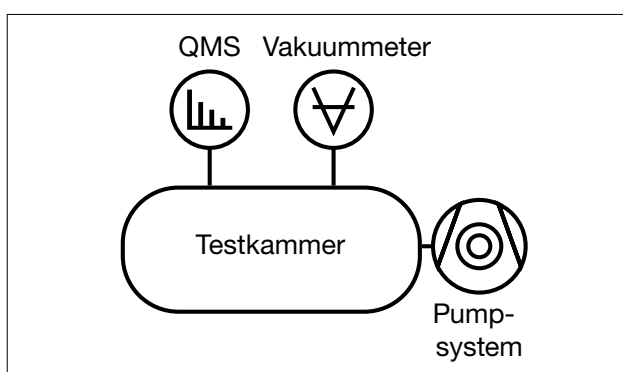


Abbildung 1: Messaufbau der Gasdurchsatzmethode.

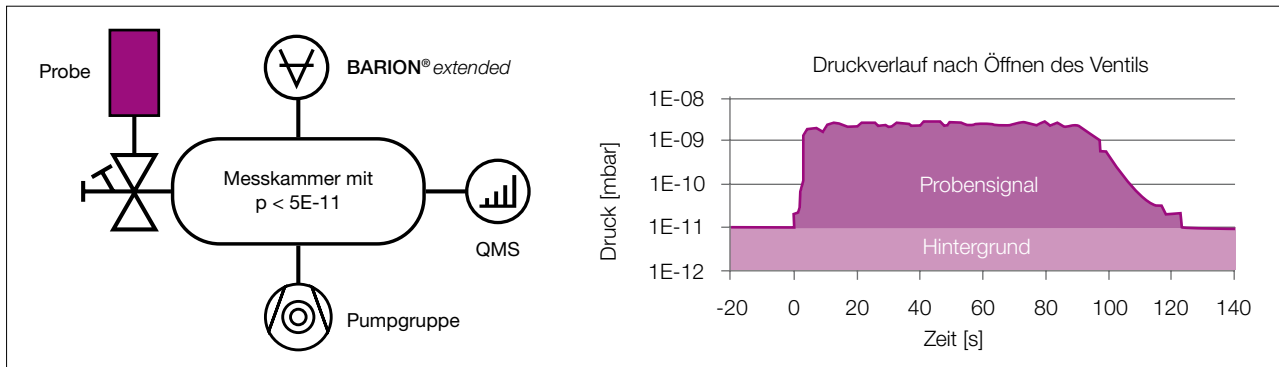


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Akkumulationsmessung (links) und exemplarischer Druckverlauf nach Öffnen des Ventils zwischen Probe und Messkammer (rechts).

adsorbierten Teilchen wie Wasser und Kohlenwasserstoffen dominiert. Die im Massenspektrum detektierten genauen Anteile des Restgases geben Aufschluss über Vorbehandlung und Lagerungsbedingungen der Bauteile. Alle untersuchten Bauteile durchliefen vor der Restgasanalyse die bei VACOM standardisierten Reinigungsprozesse.

(2) Akkumulationsmethode

Zur Bestimmung sehr kleiner Ausgasraten von Proben mit kleiner Oberfläche nutzt man die sogenannte Akkumulationsmethode. Der Versuchsaufbau (dargestellt in Abb. 2, links) besteht aus einer Testkammer, ausgestattet mit einem Totaldruckmessgerät (BARION® extended), einem Quadrupol-Massenspektrometer und einer Pumpgruppe mit bekanntem Saugvermögen S . Der Druck in der Testkammer liegt im Bereich $p < 5 \cdot 10^{-11}$ mbar. Über ein Ventil kann der Prüfling mit der Testkammer verbunden oder von ihr hermetisch abgetrennt werden. Wird das Ventil zur Testkammer nach dem In-situ-Ausheizen der Probe und der sich anschließenden Akkumulationszeit t_{ac} geöffnet, steigt der Druck p in der Testkammer durch das einströmende Gas solange an, bis ein Druckausgleich erreicht ist (dargestellt

