

# Entwicklung und Bau eines neuartigen magnetischen Momentenlagers

Holger NEUMANN\*, Klaus PANTKE\*\*, Jürgen FRANTZHELD\*\*\*,  
Frank WORLITZ\*

\* *Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik  
Hochschule Zittau/Görlitz  
Email: H.Neumann@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de*

\*\* *thyssenkrupp Rothe Erde GmbH  
Email: Klaus.Pantke@thyssenkrupp.com*

\*\*\* *thyssenkrupp Transrapid GmbH  
Email: Juergen.Frantzheld@thyssenkrupp.com*

## Kurzfassung

In der Regel wird die vollständig aktive Magnetlagerung eines Rotors durch zwei Radial- und ein Axialmagnetlager realisiert. Für Anwendungen, bei denen die axiale Ausdehnung des Rotors zur Unterbringung eines zweiten Radiallagers nicht ausreicht, sind alternative Lösungsansätze notwendig. Nachfolgend wird die Auslegung, Simulation und experimentelle Validierung am Beispiel eines Demonstrators in Außenläuferbauweise vorgestellt. Außerdem werden der Bau und die Inbetriebnahme eines Prototyps zur Lagerung eines Computertomographen vorgestellt.

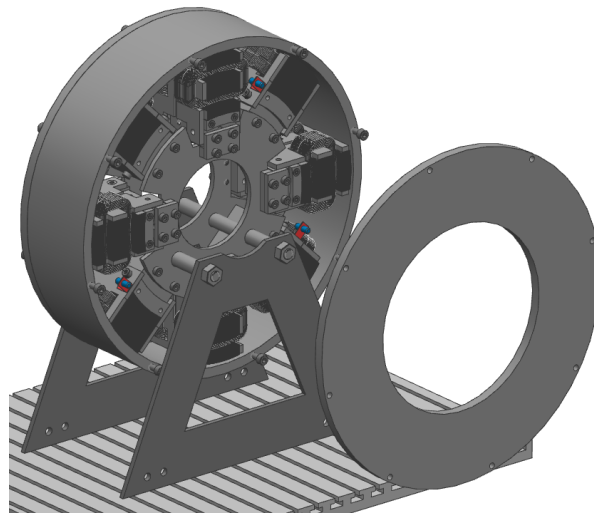
## 1 Einleitung

Das Ziel eines gemeinsamen Vorhabens zwischen dem IPM und der thyssenkrupp Rothe Erde GmbH war es, ein neuartiges magnetisches Momentenlager als Alternative für Großwälzlager (Durchmesser ca. 1 m) zu entwickeln. Eine typische Anwendung eines solchen magnetischen Momentenlagers ist z. B. in medizinischen Computertomographen (CT). Durch so ein berührungsloses Magnetlager ist ein verschleißfreier und geräuschloser Betrieb eines CT-Systems möglich, dies kann einen erheblichen Wettbewerbsvorteil für die Hersteller von CT-Systemen darstellen. Neben der Geräuschreduzierung ist ein weiteres Ziel, eine Steigerung der Drehzahlen von  $n = 150 \text{ min}^{-1}$  auf  $n = 300 \text{ min}^{-1}$  zu ermöglichen. Die Entwicklung und der Bau eines solchen Lagers ist jedoch mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden. Es ist daher sinnvoll, möglichst viele Fragestellungen im Vorfeld durch Simulationsmodelle abzudecken. Die Validierung dieser Modelle kann anschließend an Modellprüfständen erfolgen, bevor ein Lager in originaler Größe gebaut wird. Im Rahmen dieses Projektes wurde das Regelungssystem für ein großes Momentenlager am IPM entwickelt und auf Basis eines Kleinversuchsstandes (ZML320) validiert. Anschließend erfolgte bei der thyssenkrupp Rothe Erde GmbH der Bau eines großen Magnetlagers, welches mit dem zuvor am IPM entwickelten Regelungsmodell in Betrieb genommen wurde. In diesem Beitrag werden die Arbeiten am IPM zur Regelungsentwicklung sowie der Aufbau des großen Versuchslagers bei der thyssenkrupp Rothen Erde GmbH vorgestellt.

