

Optimierung von permanentmagnetischen Lagern

M.Lang

*Institut für Schichten und Grenzflächen
Abteilung Magnetlager- und Antriebstechnik
Forschungszentrum Jülich
52425 Jülich, Deutschland
Tel: +49 2461 613380 Fax: +49 2461 613709
Email: ma.lang@fz-juelich.de*

Kurzfassung

Permanentmagnetische Lager mit aktiver axialer Stabilisierung werden seit vielen Jahren erfolgreich in schnell drehenden Vakuumpumpen eingesetzt. Der elektronische Aufwand zur Stabilisierung solcher Lager ist klein gegenüber der Antriebselektronik der Pumpen. In diesem Beitrag wird eine Untersuchung zur Optimierung des Steifigkeit/Volumen Verhältnisses von permanentmagnetischen Radiallagern vorgestellt. Zur Berechnung der Steifigkeiten wurde eine selbst entwickelte Software verwendet, die die erforderlichen großen Datenmengen sehr schnell berechnen kann. Aus den Daten lassen sich einfache Regeln für eine optimale Auslegung von permanentmagnetischen Lagern erstellen. Es zeigte sich, dass die Steifigkeit bei gegebenen Magnetvolumen deutlich gesteigert werden kann.

1 Einführung

Permanentmagnetische Lager mit aktiver axialer Stabilisierung werden seit vielen Jahren in Turbomolekularpumpen eingesetzt. Solche schnell drehenden Pumpen dienen zur Erzeugung von Hochvakuum und werden in großen Stückzahlen in der Halbleiterindustrie verwendet. Die Firma Leybold hat seit 1990 unter Lizenz des Forschungszentrums Jülich etwa 20.000 Pumpen mit permanentmagnetischer Lagerung verkauft. Das Lager dieser Pumpe soll als Beispiel für die folgenden Optimierungsüberlegungen dienen. Es lässt sich in zwei Komponenten unterteilen:

- das permanentmagnetische Traglager zur radialen Stabilisierung
- das elektromagnetische Stabilisierungslager zur axialen Stabilisierung

Wir wollen im Folgenden nur das permanentmagnetische Lager betrachten. Es besteht aus mehreren koaxial aufgereihten Magnetringen.

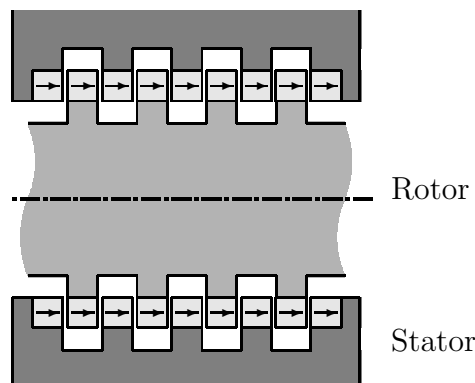


Fig. 1: Schematischer Aufbau des permanentmagnetischen Lagers der Turbomolekularpumpe

Die Magnetringe sind alle in axialer Richtung magnetisiert und so angeordnet, dass sie sich gegenseitig anziehen. In der in Fig. 1 abgebildeten Situation ist das Lager kräftefrei. Der Abstand zwischen den Magneten ist genau gleich groß, und damit heben sich die axialen Anziehungskräfte auf. Es ergibt sich eine Gleichgewichtslage, die radial stabil und axial instabil ist. Das Stabilitätsverhalten wird durch die Steifigkeiten beschrieben: Das Lager besitzt eine positive (und damit stabile) Radialsteifigkeit s_{rad} und eine negative Axialsteifigkeit s_{ax} . Das hat zur Folge, dass bei radialen Verschiebungen des Rotors zentrierende Kräfte auftreten, während bei axialen Verschiebungen der Rotor weiter aus der Gleichgewichtslage getrieben wird. Die axiale Instabilität ist unvermeidbar, da die Axialsteifigkeit mit der Radialsteifigkeit gekoppelt ist. Aus dem Earnshaw Theorem folgt für den rotationssymmetrischen Anwendungsfall:

