

# ERFAHRUNGEN BEI DER ANWENDUNG PASSIVER RADIALMAGNETLAGER IN EINEM SCHWUNGRADSPEICHER

**N.Hübner, M.Paditz**

*Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik*

*EAAT GmbH Chemnitz*

*Annaberger Str.231*

*D-09120 Chemnitz*

*Tel. +49 371 5301911, Fax: +49 3715301913*

*Email: eaatgmbh@t-online.de*

## **Kurzfassung**

Von EAAT wurde ein magnetisch gelagertes Schwungradenergiespeichersystem entwickelt. Die Schwungradwelle läuft dabei im Vakuum. Um die zur Lagerung erforderliche Leistung gering zu halten, wurden passive, d.h. permanentmagnetische Radiallager eingesetzt. Die axiale magnetische Lagerung wurde durch ein aktives (elektromagnetisches) Axiallager realisiert. In diesem Beitrag soll auf den Aufbau des Systems und die Erfahrungen im Einsatz des Systems eingegangen werden. Einen Schwerpunkt bilden dabei die Verluste im System, sowie deren Abhängigkeiten von z.B. Temperatur und Rotordynamik.

## **1 Einleitung**

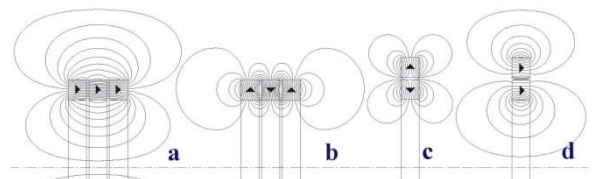
Magnetlager bieten viele Vorteile gegenüber Gleit- oder Wälzlagern. Zum einen sind sie aufgrund des fehlenden mechanischen Kontakts verschleißfrei und wartungsarm. Zum anderen können mit ihnen höchste Drehzahlen ( $>100.000 \text{ min}^{-1}$ ) erreicht werden. Dies ist möglich, da es zu keiner mechanischen Reibung im Lager kommt. Aufgrund des Bedarfes an Schmiermitteln, ist der Einsatz von Wälz- oder Gleitlagern im Vakuum nur in aufwändigen Spezialausführungen möglich. Da Magnetlager keine Schmiermittel benötigen, ist ihr Einsatz im Vakuum somit ohne größeren Aufwand möglich.

Wenn in einer Anwendung auf eine hohe Lagegenauigkeit der Welle verzichtet werden kann, bieten sich passive Lager an.

Bei diesen beruht die Lagerung auf den Kräften von Permanentmagneten. Dabei entsteht dann eine Kraft, wenn eine Auslenkung der sich gegenüber angeordneten Magnetringe auftritt. D.h. es tritt eine der Auslenkung proportionale rücktreibende Kraft auf. Diese kostengünstige Lagerung kann entweder in axialer Richtung oder in radialer Richtung erfolgen.

## **2 Passive Radiallager**

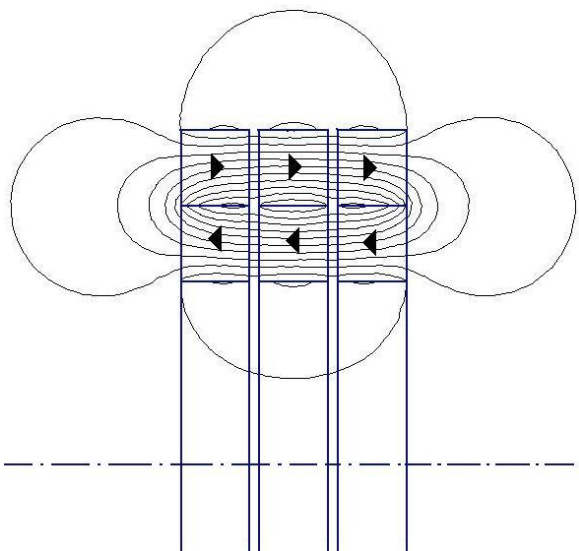
Permanentmagnetische Radiallager lassen sich in verschiedenen Varianten realisieren. Dabei können sowohl anziehende als auch abstoßende Kräfte zur Lagerung genutzt werden. Bild 1 zeigt 4 Möglichkeiten zur Ausbildung radial zentrierender Kräfte zwischen Permanentmagnetringen.