## 2 Kleinversuchsstand ZML320

### 2.1 Aufbau

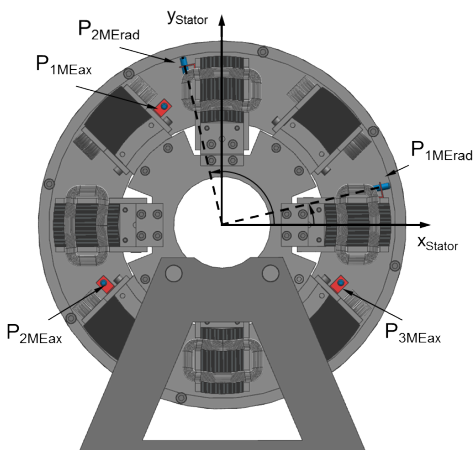
In Abb. 1 ist der Aufbau des vollständig aktiv magnetgelagerten Außenläufers dargestellt. Der Rotor besteht aus einem radialen und zwei axialen Rückschlüssen. Die radiale Lagerung



**Abb. 1:** Vollständig aktiv magnetgelagerter Außenläufer

erfolgt durch vier Radialmagnete, wobei die zwei gegenüberliegenden Magnete differentiell verschaltet sind und damit zwei Lagerachsen gebildet werden. Diese sind jeweils um  $45^\circ$  gegenüber der Wirkrichtung der Gewichtskraft gedreht angeordnet. Zur axialen Stabilisierung dienen acht Axialmagnete, die zu vier Lagerachsen differentiell verschaltet sind. Sowohl die axialen als auch die radialen Lagerachsen werden mit separater Grunderregung von 3 A und Steuerströmen von  $\pm 3$  A betrieben.

Die Herausforderung bei dieser Lageranordnung besteht darin, dass sowohl axiale als auch radiale Auslenkungen nicht in Richtung der Lagerachsen gemessen werden können, da die Abstandssensoren aus Platzgründen im Freiraum zwischen den Magneten untergebracht sind (Abb. 2).



**Abb. 2:** Einbauposition der Lagesensoren

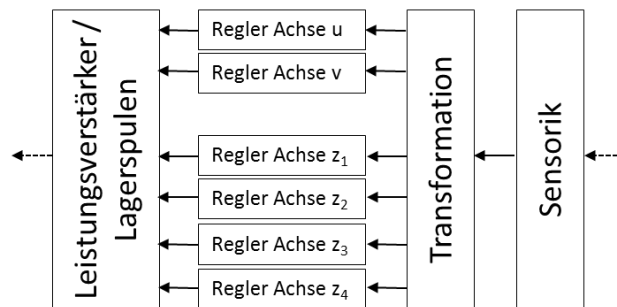
**Tab. 1:** Ausgewählte Versuchsstandsparameter

| Parameter             |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| Rotormasse            | 16,6 kg                  |
| Rotordurchmesser      | 320 mm                   |
| Nenn Drehzahl         | $350 \text{ min}^{-1}$   |
| Tragkraft, axial      | $4 \times 470 \text{ N}$ |
| Nennluftspalt, axial  | $300 \mu\text{m}$        |
| Tragkraft, radial     | $2 \times 590 \text{ N}$ |
| Nennluftspalt, radial | $300 \mu\text{m}$        |

Es werden drei Sensoren zur Bestimmung der axialen Position und der Kippung des Rotors verwendet. Die radiale Position wird mit zwei Sensoren erfasst. Die fünf Sensorsignale bilden die Eingangsgrößen für einen Transformationsalgorithmus, mit dem die Lage des Rotors und die sich ergebenden Luftspalte an den einzelnen Magneten berechnet werden. Diese stellen die Eingangsgröße für die Lageregelung dar. In Tab. 1 sind ausgewählte Parameter des Kleinversuchsstands zusammengestellt.

## 2.2 Messsystemauswertung und Reglerstruktur

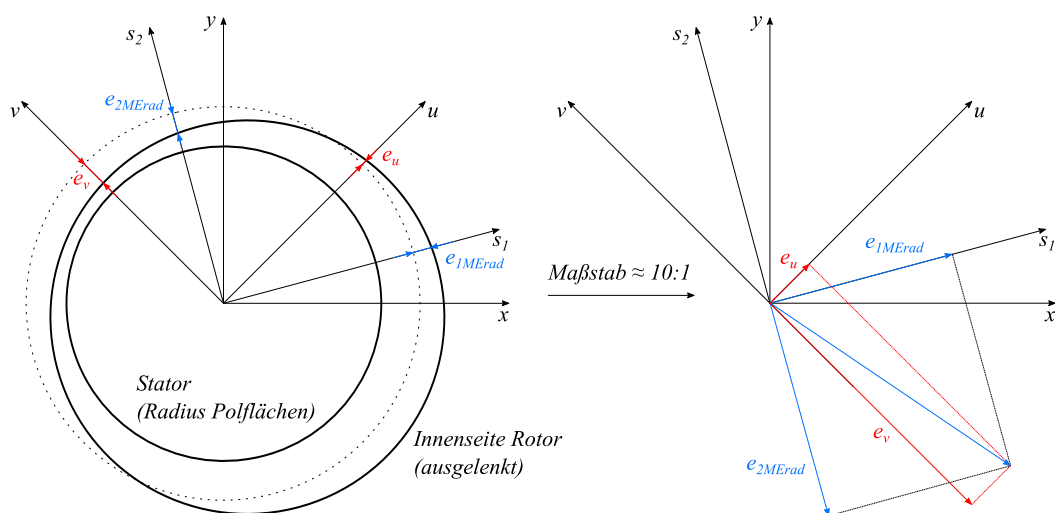
Abb. 3 zeigt das Regelkonzept am Kleinversuchsstand ZML320. Die Achsen  $u$  und  $v$  bezeich-



**Abb. 3:** Regelkonzept

nen die beiden radialen Lagerachsen und  $z_1$  bis  $z_4$  die axialen Lagerachsen.

