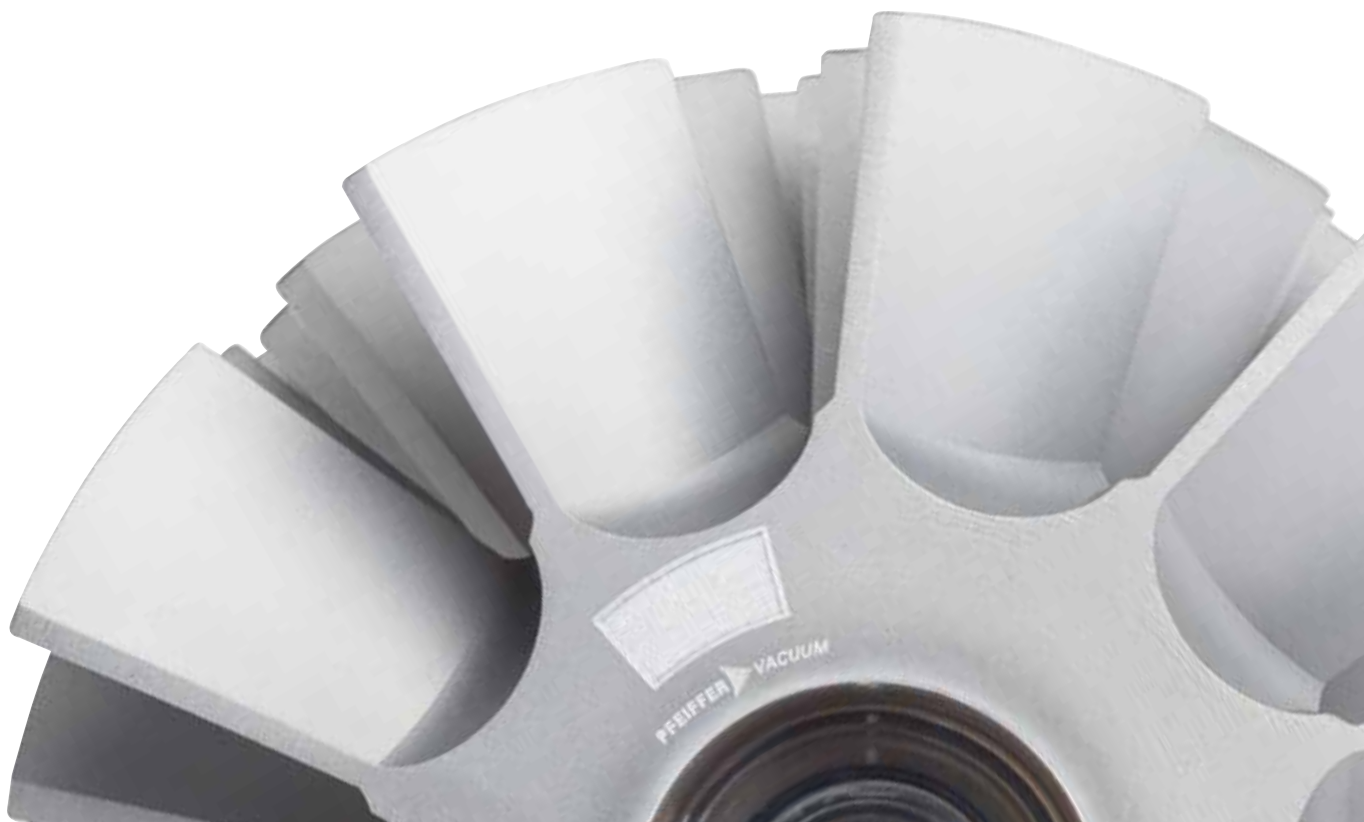


# Revolution in der Wuchttechnologie: Laser Balancing™ macht den Einsatz von Turbopumpen noch effizienter

Die Turbomolekularpumpe (kurz: Turbopumpe) gilt seit ihrer Erfindung im Jahr 1958 als Zugpferd der Hochvakuumtechnik. Dank ihrer zuverlässigen Vakuumbereitstellung ist sie unter anderem auch in der gesamten Halbleiterproduktion nicht mehr wegzudenken. Ihr Erfinder Willi Becker, zu diesem



Zeitpunkt seit 13 Jahren Leiter des technischen Labors bei der Arthur Pfeiffer Vakuumtechnik GmbH (heute Pfeiffer Vacuum GmbH), hätte sich damals wohl kaum erträumen lassen, dass 63 Jahre später ein Laserstrahl für eine weitere Revolution der Turbopumpe sorgt. Denn das sogenannte Laser Balancing ist die neueste und gegenwertig effizienteste Methode der Wuchttechnologie und steigert eindrucksvoll die Lebensdauer sowie Performance von Turbopumpen. Das Laser Balancing wurde bei Pfeiffer Vacuum entwickelt und patentiert – dem Unternehmen, in dem Willi Becker damals schon die Turbopumpe erfunden hat.