**Bild 1:** Bauformen passiver Radiallager

Die Abbildungen c und d stellen jeweils zwei Permanentmagnetringe dar, die ineinander gesetzt sind. Der innere Magnetring, welcher sich auf der Welle befindet, wird durch abstoßende Kräfte gegenüber dem äußeren Ring radial zentriert. Dieser äußere Ring wird jeweils im Gehäuse befestigt. Bei beiden Varianten

(c und d) ist ein radialer Luftspalt zwischen drehendem und stehendem Magnetring vorhanden. Aufgrund der hohen Drehzahlen ist es notwendig, die Permanentmagnetringe, die auf dem Rotor angeordnet sind, zu bandagieren. Dies hat zur Folge, dass bei den Varianten c und d der radiale Abstand zwischen den beiden Magnetringen sehr groß werden würde und somit die Radialkraft sehr gering ausfällt. Die Varianten c und d sind somit ungeeignet für die Anwendung einer hochtourig rotierenden Welle. In Variante a und b sind die Permanentmagnetringe axial hintereinander angeordnet. Dabei befindet sich z.B. der mittlere Magnetring auf der Welle, während die beiden äußeren im stehenden Teil befestigt sind. Beide Bauformen haben den Vorteil, dass durch eine Bandage am Umfang der rotierenden Magnete die Größe des Luftspaltes zwischen stehendem und rotierendem Magnet nicht beeinflusst wird. Beide Varianten unterscheiden sich dabei in der Art der Magnetisierung. Variante a hat den Vorteil, dass durch das Ineinanderschrumpfen zweier entgegengesetzt magnetisierter Ringe die Lagersteifigkeit mehr als verdoppelt werden kann [2] (Bild 2).

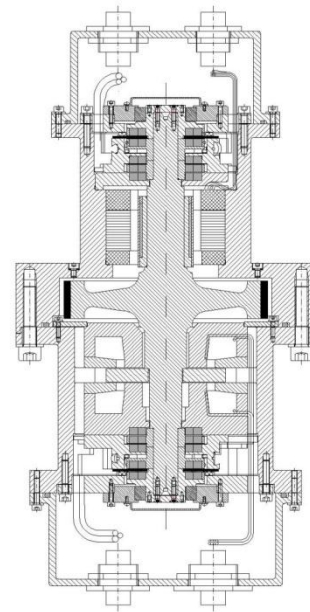


**Bild 2:** Axial angeordnetes Doppelringlager

### 3 Aufbau des Schwungradsystems

Das Schwungrad ist vollständig magnetisch gelagert. Dabei werden für die radiale Lagerung passive, d.h. permanent-

magnetische Lager und für die axiale Lagerung ein aktives, d.h. elektromagnetisches Lager verwendet. Die radialen Lager sind nach dem Prinzip in Bild 2 aufgebaut. Das axiale Lager besteht aus einer Stahlscheibe die auf der Welle angebracht ist und der gegenüber sich auf beiden Seiten axial je ein Elektromagnet befindet.