Wie aus Abb. 2 und 3 zu entnehmen ist, müssen die Messwerte der Lagesensoren durch eine geeignete Transformation in Auslenkungen an den Lagerachsen transformiert werden. Aufgrund von konstruktiven Gegebenheiten (Fanglagerbegrenzung) sind die maximalen Verkippungen des Rotors auf ca.  $0,1^\circ$  begrenzt. Aus diesem Grund kann die Auswertung der Messsignale axial und radial entkoppelt betrachtet werden. In Abb. 4 ist die Vorgehensweise bei der Auswertung der radialen Lage dargestellt. Die Achsen  $u$  und  $v$  stellen die



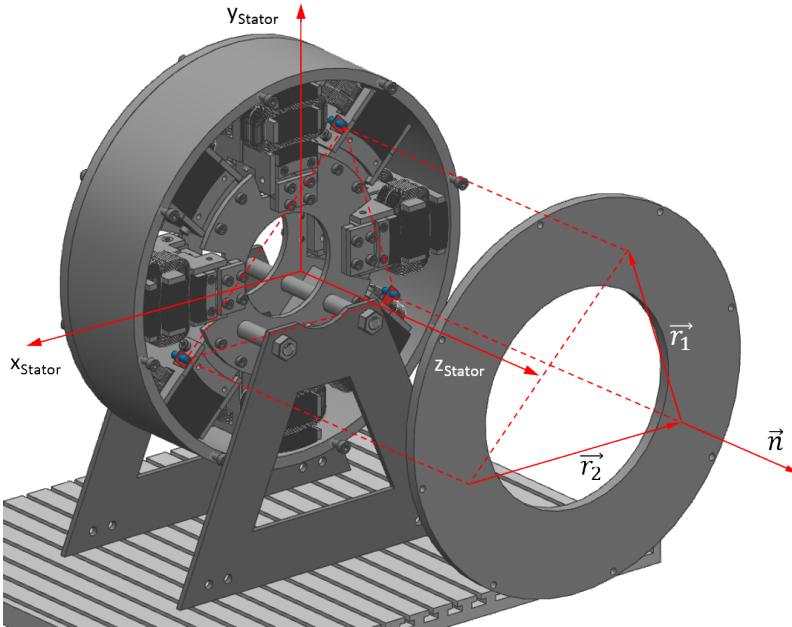
**Abb. 4:** Transformation radial

radialen Lagerachsen dar, während die Achsen  $s_1$  und  $s_2$  die Messrichtungen der Sensoren kennzeichnen.

Für die Transformation wird von einem idealen Rundlauf der Messspur ausgegangen. Im ersten Schritt werden die Regelabweichungen in Sensorrichtung ( $e_{1MErad}$  bzw.  $e_{2MErad}$ ) gebildet und anschließend mit Hilfe einer Drehmatrix in die Auslenkungen ( $e_u, e_v$ ) in den radialen Lagerachsen transformiert:

$$\begin{pmatrix} e_u \\ e_v \end{pmatrix} = D \times \begin{pmatrix} e_{1MErad} \\ e_{2MErad} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ausgangspunkt für die Transformation der axialen Auslenkungen ist die Annahme, dass die Innenseiten der axialen Rückschlüsse ideal ebene Messflächen bilden. Bei bekannter Einbauposition der Axialsensoren bezüglich des Statorkoordinatensystem ( $x_{Stator}, y_{Stator}$ ) kann aus den gemessenen Abständen an den drei Axialsensoren ( $P_{1MEax}$  bis  $P_{3MEax}$  in Abb. 2) auf die Ebenenlage der Messfläche geschlossen werden. Abb. 5 zeigt das Prinzip der Lageberechnung. Dabei sind  $\vec{r}_1$  und  $\vec{r}_2$  die Richtungsvektoren, welche die Ebenenla-



**Abb. 5:** Transformation axial

ge bezüglich des Statorkoordinatensystems beschreiben. Diese werden wie folgt berechnet:

$$\vec{r}_1 = \vec{P}_{2MEax} - \vec{P}_{1MEax} \quad (2)$$

$$\vec{r}_2 = \vec{P}_{3MEax} - \vec{P}_{2MEax} \quad (3)$$

Die Vektoren  $\vec{P}_{1MEax}$  bis  $\vec{P}_{3MEax}$  setzen sich dabei aus der  $x$ - $y$ -Einbauposition der Sensoren und den gemessenen Abständen zusammen. Anschließend folgt die Berechnung des Normalenvektors  $\vec{n}$  und des Ebenenparameters  $\lambda$ :

$$\vec{n} = \vec{r}_1 \times \vec{r}_2 \quad (4)$$

$$\lambda = \vec{P}_{1MEax} \circ \vec{n} \quad (5)$$

Aus  $\vec{n}$  und  $\lambda$  können nun bei bekannter Einbauposition der Axialmagnete die entsprechenden Auslenkungen an diesen berechnet werden:

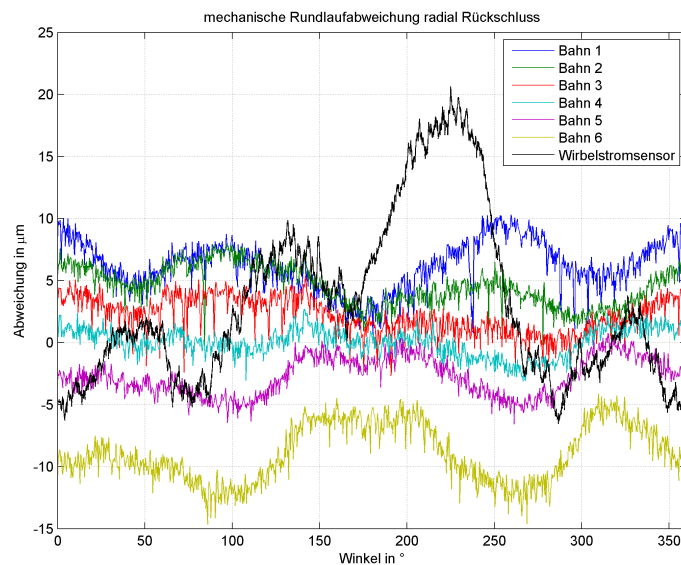
$$z_{k,SEax} = \frac{\lambda - n_x \cdot x_{k,SEax} + n_y \cdot y_{k,SEax}}{n_z} \quad (6)$$

mit  $k = 1 \dots 4$

Die Auslenkungen  $e_u$ ,  $e_v$  und  $z_{k,SEax}$  bilden die Eingangsgrößen für sechs PID-Regler.

### 2.3 Inbetriebnahme des Kleinversuchsstandes und Modellvalidierung

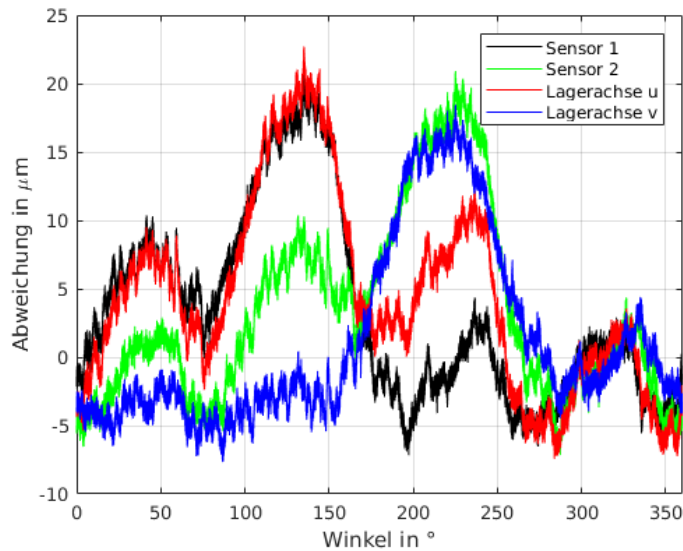
Im Rahmen der Inbetriebnahme des Kleinversuchsstandes wurde die Ebenheit der Axialrückschlüsse und der Rundlauf des Radialrückschlusses mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine vermessen. Parallel dazu wurden Ebenheit und Rundlauf auch mit einem Wirbelstromsensor gemessen. Während es bei der Ebenheitsmessung keine Unterschiede zwischen Wirbelstromsensor und 3D-Koordinaten-Messmaschine gab, traten bei der Vermessung des Rundlaufes erhebliche Abweichungen auf. In Abb. 6 sind die Ergebnisse der Rundlaufvermessung dargestellt. Mit der 3D-Koordinaten-Messmaschine wurden sechs in axialer Richtung gleich-



**Abb. 6:** Gemessene Rundlaufabweichung am radialen Rückschluss

verteilte Bahnen am inneren Umfang des radialen Rückschlusses gemessen. Die mit dem Wirbelstromsensor vermessene Bahn entspricht der Messspur während des Betriebes und befand sich dabei zwischen Bahn 3 und 4. Es ist zu erkennen, dass mit dem Wirbelstromsensor deutlich größere Abweichungen gemessen werden, als mechanisch tatsächlich vorhanden sind. Die Ursache für die größeren gemessenen Abweichungen sind punktuell unterschiedliche elektrische Eigenschaften der Messfläche. Diese können zum Beispiel von der Art der Bearbeitung der Oberfläche abhängen [1, 2].

