



DIE AUSSAGEKRAFT VON ABPUMPKURVEN

Prozesse verschiedener Vakuumbereiche abbilden und interpretieren

Abpumpkurven sind bei der Auslegung und dem Betrieb von Vakuumsystemen ein beliebtes Kontrollinstrument. Mit ihrer Hilfe können Probleme im Vakuumsystem abgeleitet sowie die korrekte Pumpenleistung beurteilt werden.

Eine Abpumpkurve beschreibt den zeitabhängigen Druckabfall in einer Vakuumanlage. In einer grafischen Darstellung wird auf der X-Achse die Zeit und auf der Y-Achse der Druck abgetragen. Bei bekannter Geometrie des Vakuumbehälters und bei bekannten Pumpen kann man eine Abpumpkurve berechnen. Eventuelle Abweichungen zwischen der berechneten und der gemessenen Abpumpkurve geben oft Aufschlüsse über Probleme im Vakuumsystem. Dies gilt auch für den Vergleich von im Langzeitbetrieb gemessenen Kurven mit einer Referenzkurve.

Abpumpkurven im Grobvakuum: Abbildung von Verbindungen, Interpretation und Nutzung

Eine Referenzkurve kann gemessen werden, wenn die Anlage nach erfolgter Inbetriebnahme funktionsgerecht und einwandfrei läuft. In diesem Zustand wird beim Abpumpen der Druckabfall über die Zeit gemessen. Die Messung kann entweder manuell, über eine Anlagensteuerung oder die Softwarepakete für Druckmessgeräte von Pfeiffer Vacuum erfolgen.

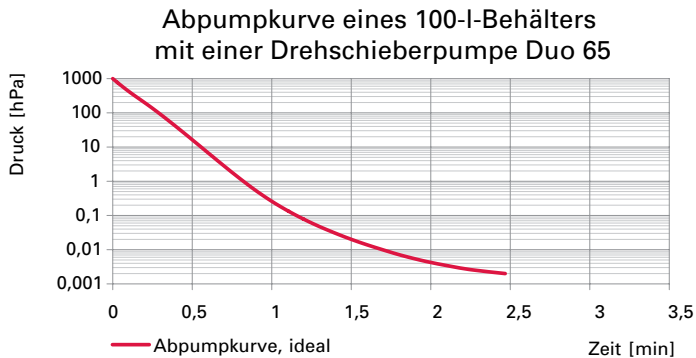


Abbildung 1: Abpumpkurve eines 100-l-Behälters mit einer Drehschieberpumpe Duo 65

Das Beispiel in Abbildung 1 zeigt die berechnete Abpumpkurve eines 100-Liter-Behälters. Als Vakuumpumpe wurde eine Drehschieberpumpe Duo 65 eingesetzt. Diese Kurve soll als Vergleichsstandard dienen. In Abbildung 1 wird suggeriert, dass die Pumpe direkt mit der Kammer verbunden ist.

Abbildung 2 zeigt den Einfluss eines flexiblen Wellenschlauchs als Verbindung zwischen Behälter und Pumpe auf das Abpumpverhalten. Der Schlauch hat eine Länge von 1000 mm und einen Durchmesser von 40 mm.

Bis zu einem Druck von rund 1 hPa hat die Verbindungsleitung fast keinen Einfluss auf die Abpumpdauer. Soll der Behälter aber weiter bis auf 0,01 hPa evakuiert werden, dauert der Abpumpvorgang wegen des Einflusses der Leitung bereits rund 20 % länger. Abhilfe schafft hier eine Verkürzung des Verbindungsstücks oder eine Vergrößerung des Leitungsdurchmessers.