**Bild 3:** Aufbau des Schwungradsystems

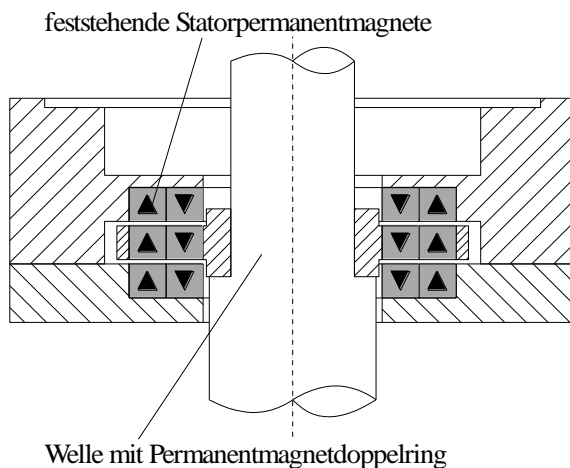
Die zur Lageregelung notwendige axiale Lagefassung erfolgt mittels eines Wirbelstromlagesensors an einem Wellenende. Um das Verhalten der Welle im Betrieb in radialer Richtung beobachten zu können, wurden außerdem in der Nähe der beiden Radiallager optische Lagefassungssysteme untergebracht. Mit diesen ist es möglich auftretende Schwingungen und Lageabweichungen zu erkennen. Es kann jedoch nicht aktiv Einfluss auf das Laufverhalten der Welle in radialer Richtung genommen werden. Um evtl. auftretende Schwingungen zu dämpfen wurden in unmittelbarer Nähe zu den beiden Radiallagern Dämpfungssysteme eingesetzt, die auf dem Prinzip der Wirbelströme arbeiten. Auf der Welle befinden sich jeweils zwei Paar Magnetringe zwischen denen sich ein magnetisches Feld ausbildet. In diesem magnetischen Feld befindet sich eine im Gehäuse befestigte Kupferscheibe.

Kommt es nun zu radialen Bewegungen der Welle, so werden aufgrund der Relativbewegung von Magnetpaar zu Kupferscheibe in der Kupferscheibe Spannungen induziert. Diese Spannungen rufen Wirbelströme hervor. Diese Wirbelströme wirken Ihrer Ursache entgegen und dämpfen somit die Schwingung der Welle.

Zum Antrieb des Schwungrades ist auf der Welle ein Synchronmotor angebracht. Dieser wird im Falle der Energieentnahme als Generator verwendet.

### 3.1 Dimensionierung und Aufbau der Radiallager

Die beiden Radialmagnetlager bestehen jeweils aus 3 Permanentmagnetdoppelringen. Zwei axial magnetisierte Permanentmagnetringe werden mit entgegengesetzter Polarisierung ineinander gesetzt. Die drei Doppelringe werden wie in Fig.4 dargestellt axial hintereinander angeordnet. Dabei ist der mittlere der drei Ringe fest auf dem Rotor befestigt und mit einer Bandage versehen, die die wirkenden Fliehkräfte aufnimmt. Die beiden anderen Magnetringe sind im Stator untergebracht. Der axiale Luftspalt zwischen den Magnetscheiben wird auf 0,7mm eingestellt.



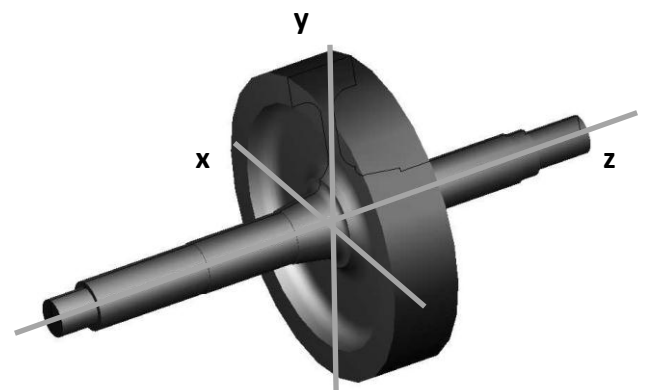
**Bild 4 :** Aufbau der passiven Radiallager

Die Schwungradwelle wird senkrecht gelagert. Somit wird die Gewichtskraft  $F_G$  der Welle zunächst vom Axiallager aufgenommen. Das Schwungradgehäuse ist jedoch so aufgenommen, dass es um  $\alpha = \pm 30^\circ$  geneigt werden kann. Dabei werden auch die beiden passiven Radiallager mit einem Teil der Gewichtskraft belastet.

$$F_{rad} = F_G \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Beim maximalen Neigungswinkel der Welle werden die beiden Radiallager zusammen mit der Hälfte der Gewichtskraft der Welle beaufschlagt.

Eine Kippbewegung der rotierenden Welle führt zudem zu einer zusätzlichen Belastung der Radiallager durch wirkende Kreismomente.