$$s_{rad} = -\frac{1}{2}s_{ax} \quad (1)$$

Die Radialsteifigkeit ist die wichtige Größe dieses Lagertyps. Sie ist eine Funktion der Magnetisierung und der Bauform der Magnetringe. Im Folgenden soll der Einfluß der Bauform auf die Radialsteifigkeit betrachtet werden. Ein Ziel der Untersuchung ist es, Magnetlager zu entwickeln, die ein optimales Verhältnis der Radialsteifigkeit zum Bauvolumen besitzen.

2 Berechnung der Kräfte und Steifigkeiten

Aus dem Beispiel in Fig. 1 nehmen wir nur eine Grundeinheit von zwei Magnetringen heraus und berechnen deren Steifigkeiten. Die Ergebnisse lassen sich einfach durch Superposition auf das Originallager zurück rechnen.

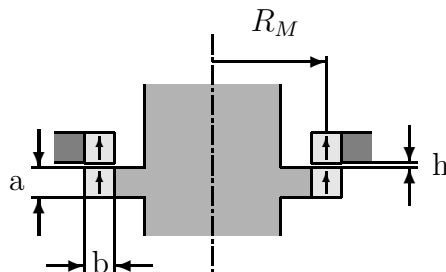


Fig. 2: Grundeinheit eines permanentmagnetischen Radiallagers, bestehend aus zwei Magnetringen

Vorausgesetzt, dass beide Magnete immer baugleich sind, gibt es die folgenden vier geometrischen Parameter:

- Magnethöhe a
- Polbreite b
- mittlerer Radius R_M
- Spaltweite h

Zur Berechnung der Steifigkeiten wurde eine selbst entwickelte Software verwendet, da einerseits die Rechenzeiten der kommerziellen Software recht groß sind (FARADAY), andererseits sich dieses Problem auf ein sehr einfaches Modell reduzieren läßt. Das in Fig. 1 skizzierte Lager kommt ohne permeables Material wie Eisen aus, und die Magnete haben

eine Permeabilität nahe eins. Diese Voraussetzungen ($\mu_r = 1$) ermöglichen, als Rechenmodell die Kraftwirkungen zwischen stromführenden Leitern zugrunde zu legen. Dabei werden nach dem Gesetz von Biot-Savart die Magnetfelder bestimmt und nach dem Lorentzgesetz die Kräfte berechnet. Die Steifigkeiten werden dadurch bestimmt, dass in einem zweiten Schritt eine kleine Verschiebung aus dem Arbeitspunkt erfolgt. Aus der dabei auftretenden Kraftdifferenz wird die Steifigkeit berechnet. Der gesamte Algorithmus ist ausführlicher in [1] beschrieben, die erforderlichen großen Datenmengen lassen sich damit sehr schnell berechnen.

3 Entwicklung einer dimensionslosen Darstellung

Man könnte jetzt die vier geometrischen Parameter in einem sinnvollen Wertebereich variieren, und dazu die Radialsteifigkeit sowie das Verhältnis der Radialsteifigkeit zum Volumen der Magnete berechnen. Zunächst soll aber nach Wegen gesucht werden, die den Rechenaufwand reduzieren. Dazu betrachten wir die Skalierungsregeln für geometrisch ähnliche Bauformen von Permanentmagneten. Es ist zu erwarten, dass geometrisch ähnliche Bauformen ähnliche Kräfte und Steifigkeiten liefern. Die Tabelle 1 enthält ein kleines Rechenbeispiel. Dort sind neben den Maßen die Axialkraft und die Radialsteifigkeit der Anordnung aus Fig.2 aufgeführt und in der nächsten Spalte die gleichen Größen bei verdoppelten Abmessungen.