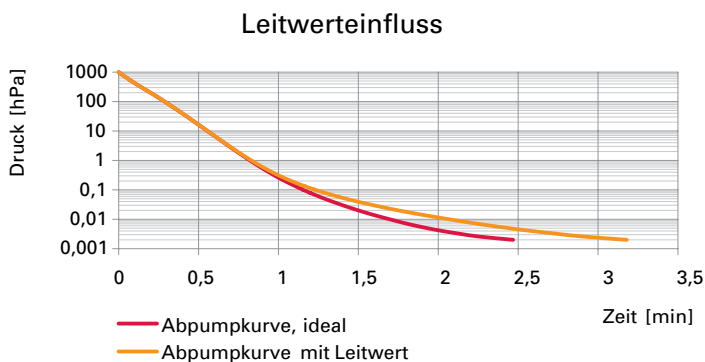


Abbildung 2: Leitwerteeinfluss

Da der Strömungswiderstand linear von der Länge, aber in der 3. oder 4. Potenz vom Durchmesser abhängt, ist im Zweifelsfall eine Vergrößerung des Durchmessers als korrektive Maßnahme vorzuziehen. In diesem Fall zeigt der Vergleich zwischen den beiden Kurven die Einflüsse der Leitung und kann bei der Auslegung der Verbindung zwischen Behälter und Pumpe helfen.

Abpumpkurve zeigt Wirkung verschiedener Einflussfaktoren

Der Betrieb der Vakuumanlage kann von verschiedensten Faktoren teils drastisch beeinflusst werden:

■ Einfluss von Wasser

Der vorher erreichte Basisdruck wird aufgrund des Wasserdampfs um mehr als einen Faktor 100 verfehlt und die Zeitskala scheint ins Unendliche verlängert. Dieses Beispiel einer gemessenen Kurve stammt aus einer existierenden Beschichtungsanlage. Mit der Zeit wurden die Werkstückträger der zu beschichtenden Teile während des Prozesses ebenfalls mitbeschichtet – aber nicht mit einer dichten, gut haftenden Schicht wie die Werkstücke, sondern mit einer lockeren, blättereigähnlichen Struktur. Die locker übereinanderliegenden Schichten neigen zur Abgabe von Flittern und bilden so eine große Oberfläche. Auf dieser über einen längeren Zeitraum gewachsenen Oberfläche können sich nun große Mengen an Wasserdampf anlagern, die mit bloßem Auge nicht erkannt werden können. Der Zeitbedarf für das Abpumpen wird nicht schlagartig höher, sondern steigt schleichend im Betrieb über einen längeren Zeitraum.

Der erste Schritt beim Abpumpen von Wasserdampf aus Vakuumbehältern besteht aus einer langsamen Desorption des an den inneren Oberflächen der Vakuumkammer anhaftenden Wasserfilms. Dieser von der Oberfläche bestimmte Vorgang ist deutlich langsamer als das Abpumpen eines Gases oder Dampfes in der Gasphase. In Abbildung 3 ist das Abknicken der Abpumpkurve im Bereich zwischen

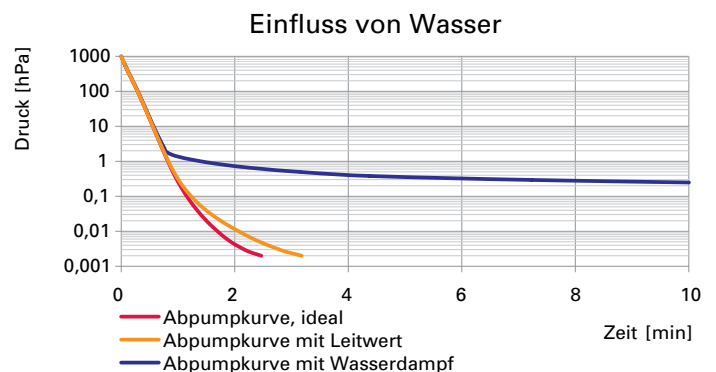


Abbildung 3: Einfluss von Wasser

10 und 1 hPa typisch für eine Wasserdampf-Adsorbat-schicht auf einer Oberfläche des Vakuumbehälters oder von Einbauten. Dieser Wert kann sich je nach Dampfdruck des Mediums oder auch nach Zugänglichkeit der Oberfläche ändern.