**Bild 5:** Schwungrad: Achsdefinition

Dieses Moment lässt sich berechnen zu

$$M_x = \omega_z \cdot \omega_y \cdot J_z \quad (2)$$

Weiterhin entsteht ein Beschleunigungsmoment beim Kippen der Welle. Dieses ist aber aufgrund der sehr geringen Winkelbeschleunigung vernachlässigbar klein. Insgesamt wirken auf die beiden Radiallager Kräfte von jeweils bis zu 20 N. Die beiden verwendeten Radiallager weisen eine Lagersteifigkeit von je 150N/mm auf. Damit ist bei den zu erwartenden Lagerkräften mit einer radialen Auslenkung von weniger als 150  $\mu\text{m}$  zu rechnen. Die Fanglager lassen jeweils einen Bewegungsfreiraum von ca.  $\pm 300\mu\text{m}$  zu.

Bei aktiven Radiallagern kann durch eine Anpassung des Lagesollwertes erreicht werden, dass die Welle im Fanglagermittelpunkt läuft, auch dann, wenn Fanglager- und Magnetlagermittelpunkt nicht exakt gleich sind. Beim passiven Radiallager jedoch richtet sich die Welle nach dem Mittelpunkt des Magnetlagers aus. Es ist daher besonderes Augenmerk auf die Einstellung der Fanglager zu richten.

### 3.2 Dimensionierung des Axiallagers

Das aktive Axiallager muss nicht nur die Gewichtskraft, die aus der Masse der Welle resultiert, aufnehmen, sondern auch die axialen Kräfte, die durch die Permanentmagnetringe der Radiallager hervorgerufen werden. Zwischen den axial angeordneten Doppelringmagneten wirken anziehende Kräfte. Die Kräfte, die auf den auf der Welle befestigten Magneten wirken heben sich auf, wenn der Abstand zu den beiden im Stator befestigten Magneten gleich ist. Sobald jedoch eine Auslenkung aus dieser Mittellage auftritt, treten axiale Kräfte auf. Durch eine Anpassung des Lagesollwertes kann erreicht werden, dass die auftretenden permanentmagnetischen Kräfte der wirkenden Gewichtskraft entgegenwirken. Somit kann der Leistungsbedarf des Axialmagnetlagers auf ein Minimum reduziert werden. Ist das axiale Magnetlager jedoch abgeschaltet, so liegt die Welle im axialen Fanglager. Damit besteht im Radiallager eine relativ große Auslenkung des Rotormagnetringes aus der Mitte der beiden Statorringe. Die Permanentmagnetringe rufen somit eine große Axialkraft hervor, die beim Einschalten des Axiallagers überwunden werden muss. Diese Kraft liegt in der Größenordnung von etwa 250 bis 350N.

### 4 Betrieb im Vakuum

Ein Grund für die Verwendung von Magnetlagern ist der Betrieb des Schwungrades im Vakuum. Dafür wird im Gehäuse der Luftdruck auf einen Wert von

$<0,5\text{mbar}$  reduziert. Dies bringt vor allem eine Reduzierung der Luftreibungsverluste mit sich. Bild 6 zeigt, wie sich sonst die Luftreibungsverluste auf den Gesamtverlusthaushalt auswirken würden.