## Aufbau der Turbopumpe

Für die Erzeugung von ölfreiem Hoch- und Ultrahochvakuum ist die Turbopumpe bis heute essentiell. Unmittelbar nach ihrer Erfindung ersetzte sie nach und nach vorhandene Pumpprinzipien zur Vakuumerzeugung. In den 1960er Jahren begann der Bedarf an Hochvakuum immer mehr zu steigen und etablierte so die Turbopumpe in vielfältigen Anwendungen schnell als Standard der Hoch- und Ultrahochvakuumerzeugung. Ohne ihren Einsatz wären viele Prozessschritte im Bereich der Halbleiterherstellung oder der Beschichtung nicht möglich.

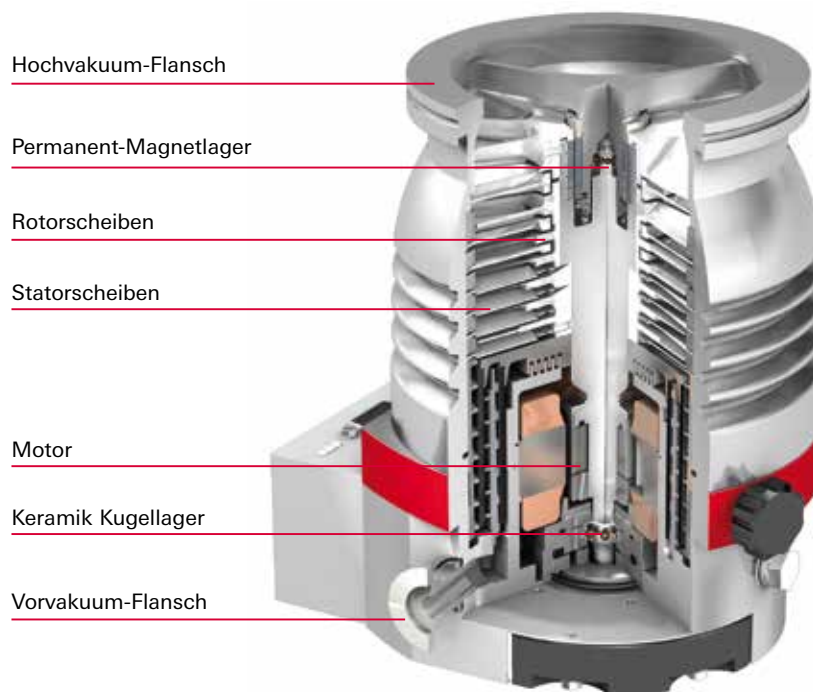


Abbildung 1: Schnittmodell einer hybridgelagerten Turbopumpe zeigt die Lagerung der Rotorwelle mit einem Permanentmagnetlager sowie einem Kugellager.

Als Teil der kinetischen Vakuumpumpen ähnelt ihr Aufbau dem einer Turbine. Im Inneren der Pumpe sind mehrere Rotorscheiben auf einer Welle montiert (Abbildung 1). Dazwischen liegen Statorscheiben, deren Schaufelausrichtung spiegelverkehrt zur Ausrichtung der Rotorscheiben verläuft. Dadurch werden die zu pumpenden Gasmoleküle vom Hochvakuum-Flansch entlang der einzelnen Turbostufen zum Vorvakuum-Flansch befördert. Der Rotor der Turbopumpe wird von einem bürstenlosen dreiphasen Drehstromsynchronmotor angetrieben. Dadurch können sehr hohe Drehfrequenzen bis zu 1500 Hz erreicht werden. Die Lagerung der Rotorwelle besteht wiederum aus einem Permanentmagnetlager auf der Hochvakuumseite und einem Hochleistungskugellager auf der Vorvakuumseite. Obwohl das Kugellager minimal geschmiert ist, erzeugt die Pumpe ein ölfreies Vakuum.

**In Kombination mit den sehr hohen Drehzahlen ist insbesondere das Wuchten der Turbopumpen-Rotoren eine technologische Herausforderung.**

Diese, im Maschinenbau selten anzutreffende Hybridlagerung, stellt eine Besonderheit zur Lager- und somit Wuchttechnologie dar und unterscheidet sich von üblichen Lagertechnologien. In Kombination mit den sehr hohen Drehzahlen ist insbesondere das Wuchten der Turbopumpen-Rotoren eine technologische Herausforderung. Denn gerade die Wuchtgüte hat einen großen Einfluss auf die Lebensdauer und die Performance der Turbopumpe.

## Hintergrund des Wuchtens von Rotoren

In der Praxis weist jedes rotierende Bauteil eine gewisse Unwucht auf, die nicht vollständig vermieden werden kann. Um später einen möglichst vibrationsarmen Betrieb zu ermöglichen, muss die Unwucht der immer schneller drehenden Rotoren unbedingt mit entsprechenden Maßnahmen reduziert werden. Der bekannteste Prozess ist vermutlich der des Auswuchtens von Autoreifen. Weisen die Räder eine Unwucht auf, macht sich dies durch Vibrationen am Lenkrad bemerkbar. Dieses physikalische Phänomen ist auch unter dem Begriff der Fliehkraft bekannt: Die Unwucht eines Rotors beschreibt die DIN ISO-Definition als einen Zustand, in dem Schwingkräfte und -bewegungen aufgrund von nicht ausgeglichenen Fliehkraften auf die Lager übertragen werden.