Tabelle 1 Kräfte und Steifigkeiten der Magnetringe aus Fig. 2, sowie bei verdoppelten Abmessungen, jeweils mit einer Koerzitivfeldstärke von $H_C = 950kA/m$

	Original	Doppelte Größe
mittlerer Radius R_M	15 mm	30 mm
Magnethöhe a	4 mm	8 mm
Polbreite b	4 mm	8 mm
Spaltweite h	0.6 mm	1.2 mm
Volumen V	3.24 cm ³	25.9 cm ³
Kraft F_z	77,4 N	310N
Radialsteifigkeit s_{rad}	24,2N/mm	48,4N/mm

Aus dieser einfachen Verdopplung lassen sich die folgenden Skalierungsregeln ableiten:

Tabelle 2 Skalierungsregeln für Permanentmagnete

Größe	Skalierungsregel	Einheit
Volumen	$V \sim L^3$	Volumen
Kraft	$F \sim L^2$	Druck·Fläche
Radialsteifigkeit	$s_{rad} \sim L$	Druck·Länge

Die Tabelle 2 bildet die Grundlage für den Übergang zu einer dimensionslosen Betrachtung. Für das Verhältnis der Radialsteifigkeit zum Volumen kann man aus der Tabelle 2 einfach folgenden Zusammenhang ableiten:

$$\frac{s_{rad}}{V} \sim \frac{1}{L^2} \quad (2)$$

Der Ausdruck hat die Dimension Druck/Fläche. Um eine dimensionslose Darstellung zu erreichen, muß der Ausdruck durch einen Referenzdruck geteilt und mit einer Referenzfläche multipliziert werden. Als Referenzdruck bietet sich die Energiedichte an:

$$\sigma_{ref} = \frac{B_r^2}{2 \cdot \mu_0} \quad [\text{N/m}^2] \quad (3)$$

Dieser Ausdruck enthält die Remanenzmagnetisierung B_r des Magnetmaterials. Der quadratische Zusammenhang des Referenzdruckes mit der Magnetisierung wird anhand dieser Gleichung (3) deutlich.

Als „Referenzfläche“ wählen wir das Quadrat der Spaltweite h . Aus den folgenden Ergebnissen wird deutlich, dass diese Normierung zweckmäßig ist. Es ergibt sich ein Ausdruck, den wir als *normierte Radialsteifigkeit* bezeichnen wollen:

$$s_{rad}^* = \frac{s_{rad} \cdot h^2}{V \cdot \sigma_{ref}} \quad (4)$$

Das Volumen V beinhaltet, wie schon in Tabelle 1, neben dem Volumen beider Magnete auch das Spaltvolumen.

Die Längen werden ebenfalls auf die Spaltweite h normiert:

- normierte Magnethöhe a/h
- normierte Polbreite b/h
- normierter Radius R_M/h

Der Vorteil einer dimensionslosen Darstellung wird an dieser Stelle deutlich: die Zahl der Parameter reduziert sich von vier auf drei. Die Aufgabe besteht jetzt darin, die normierte Radialsteifigkeit als eine Funktion von drei geometrischen Parametern zu gewinnen:

$$s_{rad}^* = f\left(\frac{a}{h}; \frac{b}{h}; \frac{R_M}{h}\right) \quad (5)$$

Diese noch zu bestimmende Gleichung beschreibt den Einfluß der Bauform der Magnete auf die Radialsteifigkeit. Ist die normierte Radialsteifigkeit bekannt, kann daraus die *spezifische Radialsteifigkeit*, d.h. das Verhältnis von Radialsteifigkeit zu Volumen, nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\frac{s_{rad}}{V} = s_{rad}^* \cdot \frac{\sigma_{ref}}{h^2} \quad (6)$$

Danach ist die spezifische Radialsteifigkeit eine Funktion der Magnetisierung, der Spaltweite und der Bauform.