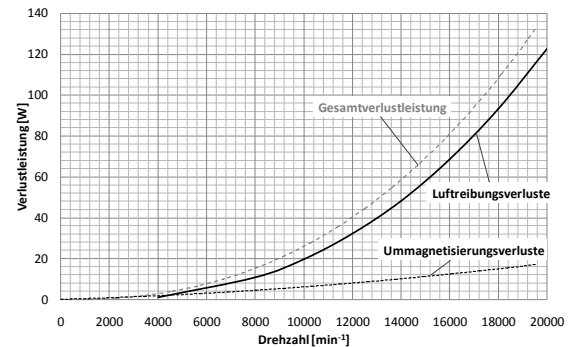


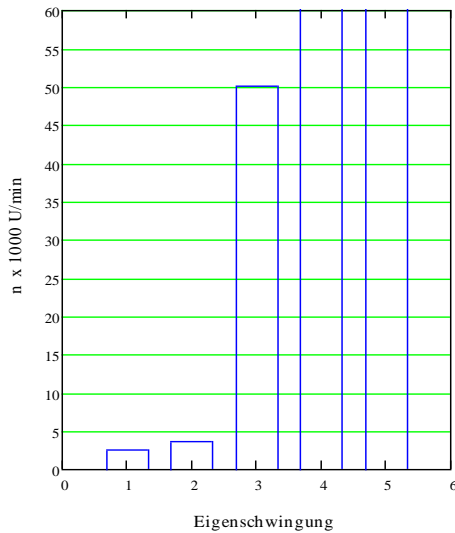
Bild 6: Luftreibungsverluste

Das Diagramm wurde aufgenommen, indem bei  $20.000\text{min}^{-1}$  ein Druckausgleich mit dem Umgebungsluftdruck durchgeführt wurde und die Auslaufkurve bei abgeschaltetem Motor/Generator aufgenommen wurde. Ein Beschleunigen des Schwungradsystems bis zu einer Drehzahl von  $20.000\text{min}^{-1}$  bei normalem Luftdruck wäre aufgrund der hohen Luftreibungsverluste mit dem eingebauten Synchronmotor gar nicht möglich. Bereits bei einer Drehzahl von  $10.000\text{min}^{-1}$  stößt der Motor an seine Drehmomentgrenze. Im Vakuum erreicht das Schwungrad jedoch ohne Weiteres seine max. Betriebsdrehzahl von  $45.000\text{min}^{-1}$ .

### 5 Rotordynamik

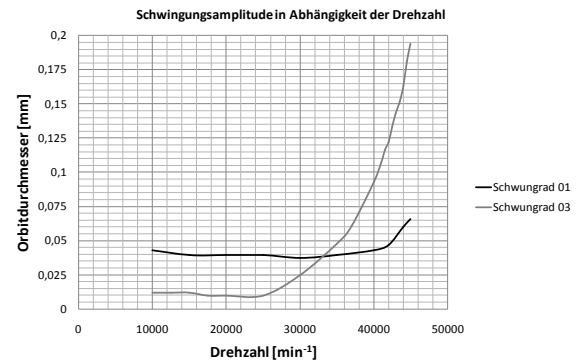
Das Schwungradsystem wird unterkritisch betrieben, d.h. die erste biegekritische Drehzahl liegt oberhalb der max. Betriebsdrehzahl.

Das Schwungrad soll zwischen einer Minimaldrehzahl von ca.  $10.000\text{min}^{-1}$  und der Maximaldrehzahl von  $45.000\text{min}^{-1}$  betrieben werden. In diesem Bereich liegt wie in Bild 7 dargestellt keine Eigenfrequenz des Rotors.



**Bild 7:** Rotoreigenfrequenzen

Die Eigenschwingungen 1 und 2 in Bild 7 geben die beiden Festkörpereigenfrequenzen des Systems an. Diese liegen bei ca.  $2600$  bzw.  $3700 \text{ min}^{-1}$  und damit unterhalb des normalen Betriebsbereichs. Trotz der vorgesehenen Dämpfungseinrichtung lässt sich ein leichter Fanglagerkontakt beim Durchfahren dieser beiden Resonanzen nicht vermeiden. Aufgrund der geringen Drehzahlen ist aber mit keinem Verschleiß des Fanglagers zu rechnen. Radiallager mit einer höheren Steifigkeit könnten evtl. ein Anlaufen im Fanglager verhindern, haben aber auch erhebliche negative Auswirkungen. Zum einen würde sich das Lagervolumen erhöhen und damit der notwendige Bauraum. Zum Anderen bewirkt eine Versteifung der Lager, dass die Frequenzen der Festkörpereigenfrequenzen angehoben werden und somit möglicherweise im Bereich der Betriebsdrehzahlen zwischen  $10.000$  und  $45.000 \text{ min}^{-1}$  liegen. Weiterhin haben Radiallager mit einer höheren radialen Steifigkeit auch eine höhere axiale (unerwünschte) Steifigkeit, was dazu führt, dass das Axiallager größere Kräfte kompensieren können muss. Die erste Biegekritische der Schwungradwelle wurde bei einer Drehzahl von etwa  $50.000 \text{ min}^{-1}$  berechnet. Es ist dennoch schon bei geringeren Drehzahlen eine Aufweitung des Orbits, in dem sich die Welle bewegt, erkennbar.