Selbst optisch symmetrisch erscheinende Körper weisen in der Realität geringe Ungleichheiten in der Masseverteilung auf. Dies kann beispielsweise aus dem Fertigungsprozess des Bauteils oder einer Inhomogenität in der Dichte des Rohmaterials resultieren. Der Begriff der Unwucht beschreibt diese ungleiche Massenverteilung. Weitere Ursachen können von der Konstruktion oder Montage herrühren. Darüber hinaus kann eine Unwucht auch während des Betriebs durch Verschleiß oder Ablagerungen entstehen.

Der Zustand der Unwucht lässt sich am Beispiel eines scheibenförmigen Rotors mit minimaler axialer Erstreckung beschreiben (Abbildung 2). Dieser Rotor dreht sich mit der Winkelfrequenz  $\omega$ . Jedes Masseteilchen  $m_i$  erzeugt in Abhängigkeit seines Radius  $r_i$  eine Fliehkraft  $\vec{F}_i$ , deren Richtung von  $\vec{r}_i$  vorgegeben wird:



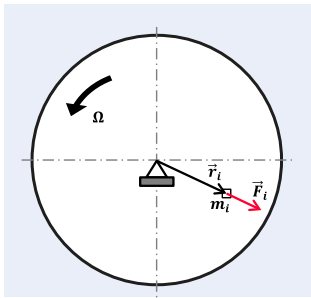


Abbildung 2: An einem scheibenförmigen Rotor erzeugt jedes Masseteilchen  $m_i$  eine Fliehkraft  $\vec{F}_i$ . Bei einer vollständig ausgeglichenen Massenverteilung heben sich alle Fliehkraft während der Rotation auf.

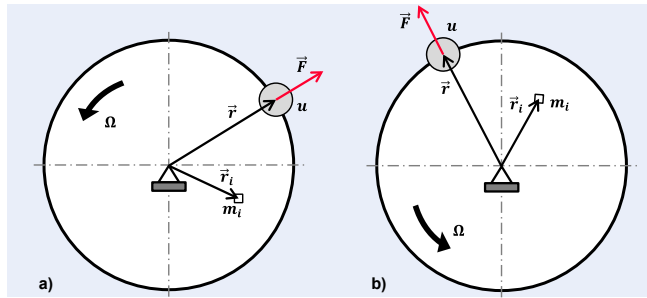


Abbildung 3: Der Unwuchtzustand eines scheibenförmigen Rotors kann durch eine einzelne Unwucht  $ur$  beschrieben werden (a). Aufgrund der Rotation resultiert die umlaufende Fliehkraft in Vibrationen (b).

$$\vec{F}_i = m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2$$

Gleichung 1

Die vektorielle Summe aller einzelnen Fliehkraft  $\vec{F}_i$  ergibt die resultierende Fliehkraft  $\vec{F}$ , welche auf die Lagerung des Rotors wirkt:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2$$

Gleichung 2

Wenn nun eine resultierende Fliehkraft vorhanden ist ( $\vec{F} \neq 0$ ) dann weist der Rotor eine Unwucht auf (Abbildung 3). Dieser Zustand lässt sich durch eine einzelne Unwucht  $ur$ , die der resultierenden Fliehkraft  $\vec{F}$  entspricht, beschreiben:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i \cdot \omega^2 = u \cdot \vec{r} \cdot \omega^2$$

Gleichung 3

Durch den Wegfall des Drehzahleinflusses auf beiden Seiten der Gleichung ergibt sich nachfolgende Formel zur Berechnung der Unwucht  $\vec{U}$ :

$$\begin{aligned} \vec{U} &= \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{r}_i \\ &= u \cdot \vec{r} \end{aligned}$$

Gleichung 4

wobei die Unwucht in  $\text{kg} \cdot \text{m}$  beziehungsweise üblicherweise in  $\text{g} \cdot \text{mm}$  angegeben wird.

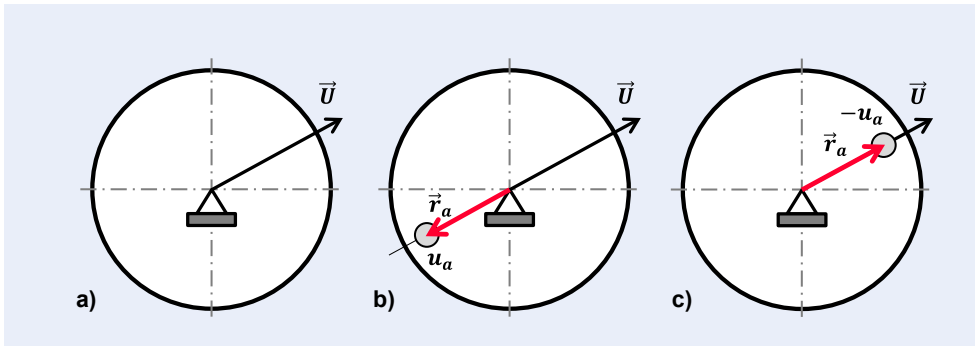


Abbildung 4: Ein scheibenförmiger Rotor weist eine Unwucht  $\vec{U}$  auf (a). Diese kann durch Anbringen der zusätzlichen Masse  $\vec{u}_a$  in entgegengesetzter Richtung (b) oder durch Wegnehmen der Masse  $(-\vec{u}_a)$  in der gleichen Winkellage (c) erfolgen.