4 Normierte Radialsteifigkeit von Einfachringen

Die normierte Radialsteifigkeit von den in Fig. 2 abgebildeten Magnetringen (Einfachringen) wurde nun als Funktion der oben genannten Parameter mit einer Schrittweite von 0.2 in den Bereichen von 0.2 bis 7 bestimmt. Die Rechnungen zeigen, dass der normierte Radius R_M/h nur einen geringen Einfluß auf das Ergebnis hat. Das Resultat der ringförmigen Anordnung entspricht weitestgehend dem einer zweidimensionalen Anordnung, d.h. unendlich langen Magnetstäben mit den gleichen Querschnittsmaßen. Das ist auch für große Ringradien zu erwarten und hat schon als Grundlage für viele Rechenmodelle gedient [2][3]. Wir

können deshalb R_M/h als schwachen Parameter außen vor lassen und müssen die normierte Radialsteifigkeit nur als Funktion der normierten Magnethöhe a/h und der normierten Polbreite b/h betrachten. Damit wird eine kompakte grafische Darstellung möglich. In Fig.3 ist das Gebirge der normierten Radialsteifigkeit als Funktion der zwei Parameter a/h und b/h dargestellt.

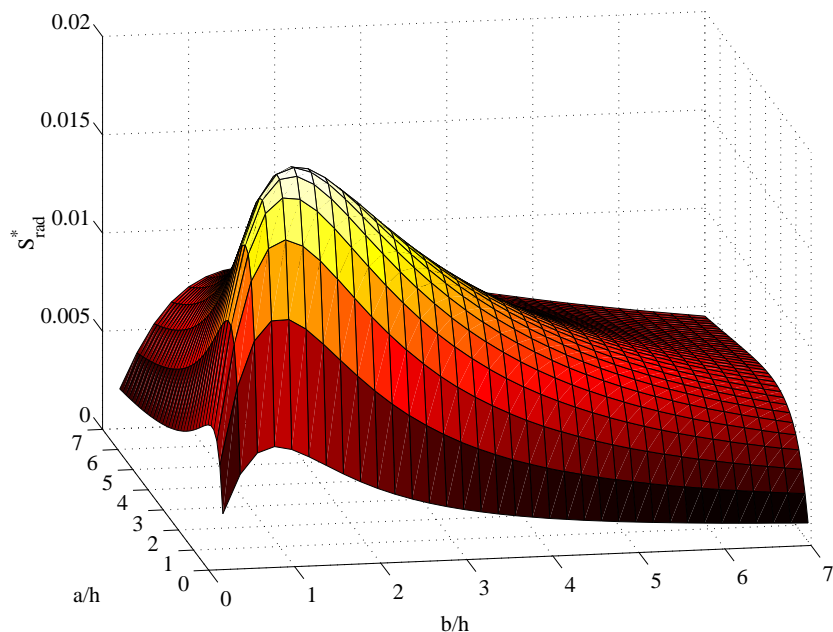


Fig. 3: Normierte Radialsteifigkeit bei Einfach-Ringen

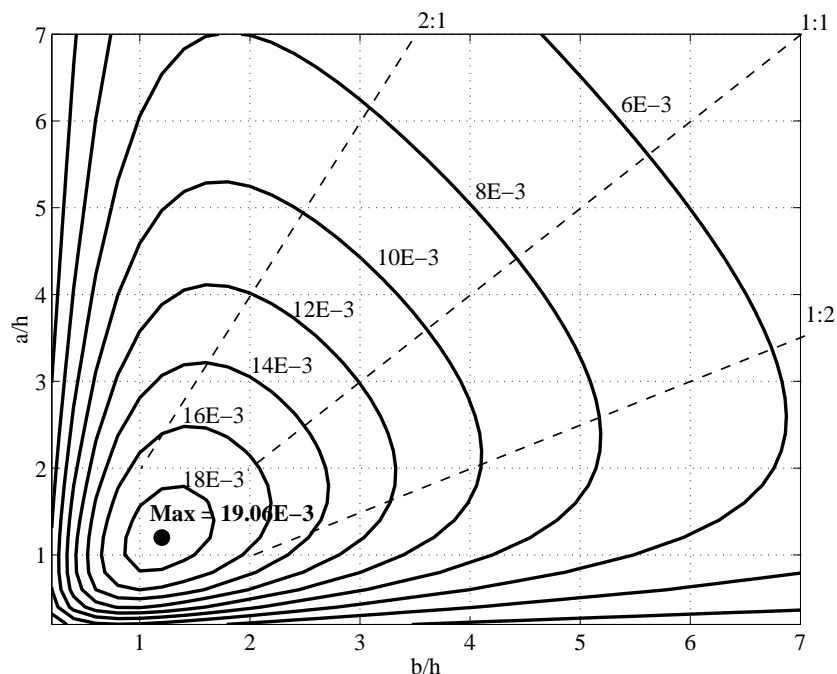


Fig. 4: Draufsicht auf die Normierte Radialsteifigkeit bei Einfach-Ringen

In Fig. 4 sind die Höhenlinien des Gebirges aus Fig. 3 abgebildet. Zusätzlich stellen die gestrichelten Linien in Fig. 4 Magnete mit gleichen Querschnittsformen dar. So sind beispielsweise an der mittleren Linie alle quadratische Querschnitte $a/h=b/h$ aufgereiht. An der Stelle $a/h=1.2$ und $b/h=1.2$ ist ein Maximum von $s_{rad}^*=19.06E-3$ zu erkennen. Das