■ Einfluss von Alkohol

Wird eine Vakuumanlage mit einem leicht flüchtigen Alkohol wie Isopropanol gereinigt, verdampft dieser Alkohol schnell. Das Verdampfen geschieht schneller als das Abpumpen und es wird kein Abknicken in der Abpumpkurve wie bei Wassereintrag in Abbildung 3 beobachtet.

■ Einfluss von Ölen und Betriebsmittel

Öle und Betriebsmittel aus Vorvakuumpumpen können einen deutlichen Einfluss haben und einen Buckel der Abpumpkurve bei einem niedrigeren Druck als in unserem Beispiel erzeugen. Dies gilt auch für die Desorption von Wasserdampf, der von keiner freien Oberfläche sondern zum Beispiel aus einer Wicklung kommt.

■ Einfluss von Folien zur thermischen Isolierung

In Abbildung 5 ist die Auswirkung des Einsatzes einer Folie zur thermischen Isolierung im Inneren der Vakuumkammer gezeigt.

Das desorbierende Medium ist wiederum Wasserdampf, aber durch die festere Bindung an die Oberfläche und das langsame Entweichen aus einer Folienwicklung erscheint das Wassersignal erst bei einem niedrigeren Druck. Die Zugabe von in diesem Beispiel gerade mal 10 cm² Isolationsfolie führt zu einer Verlängerung der Abpumpzeit bis zum Basisdruck um 75 %. Neben Isolationsfolien können auch Kabelummantelungen oder andere Kunststoffe im Vakuum ähnliche Effekte zeigen.

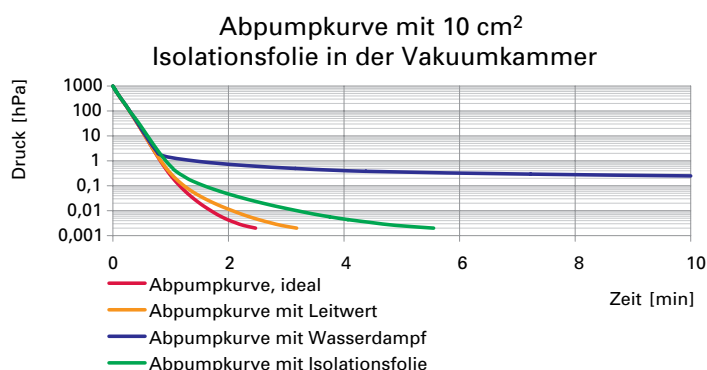


Abbildung 5: Abpumpkurve mit 10 cm Isolationsfolie in der Vakuumkammer



Abbildung 4: Öle und Betriebsmittel aus Vorpumpen können Einfluss auf die Abpumpkurven haben

■ Abpumpkurven im Hochvakuumbereich

Auch wenn Vakuum als luftleerer Raum definiert ist, bedeutet das nicht, dass in Hochvakuumanlagen keine Gase mehr vorhanden sind. Auch im Hochvakuum kann Wasserdampf – wie im obigen Beispiel – den erreichbaren Basisdruck einer Anlage stark beeinflussen. Wasser kann dabei von den Oberflächen der Vakuumkammer ausgasen. Dabei hängt die Gasabgabe stark von den Materialien der Oberflächen ab – zum Beispiel Metalle, Gläser oder Kunststoffe. Neben dem Material kann auch die Beschaffenheit der Oberfläche großen Einfluss auf die Gasabgaberate haben.