Anhand des Beispiels wird deutlich, dass unerwünschte rotierende Kräfte entstehen, wenn ein mit Unwucht behafteter Körper in Rotation versetzt wird (Abbildung 3b). Die resultierenden Kräfte sind abhängig von der Rotationsdrehzahl sowie der Höhe der Unwucht. Sie führen zu einer zusätzlichen Belastung des Lagers und einem höheren Verschleiß. Darüber hinaus entstehen Schwingungen, die über das Lager auf das Gehäuse sowie weitere mechanisch verbundene Komponenten übertragen werden. Diese Schwingungen können ebenfalls Schäden hervorrufen.

Die Rotoren von Turbopumpen erreichen Drehzahlen von bis zu

90.000 Umdrehungen pro Minute beziehungsweise 1.500 Umdrehungen pro Sekunde. Da die resultierenden Kräfte mit zunehmender Drehzahl quadratisch ansteigen (Gleichung 3), sind die Anforderungen an eine Minimierung der Unwucht extrem hoch.

**Die Rotoren von Turbopumpen erreichen Drehzahlen von bis zu 90.000 Umdrehungen pro Minute.**

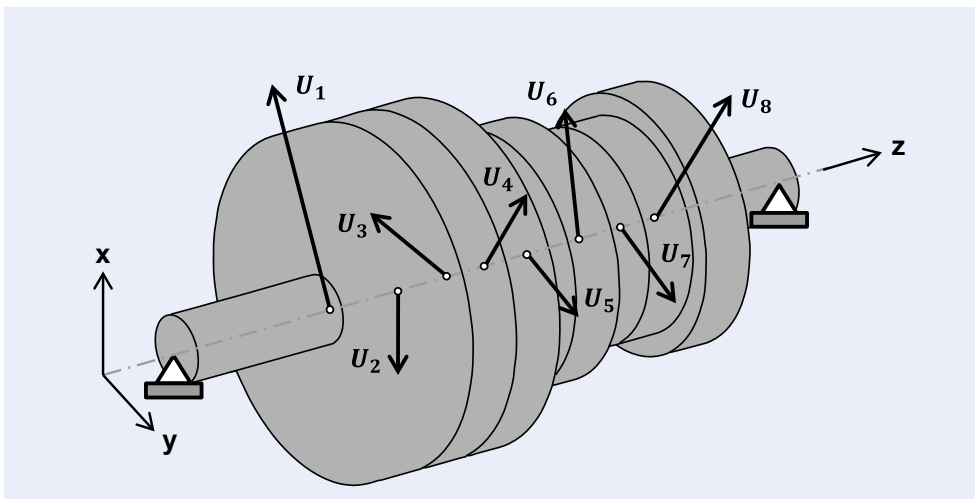


Abbildung 5: Der Unwuchtzustand eines allgemeinen Rotors wird in diesem Beispiel durch acht scheibenförmige Rotorelemente beschrieben, welche jeweils einen eigenen Unwuchtvektor  $U_i$  aufweisen.

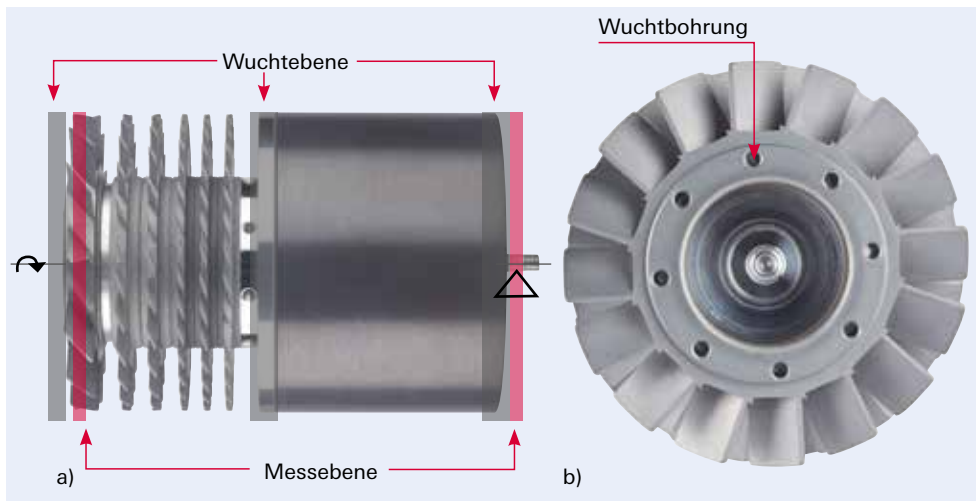


Abbildung 6: Darstellung eines konventionell gewuchteten Turbopumpen-Rotors: a) Position der Mess- und Wuchtebenen, b) Darstellung einer senkrecht zur Rotationsachse stehenden Wuchtebene mit entsprechenden Bohrungen zur Aufnahme der Wuchtgewichte

Geringste Unwuchten im Bereich von wenigen Milligramm können bereits einen starken Einfluss auf den Betrieb der Pumpe haben. Entsprechend ist eine gute Wuchtgüte entscheidend für die Laufruhe des Rotors und einen jahrelang beschädigungsfreien Betrieb der Turbopumpe. Zudem sorgt sie für eine Minimierung der Vibrationen, die auf die Vakuumkammer und die Kundenapplikation übertragen werden.