heißt, immer wenn die Höhe und die Breite des Magneten etwa 20% größer als die Spaltweite sind, dann ist die normierte Radialsteifigkeit maximal. Wenn man nun (z.B. aus konstruktiven Gründen) die Spaltweite festlegt, dann kann man aus Fig.3 / Fig. 4 auch direkt die spezifische Radialsteifigkeit ablesen. Für das Beispiel aus Fig. 2 liegt die normierte Radialsteifigkeit mit einem Wert von $s_{rad}^*=4.78E-3$ an der Stelle $a/h=6.6$ und $b/h = 6.6$ um nahezu den Faktor 4 unterhalb des theoretischen Optimums.

5 Doppelringmagnete

Die gleiche Betrachtung stellen wir nun für sogenannte Doppelringmagnete an.

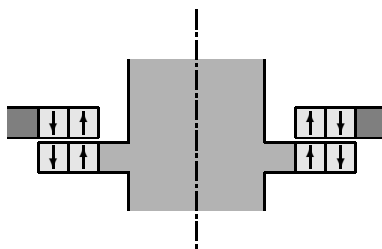


Fig. 5: Beispiel für Doppelringmagnete

Doppelringmagnete bestehen aus zwei gegensinnig gepolten Magnetringen, die ineinander gesteckt werden. Es ist aus der Literatur bekannt, dass diese Konfigurationen eine bessere Ausnutzung mit sich bringen [3] [4]. Mit dem oben beschriebenen Verfahren kann das systematisch untersucht werden. Die Normierung läuft genau wie bei den einfachen Magnetringen, zusätzlich wird festgelegt, dass alle vier Teilringe die gleichen Höhen und Polbreiten besitzen. Die normierte Radialsteifigkeit in Fig. 6 liefert ein ähnliches Bild wie bei den Einfachringen in Fig. 3.