in Abb. 2, rechts). Durch Integration des Drucks über die Zeit erhöhten Druckes ($t_{end} - t_i$) in der Testkammer erhält man die flächenbezogene Ausgasrate q_A des Prüflings durch:

$$q_A = \frac{S}{t_{ac} \cdot A} \int_{t_i}^{t_{end}} p(t) dt$$

Kleine rohrartige, aus Vollmaterial gedrehte CF-Komponenten mit einer Probenoberfläche A von etwa 130 cm^2 und einem inneren Volumen V von etwa $0,1 \text{ l}$ dienten als Prüflinge. Diese wurden jeweils aus Aluminium (6000er Serie) oder aus Edelstahl (316L) gefertigt und unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen unterzogen. Das In-situ-Ausheizen wurde jeweils für 24 h bei 120 °C für Aluminium beziehungsweise bei 200 °C für Edelstahl durchgeführt.

(3) Druckanstiegsmethode

Bei der Druckanstiegsmethode wird die totale Ausgasrate Q einer abgeschlossenen Prüfkammer mit Volumen V durch Messung des Druckanstiegs Δp in einer definierten Zeitspanne Δt bestimmt:

$$Q = \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta t}$$

Mit bekannter Innenoberfläche A der Prüfkammer kann die flächenbezogene Ausgasrate q_A der Kammer bestimmt werden durch:

$$q_A = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \frac{V}{A}$$

Die Prüfkammern werden in situ ausgeheizt, auf Raumtemperatur abgekühlt und vom Pumpsystem getrennt. Dann wird der Druckverlauf innerhalb der Kammer aufgezeichnet.

Für diesen Versuch wurden zwei baugleiche CF-Zylinderkammern (dargestellt in Abb. 3), eine vollständig aus 6000er Aluminiumlegierungen (Abb. 3, links), die andere aus Edelstahl 316L bestehend (Abb. 3, rechts), jeweils bei 120 °C für 24 h in situ ausgeheizt. Um die Werte der hier untersuchten Edelstahlkammer auch mit denen, bei üblichen Temperaturen ausgeheizten Edelstählen vergleichen zu können, wurde die Ausgasrate für diese zusätzlich nach In-situ-Ausheizen bei 200 °C für 24 h bestimmt.

Experimentelle Ermittlung der Ausgasraten im Vakuum

(1) Gasdurchsatzmethode (ohne In-situ-Ausheizen)

Mit Hilfe der Restgasanalyse (RGA) wurden die Ausgasraten von nicht in situ ausgeheizten Bauteilen gemessen und massenspekttral ausgewertet. Ein solches Massenspektrum ist exemplarisch in Abb. 4 dargestellt. Die Messungen zeigen ein sehr einheitliches Bild: Im Allgemeinen dominiert Wasser (Spitze bei Masse $m/z = 18$) das Restgas um mehr als eine Größenordnung. Der Anteil aller Massen

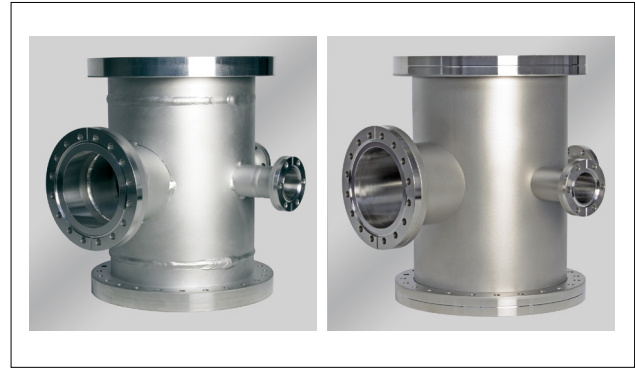


Abbildung 3: CF-Kammern aus 6000er Aluminium (links) und Edelstahl 316L (rechts) für vergleichende Ausgasmessung mittels Druckanstiegsmethode.