## Konventionelles Wuchten von Rotoren

Technisch ist es auch heute unmöglich, einen Rotor ohne Unwucht zu fertigen. Die beschriebenen Ursachen für die Entstehung von Unwuchten verdeutlichen, dass jeder Rotor eine eigene Unwuchtverteilung aufweist – selbst in einer Serienproduktion. Ob die Massenverteilung eines Rotors in Ordnung ist, legen Unwuchttoleranzen fest. Die Überprüfung und Korrektur der Massenverteilung eines Rotors werden durch den Prozess des Auswuchtens beschrieben. Die Unwucht kann durch Ansetzen oder Wegnehmen von Masse in einer zur Rotorachse senkrecht stehenden Ausgleichsebene ausgeglichen werden (Abbildung 4), sodass gilt:



$$\vec{U} + u_a \cdot \vec{r}_a = 0$$

Gleichung 5

Aus Gleichung 5 wird deutlich, dass das Produkt aus Ausgleichsmasse und Ausgleichsradius  $\vec{r}_a$  entsprechend der vorhandenen Unwucht  $\vec{U}$  des Rotors sein muss. Dabei kann die Korrektur der Massenverteilung in der gleichen

Winkellage der Unwucht, oder entgegengesetzt, erfolgen.

Bei der konventionellen Wuchttechnologie wird zusätzliche Masse angebracht, die zum Ausgleich führen – ähnlich wie beim Wuchten von Autoreifen. Auf der gegenüberliegenden Seite der Unwucht werden hier Wuchtgewichte in spezielle Bohrungen eingeschraubt (Abbildung 4b). Populär ist außerdem der Massenausgleich durch Wegnehmen von Masse in der gleichen Winkellage der Unwucht mithilfe zerspanender Prozesse (Abbildung. 4c). Dazu zählt zum Beispiel das Abschleifen von Material oder der Abtrag durch Bohren oder Fräsen.

Da der Rotor eine gewisse axiale Länge hat, wird der Unwuchtzustand eines allgemeinen Rotors nun dreidimensional betrachtet. Entlang der Rotorachse können endlos viele Unwuchten auftreten. Da die reale Unwucht in der Praxis nicht gemessen werden kann, wird der allgemeine Rotor in mehrere Rotorelemente zerlegt. Diese entsprechen wiederum scheibenförmigen Rotoren (Abbildung 5). Der Unwuchtzustand des allgemeinen Rotors wird somit durch eine endliche Anzahl an Unwuchtvektoren  $\vec{U}_i$  aller Rotorelemente angemessen genau beschrieben. Der Massenausgleich erfolgt anschließend, je nach Unwuchtzustand, in einer oder mehreren Ausgleichsebenen (auch Wuchtebenen genannt).

Beim konventionellen Wuchten wird der Rotor in einer speziellen Wuchtanlage montiert und auf spezielle festgelegte Wuchtdrehzahlen beschleunigt. Aufgrund der Unwucht entstehen umlaufende Fliehkräfte in den Lagerstellen, die wiederum zu Schwingungen des Rotors führen. Mithilfe von Abstandssensoren werden die radialen Auslenkungen, die durch die Schwingungen entstehen, in den Messebenen der beiden Lagerstellen gemessen (Abbildung 6a). Aus den radialen Auslenkungen  $\vec{r}$  werden mithilfe eines eigenen Berechnungsalgorithmus und der sogenannten Einflusskoeffizienten-Matrix A die resultierenden Unwuchtvektoren  $\vec{U}$  ermittelt:

$$\vec{U} = -A^{-1} \cdot \vec{r}$$

Gleichung 6

Am Anfang müssen diese Koeffizienten je nach Rotor über das Einschrauben von mehreren Testunwuchten bestimmt werden. Zu diesem Zweck werden festgelegte Testgewichte mit bekannter Masse an definierten Positionen im Rotor montiert und die Reaktionen gemessen. Über die radialen Auslenkungen der einzelnen Messungen sowie die eingeschraubten Testunwuchten kann so die benötigte Matrix mit den einzelnen Einflusskoeffizienten berechnet werden. Diese beschreiben daraufhin das System aus dem gegebenen realen Rotor und der Wuchtanlage. Sie sind gültig für alle Serien-Rotoren mit gleicher Geometrie beziehungsweise gleichem Aufbau.