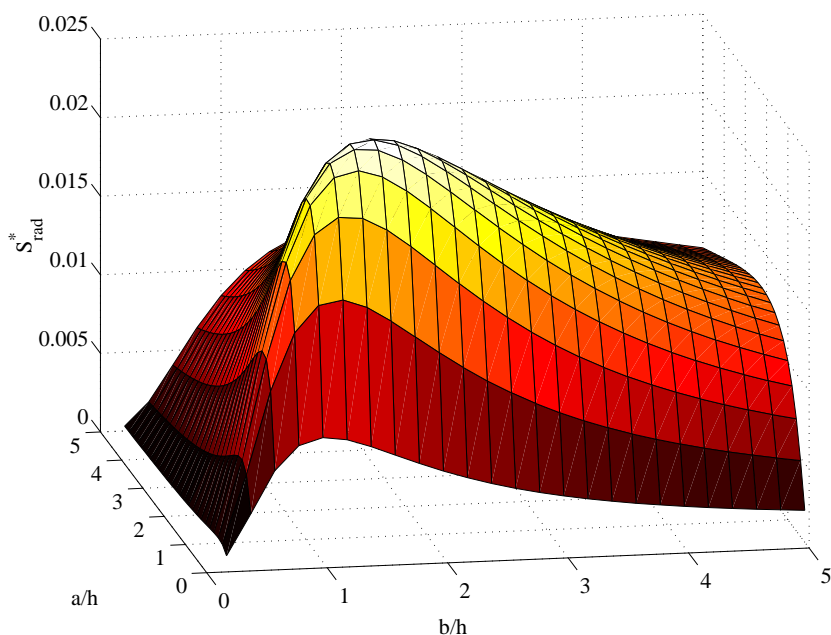


Fig. 6: Normierte Radialsteifigkeit von Doppelringmagneten

Das Maximum liegt mit $a/h=1.2$ und $b/h=1.6$ in der Nähe des Maximums der Einfachringe, der Betrag liegt jedoch mit $s_{rad}^*=24.9E-3$ um 30% über dem Wert der Einfachringe.

Damit ist deutlich, dass zumindest in der Nähe der optimalen Bauform Doppelringe den Einfachringen überlegen sind.

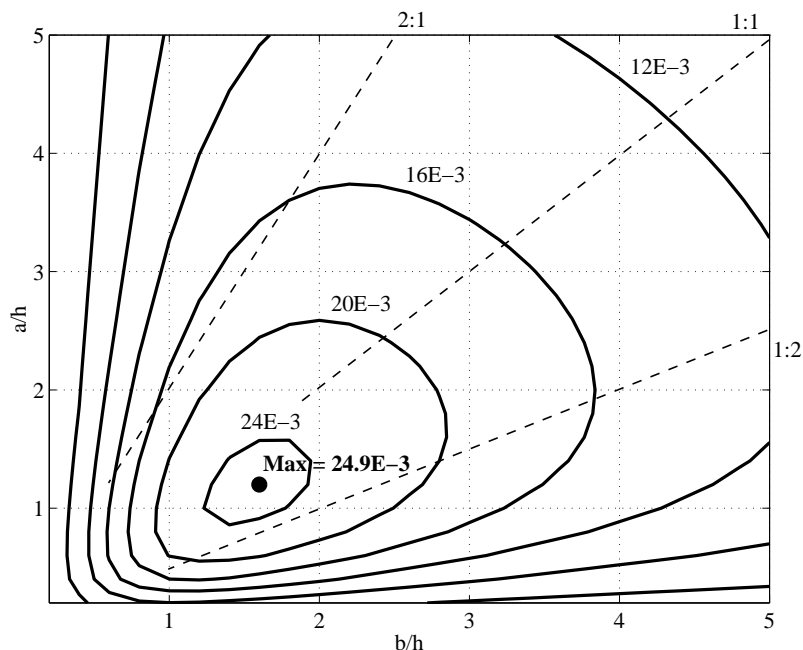


Fig. 7: Draufsicht auf die normierte Radialsteifigkeit von Doppelringmagneten

Diese Untersuchung lässt sich jetzt auf Mehrfachringe erweitern. Die Ergebnisse ähneln den schon untersuchten Ringen. In der folgenden Tabelle sind nur die Maxima mit den dazugehörigen Abmessungen dargestellt.