$m/z > 45$ (nicht-atmosphärische Bestandteile) bleibt dabei unter 1 % des Gesamtdrucks. Dies zeugt vor allem von einer extrem hohen Oberflächenreinheit der Proben und ist damit ein Nachweis für die sehr gute Qualität der Reinigungsprozedur, die alle Proben vor der Messung durchlaufen haben.

Der Vergleich der Gesamtausgasraten zeigt typische kleine Unterschiede zwischen Aluminium und Edelstahl. Entscheidend für das Ergebnis ist aber weniger der Werkstoff selbst als vielmehr die Ausprägung der Oberflächenschicht, die insbesondere von den vorgelagerten Lagerungs- und Reinigungsbedingungen der Bauteile abhängt.

Die Untersuchungen zeigen: Nach Durchlaufen unserer VACOM-Reinigungsprozesse erreichen Edelstahl- und Aluminiumbauteile standardmäßig Gesamtausgasraten im Bereich $< 2 \cdot 10^{-9} \text{ mbar} \cdot \text{l/s/cm}^2$ (nach VACOM® Vacuum Class HV1) bzw. $< 5 \cdot 10^{-10} \text{ mbar} \cdot \text{l/s/cm}^2$ (nach VACOM® Vacuum Class HV2). Dies gilt für nicht in situ ausgeheizte Bauteile ohne zusätzliche Oberflächenbehandlungen. Eine vollständige Übersicht zu den VACOM® Vacuum Classes gibt das [Produktinformationsblatt „Vakuumkomponenten mit garantierten Ausgasraten“](#).

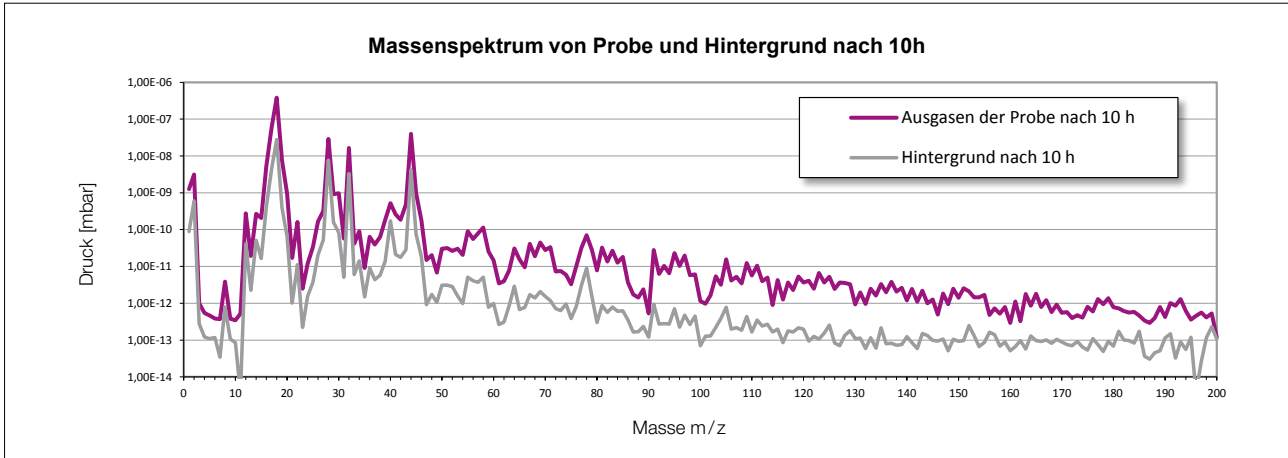


Abbildung 4: Exemplarisches Massenspektrum des Restgases aufgenommen in Durchsatzmethode nach einer Messdauer von 10 h: Probe (violett) und Hintergrundmessung der Testkammer (grau).