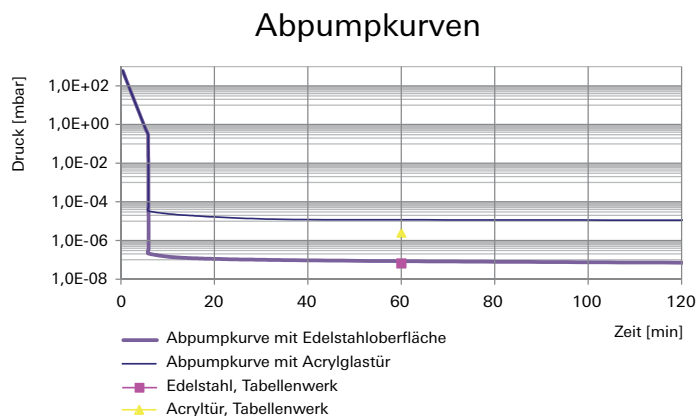


Abbildung 6: Abpumpkurve eines Behälters mit 500 mm Kantenlänge; Pumpsystem: Vorpumpe und HiPace 300

■ Einfluss von verschiedenen Materialien im Hochvakuumbereich

Als Beispiel dient hier eine kubische Standardkammer vom Typ KBH aus dem Portfolio von Pfeiffer Vacuum. Die mittlere Kammergröße hat eine Kantenlänge von 500 mm. Dies entspricht bei würfelförmiger Geometrie einer Oberfläche von 15.000 cm². Auf dieser Oberfläche ist ein Gasvorrat adsorbiert, der langsam von der Oberfläche abgegeben wird. Diese Gasabgabe findet wesentlich langsamer statt als das Abpumpen von frei im Raum vorhandenem Gas. Daten für die Gasabgaberate von Oberflächen findet man in Tabellenanhängen von vakuumtechnischen Lehrbüchern. Für das Kammermaterial (Edelstahl 1.4301 oder SS 304) wird für die flächenbezogene Gasabgaberate ein Wert von rund $1,3 \cdot 10^{-9}$ mbar·l·s⁻¹·cm⁻² angegeben. Diese etwas sperrige Einheit setzt also einen Gasstrom in mbar·l·s⁻¹ in Beziehung zu einer Fläche in cm². Multipliziert man den Wert für die flächenbezogene Gasabgaberate mit der Fläche unserer Kammer, ergibt sich eine Gaslast von $1,95 \cdot 10^{-5}$ mbar·l·s⁻¹.

Beim Evakuieren der Kammer mit einer Turbopumpe vom Typ HiPace 300 mit einem Saugvermögen von 300 l/s wird theoretisch ein Basisdruck von $6,5 \cdot 10^{-8}$ mbar erreicht. Daten in Tabellenwerken sind meist nach einer Stunde Pumpzeit gemessen. Daher dauert es eine Stunde, um den angegebenen Druck zu erreichen. Durch längeres Pumpen oder Ausheizen des Behälters kann man die Gasabgabe reduzieren.

Unterschiedliche Werte bei Edelstahl und Acryl

Mit einer Edelstahltür können die Vorgänge in der Kammer nicht beobachtet werden. Der Austausch einer Edelstahltür gegen eine durchsichtige Acrylglastür verändert jedoch Material und Oberfläche der Tür und damit den Desorptionsgasstrom. In Tabellenwerken ist die flächenbezogene Desorptionsrate von Acrylglas mit Werten von rund $300 \cdot 10^{-9}$ mbar·l·s⁻¹·cm⁻² angegeben.

Wird also 1/6 der Edelstahloberfläche durch die Acryltür ersetzt, erhält man einen Desorptionsgasstrom von insgesamt $7,66 \cdot 10^{-4}$ mbar·l·s⁻¹ und damit einen Basisdruck von $2,55 \cdot 10^{-6}$ mbar. Die Beobachtungsmöglichkeit durch die transparente Tür bedeutet also einen höheren erreichbaren Basisdruck, eine verminderte thermische Stabilität der Materialien und reduzierte Ausheizbarkeit. Einen Vergleich der Abpumpkurven der identischen Kammer mit Edelstahltür und Acrylglastür zeigt Abbildung 5. Neben den Datenpunkten, die jeder Anwender aus öffentlich zugänglichen Tabellen nach einer Stunde manuell berechnen kann, sind komplette Abpumpkurven mit einem kommerziell erhältlichen Simulationsprogramm dargestellt.