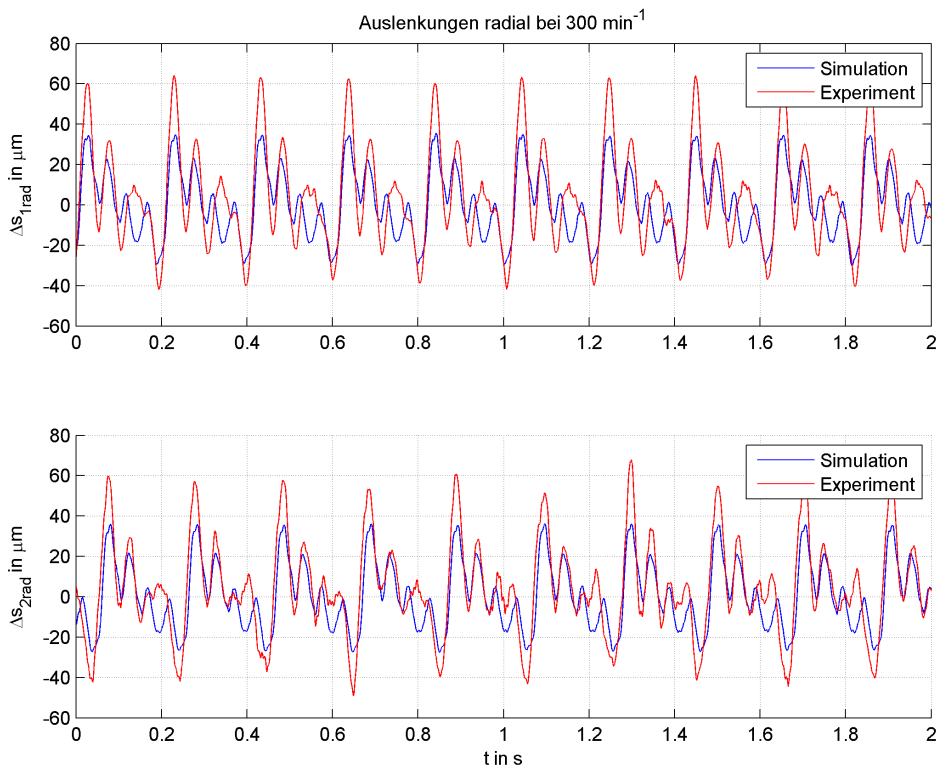
Die gemessenen Abweichungen wurden in die Simulation integriert. Abb. 7 zeigt die an den Sensoren messbare Rundlaufabweichung und die durch sie verursachten Messfehler in den radialen Lagerachsen ( $u$ ,  $v$ ). Für die Berechnung der vom Luftspalt abhängigen Kräfte an den Magneten wurden im Simulationsmodell die mechanisch gemessenen Abweichungen zu



**Abb. 7:** Rundlaufabweichung transformiert in die radialen Lagerachsen

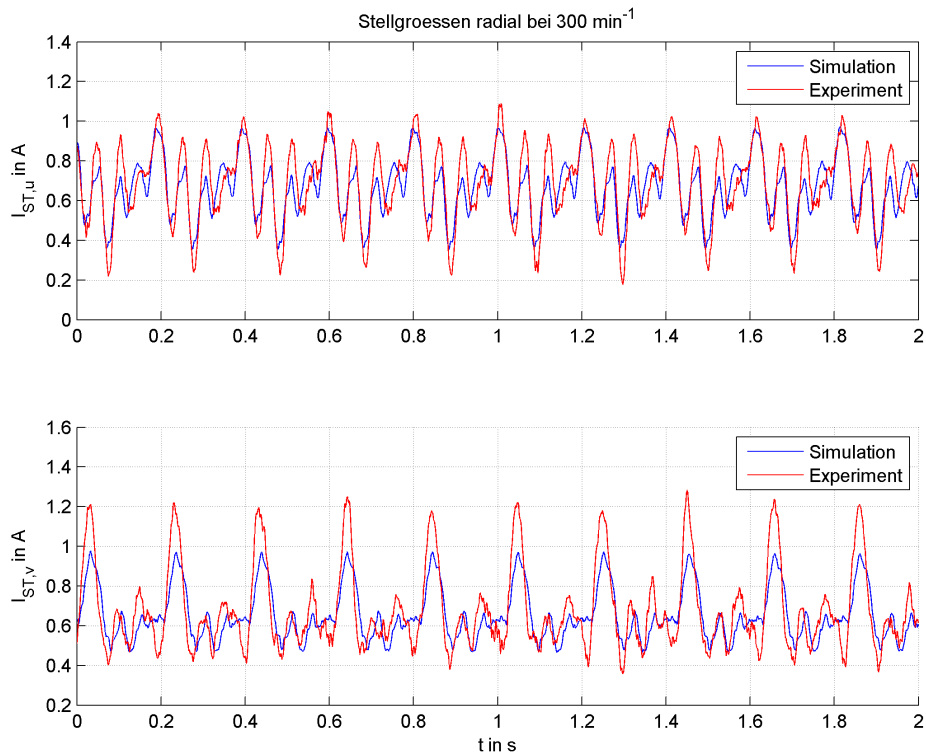
Grunde gelegt. Den Sensorsignalen werden in der Simulation die mit dem Wirbelstromsensor gemessenen Abweichung überlagert.