(2) Akkumulationsmethode (nach In-situ-Ausheizen)

Mit Hilfe der Akkumulationsmethode wurden CF-Komponenten aus Aluminium und Edelstahl im in situ ausgeheizten Zustand hinsichtlich ihrer Ausgasraten untersucht. Abb. 5 zeigt repräsentative Druckverläufe einer Edelstahlprobe (316L, nicht wasserstoffarmgeglüht) und einer Aluminiumprobe (6000er Legierung).

Die aus den Druckverläufen ermittelten Ausgasraten für Edelstahl bestätigen die in der Literatur aufgeführten Werte. Sie liegen unter $1 \cdot 10^{-12}$ mbar·l/s/cm² für ungeglühte Edelstahlbauteile. Mit Ausnahme des Wasserstoffarmglühens, durch welches

Ausgasraten unterhalb von $1 \cdot 10^{-13}$ mbar·l/s/cm² erreicht wurden, zeigten die verschiedenen Oberflächenbehandlungen bei Edelstahl keinen signifikanten Einfluss auf die Ausgasrate.

Für alle mittels Akkumulationsmethode untersuchten Aluminiumproben ergaben sich Ausgasraten deutlich unterhalb $2 \cdot 10^{-12}$ mbar·l/s/cm². Im Rahmen der Untersuchungen wurde zudem ein spezieller Prozess gefunden und verifiziert, welcher Aluminiumbauteile mit sehr niedrigen Ausgasraten hervorbringt. Damit konnten Ausgasraten von weniger als $6 \cdot 10^{-15}$ mbar·l/s/cm², im besten Fall sogar im Bereich von $1 \cdot 10^{-15}$ mbar·l/s/cm² erreicht werden. Folglich ist festzuhalten, dass Aluminiumbauteile,

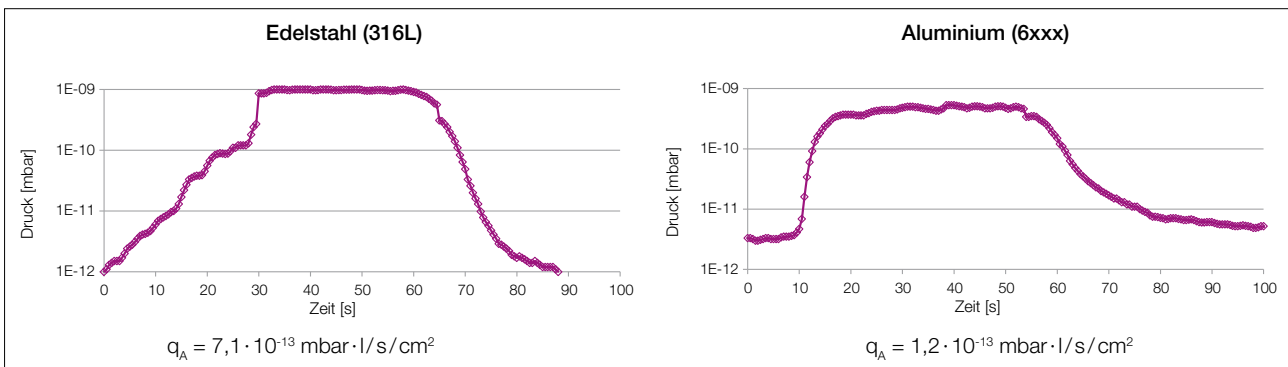


Abbildung 5: Repräsentative Druckverläufe bei der Akkumulationsmessung von Edelstahl 316L, ungeglüht (links) und 6000er Aluminium (rechts) mit daraus ermittelter Ausgasrate von $7,1 \cdot 10^{-13}$ mbar·l/s/cm² bzw. $1,2 \cdot 10^{-13}$ mbar·l/s/cm².

die mit geeigneter Prozessführung hergestellt werden, Ausgasraten im Bereich wasserstoffarmgeglühter Edelstahlbauteile oder sogar deutlich darunter besitzen.