Aufnahme einer Referenzkurve sowohl im Grob- als auch im Hochvakuum

Je nach Herkunft der tabellarischen Daten ergeben sich manchmal gute Übereinstimmungen. In der Literatur ist jedoch eine Spannbreite von mehr als drei Dekaden für den Werkstoff Edelstahl publiziert. Die große Variation ist bedingt durch unterschiedliche Legierungen, Vorbehandlungen, Oberflächenveredelung und Ausheizen.

Bei der Acrylglastür sind im vorliegenden Modell deutliche Abweichungen von Literaturwerten erkennbar. Daher ist es ratsam, Skalierungen oder auch die Auswahl neuer Pumpen auf Basis gemessener Daten durchzuführen. Sowohl im Grob- als auch im Hochvakuumbereich ist also die Aufnahme einer Referenzkurve empfehlenswert. Als Faustregel kann man festhalten, dass die Entgasungsrate von Metallen vergleichsweise niedrig ist und Kunststoffe wesentlich höhere Beiträge zum Gesamtgasstrom leisten. Ausnahmen von dieser Regel sind beispielsweise das Metall Zink oder Messinglegierungen, die ebenfalls sehr hohe Entgasungsraten aufweisen. Die Gasabgaberraten von Elastomeren können durch chemische Zusammensetzung und Zusatzstoffe beeinflusst werden. Mechanische oder thermische Vorbehandlung kann die Gasabgaberrate drastisch reduzieren. Die Investition in vakuumtaugliche Materialien lohnt sich also.

Vor Pumpenauswahl: Analyse der Abpumpkurven

Bevor in neue Pumpen oder Vakuumkammern investiert wird, sollte auf jeden Fall die Abpumpkurve analysiert werden. Abweichungen zwischen einer Referenzkurve und einer gemessenen Kurve lassen das Erkennen von Störungen oft auf einen Blick zu. Die detaillierte Analyse einer Abpumpkurve verbessert das Verständnis für die ablaufenden Prozesse und bietet Ansätze für Problemlösungen.

Bei Eintrag von Feuchtigkeit in das System ist eine externe Trocknung von eingebrachten Komponenten oder eine Reinigung der Vakuumkammer oft besser für das Erreichen der Zielvorgaben zur Abpumpzeit geeignet als die Investition in größere Pumpen. Speziell die Oberflächenbehandlung des Behälters ist im Hochvakuum einer der wichtigsten Parameter für den erreichbaren Enddruck.



Pfeiffer Vacuum bietet mit seinem breiten Produktportfolio die optimale Lösung für unterschiedlichste Vakuumbereiche und -anwendungen.

VAKUMLÖSUNGEN AUS EINER HAND

Pfeiffer Vacuum steht weltweit für innovative und individuelle Vakuumlösungen, für technologische Perfektion, kompetente Beratung und zuverlässigen Service.

KOMPLETTES PRODUKTSORTIMENT

Vom einzelnen Bauteil bis hin zum komplexen System:

Wir verfügen als einziger Anbieter von Vakuumtechnik über ein komplettes Produktsortiment.

KOMPETENZ IN THEORIE UND PRAXIS

Nutzen Sie unser Know-how und unsere Schulungsangebote!

Wir unterstützen Sie bei der Anlagenplanung und bieten erstklassigen Vor-Ort-Service weltweit.

Sie suchen eine perfekte
Vakuumlösung?
Sprechen Sie uns an:

Pfeiffer Vacuum GmbH
Headquarters · Germany
T +49 6441 802-0
info@pfeiffer-vacuum.de

www.pfeiffer-vacuum.com