Abb. 8 zeigt die simulierten und die am Versuchsstand gemessenen Auslenkungen an den radialen Sensoren bei einer Drehzahl von  $300 \text{ min}^{-1}$ . In beiden Signalverläufen ist der Einfluss



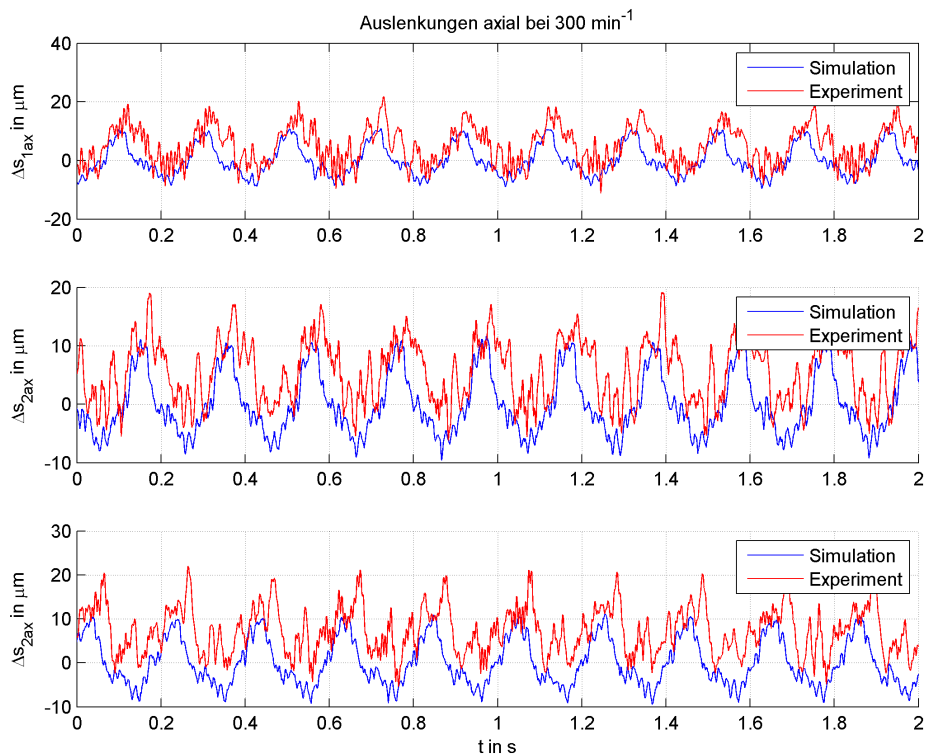
**Abb. 8:** Auslenkungen radial an den Sensoren bei einer Drehzahl von  $300 \text{ min}^{-1}$

der Rundlaufabweichung zu erkennen (vgl. Abb. 6). Die so verfälschten Signale gehen durch die Transformation (Gleichung 1/Abb. 7) als Regelabweichung in die Bildung der Reglerstellgrößen (Sollströme) ein. Diese sind in Abb. 9 dargestellt.



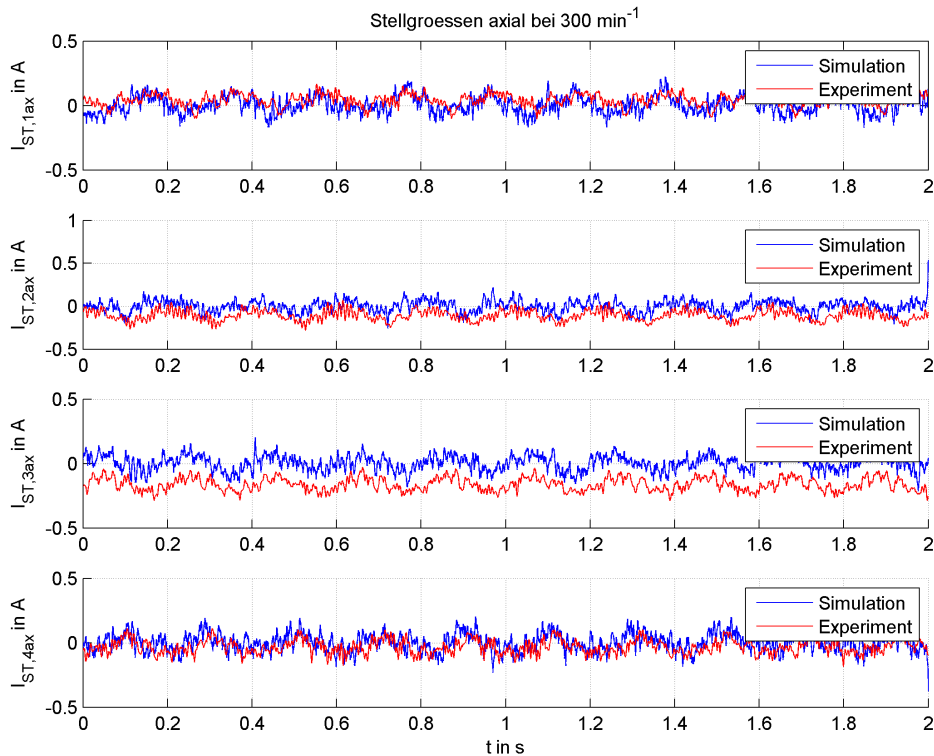
**Abb. 9:** Stellgrößen radial bei einer Drehzahl von 300 min<sup>-1</sup>