(3) Druckanstiegsmethode (nach In-situ-Ausheizen)

Abb. 6 zeigt die gemessenen Druckverläufe der getesteten Kammern. Jeder Graph repräsentiert eine einzelne Messung. Der Anstieg der Graphen ist ein Maß für die Ausgasrate der Kammern – je flacher der Anstieg, desto geringer die Ausgasrate. Die genauen ermittelten Werte zu jeder Messung sind in Tab. 1 gelistet.

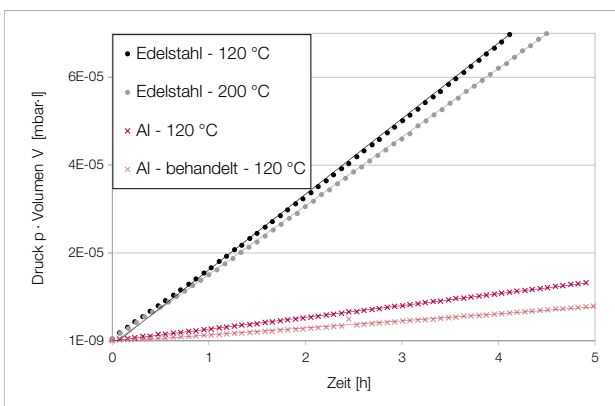


Abbildung 6: Druckanstiege in abgeschlossener, in situ ausgeheizter Kammer aus Edelstahl 316L (obere Graphen) und 6000er Aluminium (untere Graphen). Ein flacher Anstieg repräsentiert eine geringe Ausgasung aus dem Material.

Kammer	In-situ-Ausheizen	Ausgasrate q_A [mbar·l/(s·cm ²)]
Edelstahl 316L	24 h bei 120 °C	$1,2 \cdot 10^{-12}$
	24 h bei 200 °C	$1,0 \cdot 10^{-12}$
Aluminium 6000er	24 h bei 120 °C	$8,6 \cdot 10^{-14}$
Aluminium 6000er, behandelt	24 h bei 120 °C	$1,5 \cdot 10^{-14}$

Tabelle 1: Aus Druckanstiegen bei Raumtemperatur ermittelte Ausgasraten der zuvor in situ ausgeheizten abgeschlossenen Testkammern.

Druckverläufe und ermittelte Werte beweisen: Die Vakuumkammern aus Aluminium besitzen deutlich geringere Ausgasraten als die baugleichen Kammern aus Edelstahl. Die kleinste an den UHV-Kammern gemessene Ausgasrate von $1,5 \cdot 10^{-14}$ mbar·l/s/cm² wurde für eine Aluminiumkammer gemessen, die einem speziellen Prozess unterzogen wurde. Die Ausgasraten der Edelstahlkammern lagen grundsätzlich um mehr als eine Größenordnung über denen der Aluminiumkammern. Auch das Erhöhen der Ausheiztemperatur von 120 °C auf die für Edelstahl üblichen 200 °C änderte daran nichts.

Die massenspektralen Aufnahmen ergeben: Das in der Edelstahlkammer verbleibende Restgas ist wie erwartet von Wasserstoff dominiert. Für Aluminium zeigen sich im Spektrum neben Wasserstoff auch signifikante Spitzen bei den Massen $m/z = 12, 16, 28$ und 44 .

Fazit

Mit drei Methoden wurden die Ausgasraten verschiedener Vakuumbauteile aus Aluminium- und Edelstahl mit unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen bestimmt.