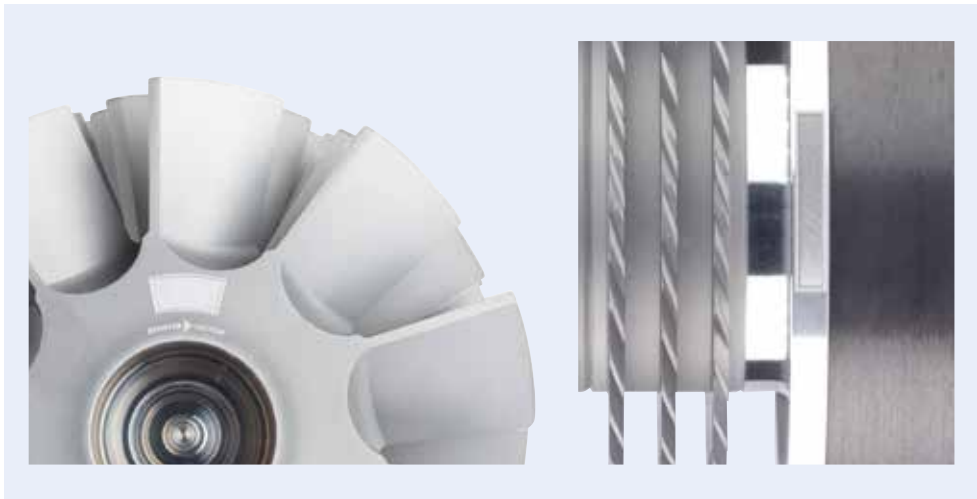


Abbildung 7: Fotos der Segmentgeometrie nach durchgeführter Laserablation in zwei unterschiedlichen Wuchtebenen

Damit die gesamte Unwucht des Rotors reduziert werden kann, ist dieser entlang der Rotationsachse in mehrere senkrecht zur Achse stehende Wuchtebenen aufgeteilt. Zur Aufnahme der Wuchtgewichte befinden sich in diesen Ebenen radial umlaufend Bohrungen im Rotor. Aufgrund der definierten Positionen der Wuchtbohrungen wird von einem Festort-Ausgleich gesprochen. Der Wuchtalgorithmus ermittelt die Ausgleichsgewichte für jede Wuchtebene und teilt diese meist in jeweils zwei Komponenten auf. Entlang des Umfangs der einzelnen Ebenen werden im Anschluss gezielt Wuchtgewichte manuell eingeschraubt. Die ungleiche Massenverteilung des Rotors verringert sich – und damit verbunden auch die verbleibende Restunwucht. Die festgelegten Toleranzen werden so eingehalten. Die Unwucht wird während des gesamten Vorgangs bei unterschiedlichen Drehzahlen ermittelt und schrittweise ausgeglichen. Dadurch wird ein schwingungsreduzierter Hochlauf des Rotors auf Nenndrehzahl ermöglicht.

## Die Laser Balancing Methode

Die Anforderungen an Turbopumpen unterscheiden sich in primäre und sekundäre Eigenschaften. Während die Primäreigenschaften die Pumpperformance betreffen, steigen seit dem letzten Jahrzehnt auch im Bereich der Sekundäreigenschaften die Applikationsanforderungen an Turbopumpen. Die schnelldrehenden Rotoren unterliegen deshalb einer permanenten Weiterentwicklung. Diese schließt, unter anderem, die Lebensdauer des Rotors, vibroakustische Emissionen sowie die Sauberkeit in Bezug auf das Ausgasungsverhalten der Bauteile und Oberflächen ein. Unter vibroakustischen Emissionen versteht man von der Pumpe emittierender Schall und Vibrationen am Gehäuse. Als Hauptursache für erhöhte vibroakustische Emissionen ist die Rotorunwucht zu nennen. Das neuartige Laser Balancing schafft hier Abhilfe und ermöglicht, Rotoren von Turbopumpen noch effizienter zu wuchten. Der konventionelle Wuchtprozess wird durch den Verzicht auf Wuchtbohrungen und -gewichte optimiert. Die