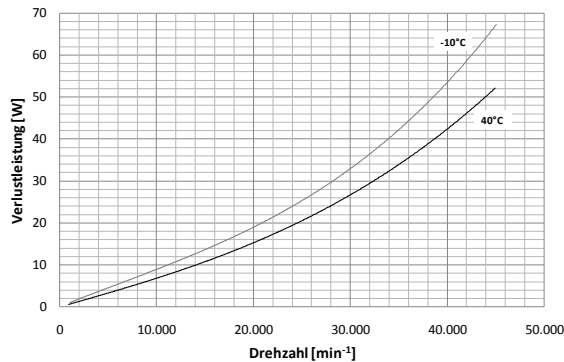


**Bild 8:** Veränderung des Wellenorbits beim Hochlauf

Am Beispiel von 2 Schwungradsystemen, die sich etwas in der Größe des Trägheitsmomentes des Schwungradkörpers unterscheiden, ist in Bild 8 die Abhängigkeit der Größe des Orbits, in dem sich die Welle bewegt, von der Drehzahl dargestellt. In beiden Fällen lässt sich feststellen, dass der Orbit ab einer bestimmten Drehzahl anfängt sich aufzuweiten. Bei dem Schwungrad mit dem höheren Trägheitsmoment (Schwungrad 03 in Bild 8) beginnt die Vergrößerung des Orbits bei einer geringeren Drehzahl. Der Grund dafür ist, dass bei diesem Schwungrad die erste biegekritische Drehzahl niedriger ist als beim Schwungrad 01. Dieses Verhalten hat auch Auswirkungen auf die Verluste im rotierenden System. Um eine höhere Energiespeicherkapazität zu erreichen wurde beim Schwungrad 3 das Trägheitsmoment um etwa 10% gegenüber dem des Schwungrad 1 erhöht. Die damit aber erfolgte Herabsetzung der ersten biegekritischen Drehzahl und der somit vergrößerten Schwingungsamplitude bei hohen Drehzahlen, führen insgesamt zu höheren Verlusten. Der Vorteil durch die Erhöhung des Trägheitsmoments wird durch die höheren Verluste nahezu vollständig aufgehoben.

## 6 Temperaturabhängigkeit der Verluste

Beim Betrieb des Schwungradsystems bei unterschiedlichen Systemtemperaturen zwischen  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $+40^{\circ}\text{C}$  konnte eine deutliche Abhängigkeit der Verluste von der Temperatur festgestellt werden.



**Bild 9:** Temperaturabhängigkeit der Verluste

Die Abhängigkeit der Verluste lässt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen. Geht man davon aus, dass die Verluste im rotierenden System zum größten Teil auf Wirbelströme zurückzuführen sind, so lassen sich wenigstens zwei Effekte finden, mit denen sich die Temperaturabhängigkeit dieser Verluste erklären lassen.

Der spezifische elektrische Widerstand von Metallen nimmt mit zunehmender Temperatur zu. Das führt dazu, dass eine induzierte Spannung bei höheren Temperaturen einen umso kleineren Wirbelstrom antreibt. Die Wirbelstromverluste nehmen somit bei höherer Temperatur ab.

$$P_W = U_i / R(\theta) \quad (3)$$

Auch die magnetischen Eigenschaften eines Magnetwerkstoffes werden durch seine Temperatur beeinflusst. So nimmt z.B. die Remanenzinduktion  $B_r$  mit sinkender Temperatur zu. Diese Remanenzinduktion eines Magnetes bestimmt die Höhe des Flusses die sich im passiven Radiallager ausbildet. Durch Schwingungen der Welle werden in metallischen Bauteilen, die die Permanentmagnete umgeben, Spannungen induziert. Nimmt nun bei sinkender Temperatur die Remanenzflussdichte zu, so steigt bei gleichem Schwingungsverhalten