Die Analysen mittels Gasdurchsatzmethode zeigen: Für nicht in situ ausgeheizte Vakuumkomponenten aus Aluminium oder Edelstahl können mit den standardisierten VACOM-Reinigungsprozessen garantierte Ausgasraten von weniger als $2 \cdot 10^{-9}$ mbar·l/s/cm² (nach VACOM® Vacuum Class HV1) bzw. weniger als $5 \cdot 10^{-10}$ mbar·l/s/cm² (nach VACOM® Vacuum Class HV2) erreicht werden. In den Versuchen zur Ausgasmessung von in situ ausgeheizten Komponenten und Kammern ergaben sich für Aluminium deutlich

geringere Ausgasraten als für die jeweiligen Referenzen aus Edelstahl. Die erzielten Werte lagen dabei um mehr als eine Größenordnung unter den Edelstahlvergleichswerten.

Damit wird deutlich: Aluminiumlegierungen sind durch ihre extrem niedrige Ausgasrate hervorragend für die Verwendung im UHV und XHV geeignet. Besonders hervorzuheben ist dabei die Tatsache, dass die extrem niedrigen Ausgasraten hierbei erstmals an realen und sofort einsatzfähigen AluVaC[®]-Kammern und AluVaC[®]-Komponenten überprüft und verifiziert werden konnten.

Die außergewöhnlich geringen Ausgasraten dieser bieten dem Nutzer wesentliche Vorteile: Pumpzeiten werden drastisch reduziert und einmal erreichte UHV-Bedingungen können mit einem deutlich geringeren Zeit- und Energieaufwand aufrechterhalten werden. Da Aluminium bei Temperaturen von nur 120 °C in situ

ausgeheizt wird und zur Erreichung niedrigster Ausgasraten kein Wasserstoffarmglühen nötig ist, kann auch beträchtlich an Heizenergie gespart werden. Kurzum, durch die Verwendung von AluVaC[®]-Kammern und AluVaC[®]-Komponenten in UHV-Systemen können Nutzer eine erhebliche Menge an Zeit, Energie und Kosten einsparen.

HINWEIS:

Durch die bei Entwicklung und Herstellung gewonnene Erfahrung und die durch zahlreiche Untersuchungen erlangten Erkenntnisse zum Ausgasverhalten verschiedener Werkstoffe, konnte VACOM die Ausgasraten hausintern hergestellter Bauteile aus Aluminium und Edelstahl standardisieren:

Mit den daraus entstandenen **VACOM[®] Vacuum Classes** kann jeder Nutzer für seine Anforderungen und Vakuumbedingungen das am besten geeignete Produkt auswählen.

Literaturangaben

- [1] Wong, http://home.fnal.gov/~mlwong/outgas_rev.htm (2002)
- [2] http://photon-science.desy.de/sites/site_photonscience/content/e58/e176720/e177229/e177918/e265554/e265560/Vakuum_005_DESY_UHV_Richtlinien_1-5_final_stamp_eng.pdf
- [3] [http://indico.gsi.de/getFile.py/access?resId=20&materialId=0&confId=1420_Technical_Guideline_Testing the Cleanliness of Cryostat Insulation Vacuum Components](http://indico.gsi.de/getFile.py/access?resId=20&materialId=0&confId=1420_Technical_Guideline_Testing_the_Cleanliness_of_Cryostat_Insulation_Vacuum_Components) (2011)
- [4] <http://cds.cern.ch/record/1047073/files/p321.pdf> M. Taborelli_CERN_Cleaning and surface properties (2007)
- [5] Jousten, K.: Wutz Handbuch Vakuumtechnologie, 10. überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg u. Teubner, 2010
- [6] J.R. Young: Outgassing characteristics of stainless steel and aluminum with different surface treatments, J Vac Sci Tech 6(3), 1969, pp. 398-400

„AluVaC[®]: Vollständig aus Aluminium gefertigte CF-Vakuumkomponenten und -kammern“

Interessieren Sie sich für weitere Informationen zum Thema?

Kontaktieren Sie uns mit dem Betreff „White Paper, WP00002“ unter info@vacom.de oder finden Sie auf unserer Website www.vacom.de unter der Rubrik „Downloads“ alle verfügbaren White Paper.