Tabelle 3 Lage und Betrag der Maxima der normierten Radialsteifigkeit bei Ein- und Mehrfach Ringen

Ringzahl	normierte Höhe a/h	normierte Breite b/h	Maximum
1	1.2	1.2	19.1E-3
2	1.2	1.6	24.9E-3
3	1.2	1.8	25.7E-3
4	1.2	1.8	26,3E-3
5	1.2	1.8	26,7E-3

Man erkennt, dass mit wachsender Ringzahl das Maximum sich kaum noch verschiebt.

6 Entwurfsregeln

Für den Entwurf optimaler Multiring-Magnetgeometrien lassen sich aus den Gleichungen und den dargestellten Diagrammen folgende einfache Regeln ableiten:

1. Die Spaltweite ist so klein wie technisch möglich zu wählen
2. Die Magnethöhe ist etwa gleich der Spaltweite zu setzen.
3. Die Magnetbreite ist etwa doppelt so groß wie die Spaltweite zu setzen.

Diese Regeln sind als grobe Faustregeln zu verstehen. Betrachtet man die Umgebung der Maxima, so erkennt man einen gewissen Spielraum. Die Polbreite kann beispielsweise auch schmaler gewählt werden, ohne dass eine deutliche Reduzierung der normierten Radialsteifigkeit auftritt. Auf jeden Fall führen diese Regeln zu wesentlich schlankeren Magnetgeometrien. Bei einer Spaltweite von 0.6 mm wären beispielsweise Magnethöhen von 0.6 mm und Polbreiten von 1.2 mm optimal.

Weiterhin sei auf einen möglichen Fehlschluß hingewiesen: Wenn man zwei Magnetringe mit den Abmessungen aus Tabelle 1 zur Verfügung hat, dann ist bei einer Spaltweite von 4.8 mm die normierte Radialsteifigkeit maximal. Es ist jedoch falsch, dies als Spaltweite zu benutzen, da die spezifische Radialsteifigkeit dann viel kleiner ist, als bei einer Spaltweite von 0.6 mm. Das verdeutlicht Gleichung 7:

$$\frac{s_{rad}}{V} = s_{rad}^* \cdot \frac{\sigma_{ref}}{h^2} \quad (7)$$

Der Formfaktor s_{rad}^* steigt zwar auf das 3.9fache des Ausgangswertes, jedoch schrumpft der zweite Term durch den quadratischen Einfluß der vergrößerten Spaltweite auf rund 2% seines Ursprungswertes. Das verdeutlicht, dass als erste Optimierungsregel der fast triviale Satz gilt: *Die Spaltweite ist so klein wie technisch möglich zu halten.*

Mit den Regeln kann man einen optimierten Entwurf des passiven Lagers der Turbomolekularpumpe aus Fig. 1 unternehmen. Setzen wir voraus, das der Spalt von 0.6 mm erhalten bleibt, weiterhin die Außen- und Innenradien der Ringe gleich bleiben, so kann man beispielsweise in den Bauraum Dreifachring-Magnete mit einer Polbreite von 1.3 mm und einer Magnethöhe von 1 mm einbauen. Das Ergebnis ist dann ein Lager, das bei gleicher Radialsteifigkeit nur 26% der ursprünglichen Bauhöhe benötigt.