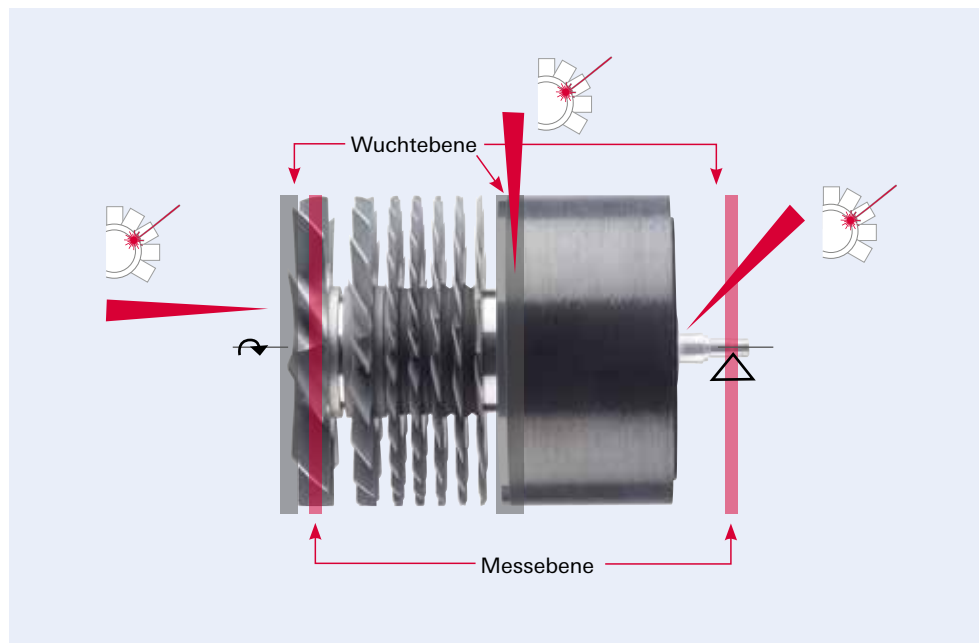


Abbildung 8: Darstellung eines lasergewuchteten Turbopumpen-Rotors mit Darstellung der Mess- und Wuchtebenen sowie die schematische Darstellung der Laserstrahlrichtung

vollständige Automatisierung des Wuchtvorgangs spielt hierbei ebenfalls eine tragende Rolle.

Zu Beginn wird der zu wuchtende Rotor in der automatisierten Laserwuchtanlage montiert. Innerhalb der Anlage ist der Laser in einer speziellen Kammer gekapselt. Dadurch geht für die Umgebung keine Gefahr von der Laserstrahlung aus. Der Massenausgleich als auch die einzelnen Schritte zur Messung und Bestimmung der Unwucht werden bei unterschiedlichen Drehzahlen iterativ durchgeführt. Dadurch ist es möglich, einen präzise und wirksam ausgewuchteten Rotor in allen Drehzahlbereichen zu erhalten. Die radialen Auslenkungen der Turbopumpen-Rotoren werden, wie beim konventionellen Wuchten, mit Hilfe von Abstandsmessensoren in zwei Messebenen nahe der Lagerung gemessen. Nach der Ermittlung der Unwucht durch den weiterentwickelten

Wuchtalgorithmus wird der Massenausgleich daraufhin umgekehrt. In der gleichen Winkellage des Unwuchtvektors wird Material durch einen Laser abgetragen. Die ungleiche Massenverteilung wird dadurch korrigiert. Ein hochenergetisch gepulster Laserstrahl erhitzt das Rotormaterial in den Wuchtebenen lokal so stark, dass ein Schmelzaustrieb mit Verdampfen und/oder Sublimation auftritt. Dabei kann das Material in Form einer definierten Segmentgeometrie an jeder beliebigen Stelle entlang des Umfangs abgetragen werden (Abbildung 7).

**Ein hochenergetisch gepulster Laserstrahl erhitzt das Rotormaterial in den Wuchtebenen lokal so stark, dass ein Schmelzaustrieb mit Verdampfen und/oder Sublimation auftritt.**

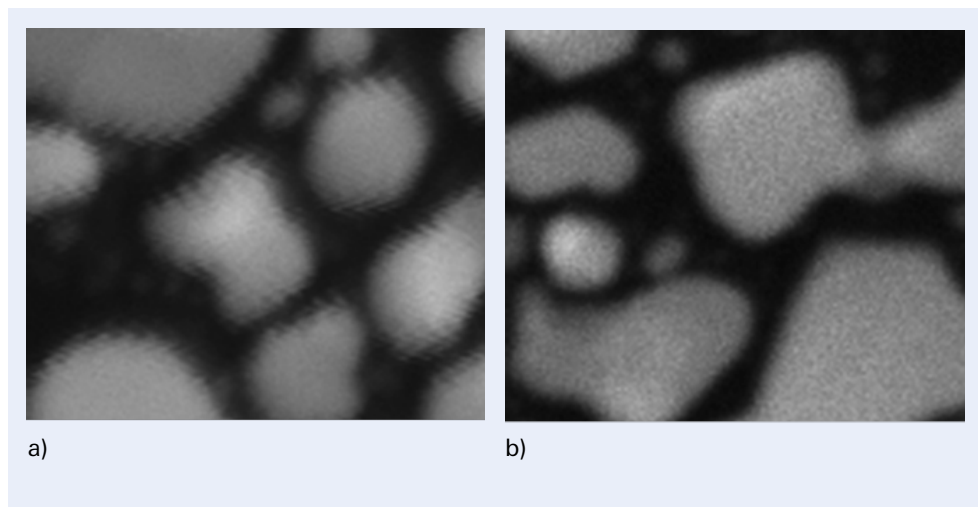


Abbildung 9: Vergleich zweier Aufnahmen eines Elektronenmikroskops mit integrierter Turbopumpe: a) Stärkere Vibrationen (~20 nm) am Hochvakuum (HV) Flansch ergeben ein unscharfes Bild bei hohen Vergrößerungen, b) Geringere Vibrationen (~5 nm) erzielen eine schärfere Aufnahme (Bilder mit freundlicher Genehmigung durch TESCAN, Czech Republic)



Im Vergleich zum konventionellen Wuchten, bei dem abgestufte Wuchtgewichte eingeschraubt oder Masse abgefräst oder -gebohrt werden, arbeitet die Laserablation wesentlich präziser. Dadurch kann eine deutlich geringere Restunwucht erreicht werden. Die Materialeigenschaften werden dabei nicht beeinflusst. In Kombination mit einem relativ zum Laser beweglichen Spiegelsystem erreicht bereits ein einzelner Bearbeitungslaser die unterschiedlichen Wuchtebenen (Abbildung 8). Dadurch ergibt sich eine größere Flexibilität bei der Konstruktion von neuen Rotoren und der Definition sowie Ausrichtung der Wuchtebenen.