der Welle die induzierte Spannung in den metallischen Teilen. Eine besondere Rolle spielt in diesem Zusammenhang die radiale Dämpfungseinrichtung. Auf der Welle sind jeweils zwei Paar Magnetträger angeordnet. Zwischen diesen beiden Magnetsystemen ist ein Spalt von etwa 2,5mm. In diesem Spalt befindet sich eine ca. 1,5mm starke Kupferscheibe. In dieser Kupferscheibe werden Wirbelströme induziert, wenn die Welle radiale Schwingungen ausführt. Die Wirbelströme wirken ihrer Ursache entgegen und dämpfen somit die Schwingung der Welle. Der spezifische elektrische Widerstand von Kupfer nimmt bei Erwärmung von  $20^{\circ}\text{C}$  auf  $40^{\circ}\text{C}$  um ca. 8% zu. Beim Abkühlen von  $20^{\circ}\text{C}$  auf  $-10^{\circ}\text{C}$  sinkt dieser um etwa 11%. Die Remanenzinduktion der verwendeten NdFeB-Magnete erhöht sich beim Abkühlen auf  $-10^{\circ}\text{C}$  um knapp 3% während der Wert um etwa 2% abnimmt, wenn die Magnete auf  $40^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden.

Veränderung der Wirbelstromverluste bei  $-10^{\circ}\text{C}$  bzw.  $+40^{\circ}\text{C}$

$$P_{W-10^{\circ}\text{C}} \sim B_{r-10^{\circ}\text{C}}^2 \cdot \frac{1}{R_{-10^{\circ}\text{C}}} \quad (4)$$

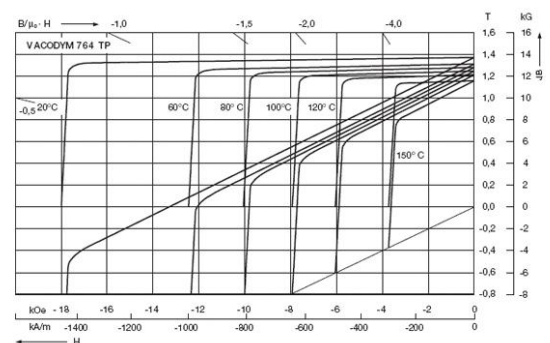
$$P_{W-10^{\circ}\text{C}} \sim (B_{r20^{\circ}\text{C}} \cdot 1,03)^2 \cdot \frac{1}{R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot 0,89}$$

$$P_{W-10^{\circ}\text{C}} = 1,19 \cdot P_{W20^{\circ}\text{C}}$$

$$P_{W40^{\circ}\text{C}} \sim B_{r40^{\circ}\text{C}}^2 \cdot \frac{1}{R_{40^{\circ}\text{C}}} \quad (5)$$

$$P_{W40^{\circ}\text{C}} \sim (B_{r20^{\circ}\text{C}} \cdot 0,98)^2 \cdot \frac{1}{R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot 1,08}$$

$$P_{W40^{\circ}\text{C}} = 0,89 \cdot P_{W20^{\circ}\text{C}}$$



**Bild 10:** Temperaturabhängigkeit der Remanenzinduktion [3]



Mit den beiden genannten Effekten lassen sich Veränderungen der auftretenden Verluste im rotierenden System von etwa 20 bis 30% erklären. Es wurden aber bei einem Schwungrad auch deutlich höhere Abweichungen festgestellt. Es ist nicht auszuschließen, dass das auch auf eine thermische Unwucht zurückzuführen ist.

## **7 Zusammenfassung**

Bei EAAT wurden erstmalig passive, permanentmagnetische Radiallager für hohe Drehzahlen realisiert. Diese fanden Anwendung in einem Schwungradenergiespeicher. In diesem Beitrag wurde auf einige grundlegende Erkenntnisse bei der Verwendung passiver Lager, dem Verhalten des Systems sowie verschiedenen Abhängigkeiten auf die Verluste im System eingegangen.

## **8 Literatur**

- [1] Rudolph, J.: Vergleich von magnetischen Lagern und Untersuchungen zur Dämpfung magnetisch gelagerter Systeme. Diplomarbeit 2009
- [2] Fremerey, J.K.: Permanentmagnetische Lager, 2000
- [3] VAC Vacuumschmelze GmbH & Co. KG <http://www.vacuumschmelze.de/index.php?id=226&page=2> verfügbar am 19.08.2011