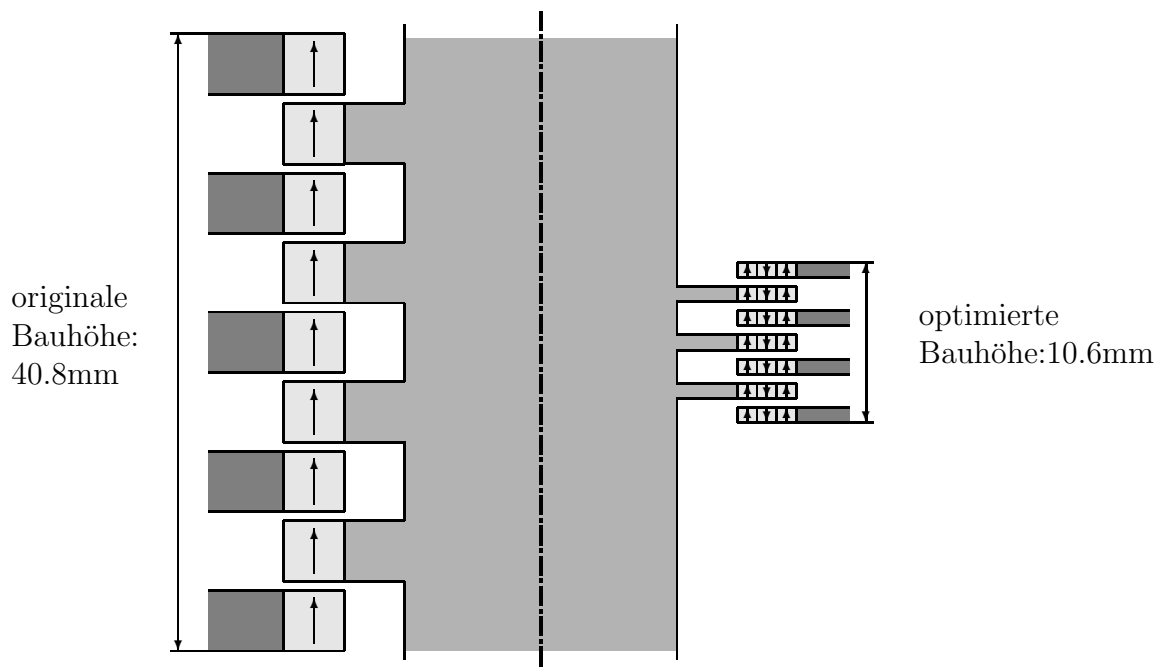


Fig. 8: Querschnitt des vorhandenen Lager(links) und ein optimierter Entwurf (rechts)

Eine praktische Herausforderung stellt die Fertigung solch dünner Ringe dar. Im Forschungszentrum Jülich werden zur Zeit Lagerprototypen mit dünnen Magnetringen gefertigt und erprobt.

7 Zusammenfassung

Die Einführung einer normierten Darstellung ermöglicht Aussagen über optimale Magnetgeometrien bezüglich der Radialsteifigkeit. Dem Konstrukteur ist damit eine Entwurfshilfe in die Hand gegeben. Das Optimum des Radialsteifigkeit/Volumen-Verhältnisses liegt bei Ringhöhen und -breiten in der Größenordnung der Spaltweite. Damit lassen sich die Abmessungen von passiven Magnetlagern deutlich reduzieren. So zeigt das Beispiel der Turbomolekularpumpe eine Reduktion auf 26% der ursprünglichen Lagerhöhe. Man steht jedoch vor der technischen Herausforderung, derartig filigrane Strukturen zuverlässig und kostengünstig herstellen zu können. Sollten sich diese technische Hürden nehmen lassen, so stehen den passiven Lagern noch viele Einsatzgebiete offen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Lang, M.; Gasch, R.: Ermittlung der Steifigkeitsmatrizen von einfachen permanentmagnetischen Lagern für Rotoren. *Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)* Bd.81(1999); Nr. 6, S.385-39
- [2] Yonnet, J.P.: *Etude des paliers magnetiques passifs*. Dissertation, Grenoble 1980
- [3] Marinescu, M.: *Analytische Berechnungen und Modellvorstellungen für Systeme mit Dauermagneten und Eisen*. Dissertation, Braunschweig 1979.
- [4] Fremerey, J.K: *Berührungslose permanentmagnetische Lager*. Sonderdruck aus Themenband *Luftlagerungen*, Hrsg. W.J. Bartz, expert - Verlag, Renningen - Malsheim, 1993 bzw.: <http://www.magnetlager-juelich.de/0b30.pdf>