Der Verzicht auf geometrisch festgelegte Wuchtbohrungen sowie die Präzision des Lasers ermöglichen im ersten Wuchtdurchgang eine beliebige Position des Ablationssegments. Dadurch wird die ungleiche Massenverteilung genau in der notwendigen Winkellage der einzelnen Wuchtebenen korrigiert. Innerhalb der nachfolgenden Wuchtdurchgänge berücksichtigt der Algorithmus der Wuchtanlage die bereits bearbeiteten Ablationssegmente und platziert entsprechend weitere Segmente. Sobald die Restunwucht über den gesamten Drehzahlbereich entsprechend der Toleranzen korrigiert ist, wird der Rotor aus der automatisierten Anlage entnommen.

## Vorteile der Laser Balancing Methode

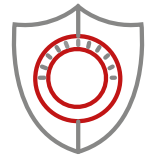
In vielen Geräten und Anwendungen mit integrierten Turbopumpen sind geringe Vibrationen und/oder ein geräuscharmer Lauf der Rotoren eine Voraussetzung für deren Betrieb. Lasergewuchtete Rotoren stellen daher einen großen Fortschritt für ihre Einsatzgebiete dar. In Kombination mit den zugrundeliegenden Berechnungsalgorithmen sichern sie in einer modernen, automatisierten Wuchtanlage eine effizientere Korrektur der Restunwucht: Wird die Restunwucht  $U_{\text{Rest}}$  reduziert, hat dies auch einen Einfluss auf die Wuchtgüteklasse der Rotoren. Ein gut ausgewuchteter Rotor mit einer hohen Wuchtgüte bedeutet dabei einen geringen Betrag der Wuchtgüteklasse  $G$ .  
 $\omega$ : Drehzahl des Rotors [Hz];  $m$ : Masse des Rotors [kg] und  
 $G$ : üblicherweise in mm/s.

$$G = U_{\text{Rest}} \cdot \frac{\omega}{m}$$

Gleichung 7

**Turbopumpen mit lasergewuchtetem Rotor verfügen über eine längere Lebensdauer und übertragen geringere Vibrationen auf das Gehäuse der Pumpe.**

Auf Grundlage der Unwuchttoleranzen reduzieren sich so die Restunwucht und daher die Wuchtgüteklasse um etwa 50%. Durch Unwuchten induzierte Fliehkräfte werden so minimiert. Das Rotormaterial und insbesondere die Lagerung werden dadurch geringer belastet. Aus diesem Grund verfügen Turbopumpen mit lasergewuchtetem Rotor über eine längere Lebensdauer.



Darüber hinaus werden über die Lagerung geringere Vibrationen auf das Gehäuse der Pumpe übertragen. Dies wirkt sich während des Betriebs positiv auf die Schallemission der Pumpe und empfindliche, mechanisch mit der Turbopumpe gekoppelte Komponenten oder Prozesse aus. Bereits während des Prozesses werden die Partikel abgesaugt und gefiltert, die im Rahmen der Laserablation entstehen. Weiterhin garantiert die anschließende Reinigung des lasergewuchteten Rotors höchste Sauberkeit der Oberflächen.

Anwendungsbeispiele sind Ionen-Mobilitäts-Spektrometer, welche als Benchtop-Geräte auf Labor-Arbeitsplätzen eingesetzt werden. In diesem Rahmen wird ein geräuscharmer Betrieb der integrierten Turbopumpe gefordert. Ein weiteres Beispiel sind Elektronenmikroskope, die nur durch einen schwingungsoptimierten Rotor und geringe vibroakustische Emissionen scharfe hochauflösende Aufnahmen ermöglichen (Abbildung 9).



Die beschriebenen Vorteile des innovativen Laser Balancing verdeutlichen den technologischen Fortschritt der lasergewuchteten Rotoren gegenüber den konventionell gewuchteten Rotoren. Durch die verlängerte Lebensdauer des Rotors sowie die reduzierten Vibrationen und Schallemission der Turbopumpe stellt das Verfahren einen weiteren Meilenstein in der Vakuumtechnik dar und bietet eine größere Flexibilität für die Konstruktion neuer Turbopumpenrotoren.

## Your Success. Our Passion.

Wir geben jeden Tag unser Bestes  
für Sie – weltweit!

Sie suchen eine optimale  
Vakuumlösung?  
Sprechen Sie uns an:

**Pfeiffer Vacuum GmbH**  
Germany  
T +49 6441 802-0



Irrtümer und/oder Änderungen vorbehalten. PI 0638 PDE (Januar 2022/0)

Folgen Sie uns auf Social Media  
#pfeiffervacuum



[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

**PFEIFFER**  **VACUUM**