In Abb. 10 sind die Signalverläufe an den axialen Sensoren dargestellt. Die Auslenkungen



**Abb. 10:** Auslenkungen axial an den Sensoren bei einer Drehzahl von 300 min<sup>-1</sup>

sind auf die Ebenheitsabweichung der Messfläche des axialen Rückschlusses zurückzuführen. Abb. 11 zeigt die zugehörigen Stellgrößen in den vier Lagerachsen.



**Abb. 11:** Stellgrößen axial bei einer Drehzahl von  $300 \text{ min}^{-1}$

Auffällig ist hier der Offset der Stellgröße ( $I_{ST,3ax}$ ) in der Lagerachse drei. Dieser liegt darin begründet, dass die Magnete in dieser Lagerachse bedingt durch die Montage einen minimalen axialen Versatz zu den drei anderen Magneten aufweisen. Hierdurch ergeben sich in der Solllage an dieser Lagerachse an beiden Magneten unterschiedliche Luftspalte, welche durch den Betrieb mit Grunderregung zu einer permanenten Störkraft führen würden. Durch die Regelung des Steuerstromes wird dieser Effekt ausgeglichen, woraus sich der genannte Offset in dieser Lagerachse ergibt.

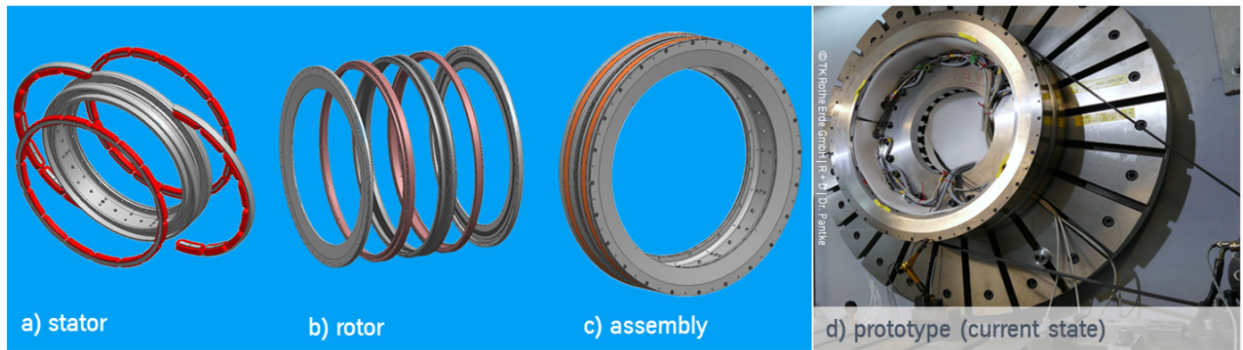
### 3 Bau und Inbetriebnahme des Prototyps

#### 3.1 Aufbau

Der Prototyp hat einen Durchmesser von ca. 1,0 m und besteht aus einem Rotor und einem Stator. Das Lager wurde aus einzelnen Ringen gefertigt. Abb. 12 gibt einen Überblick über die einzelnen Komponenten des Prototyps. Der Innendurchmesser des Prototyps beträgt 998 mm. Die geplante Nutzlast des Rotors beträgt 750 kg. Der Antrieb erfolgt über einen Riemenantrieb, welcher bei CT-Systemen üblich ist.

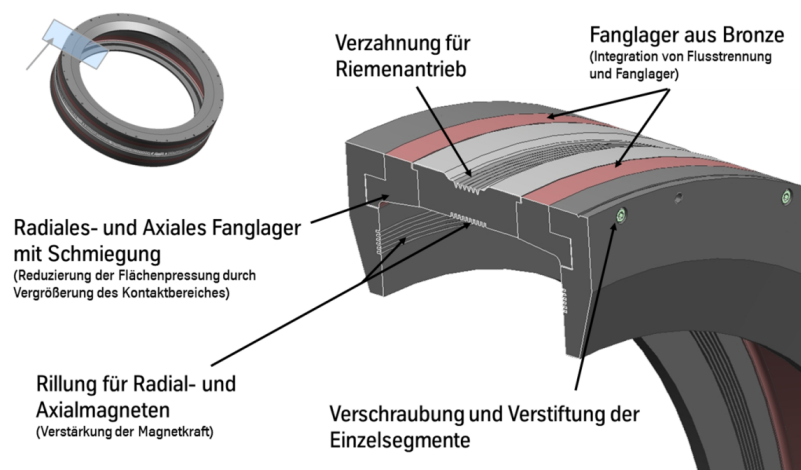
Der Rotor des Prototyps besteht aus mehreren Einzelringkomponenten (siehe Abb. 13). Dies ist dadurch begründet, dass im Rotor gleichzeitig ein Fanglager in Form von Bronzegleitringen integriert wurde. Diese Bronzegleitringe können bei Stromausfall kurzfristig den Rotor mit der Nutzlast abfangen und ein sicheres Abbremsen gewährleisten. Gleichzeitig wird durch diese Bronzelemente eine Flusstrennung des magnetischen Flusses zwischen Axialspulen und Radialspulen erzielt (siehe Beschreibung des Stators, weiter unten). Alle Einzelkomponenten werden untereinander verschraubt. Bei der Konzipierung





**Abb. 12:** Aufbau des Prototypenlagers bei thyssenkrupp Rothe Erde GmbH

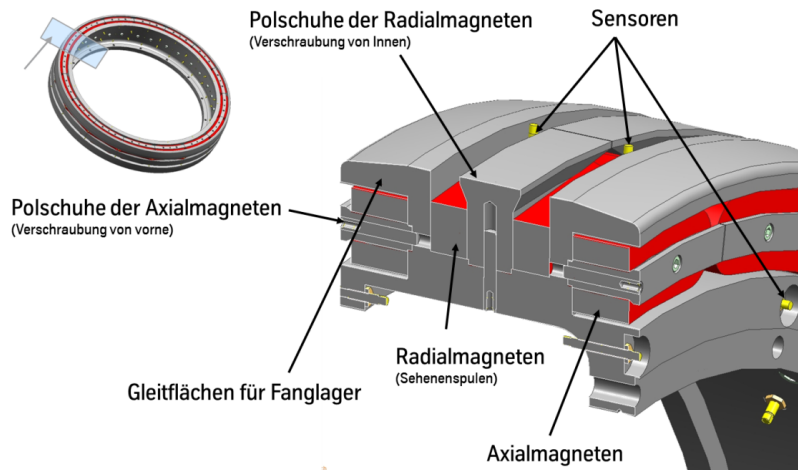
der Gewindebohrungen wurde der magnetische Fluss berücksichtigt, so dass ein magnetischer Kurzschluss über die Schrauben ausgeschlossen ist. Der Rotor verfügt axial und radial über eine Rillung zur Reduzierung möglicher Wirbelströme. Eine Blechung erfolgte aus konstruktiven Gründen nicht. Die Eigenmasse des Rotors beträgt ca. 250 kg. Am Rotor sind Bohrungen zum Anbringen der Nutzlast eingebracht worden.



**Abb. 13:** Aufbau des Rotors des Prototyps

In Abb. 14 ist der Stator dargestellt. Der Stator besteht aus einem zentralen Ring (Statorring), an welchem die einzelnen Magnetspulen montiert werden. Es werden 16 sich gegenüberliegende Spulenpaare als Axiallager eingesetzt. Das Radiallager besteht aus 16 Radialspulen in der Mitte des Statorringes. Sowohl die Axialspulen als auch die Radialspulen werden mit einem Polkern verschraubt. Dieser Polkern ist ringförmig ausgebildet. Der Polschuhring für die Radialspulen ist in vier 90° Segmente geteilt, um ein Montieren dieses Polkernringes sicherzustellen. Der Statorring ist so gefertigt, dass er über spezielle Laufflächen für das Gleitlager verfügt. Auf diesen Flächen kann der Rotor mit den zuvor beschriebenen Bronzefanglagerringen im Falle eines Stromausfalles abgleiten. Im Statorring sind ebenfalls Bohrungen für Positionssensoren integriert worden. Die Bohrungen für die radialen Sensoren befinden sich zwischen den Radialspulen. Für die axialen Sensoren wurden die Bohrungen unterhalb der Axialspulen eingebracht. Da es sich hier um ein erstes Versuchslager handelt, wurden wesentlich mehr Bohrungen vorgesehen, als Sensoren eingesetzt werden. Im aktuellen Prototyp werden 10 Wirbelstromsensoren genutzt, um die Position des Rotors in den

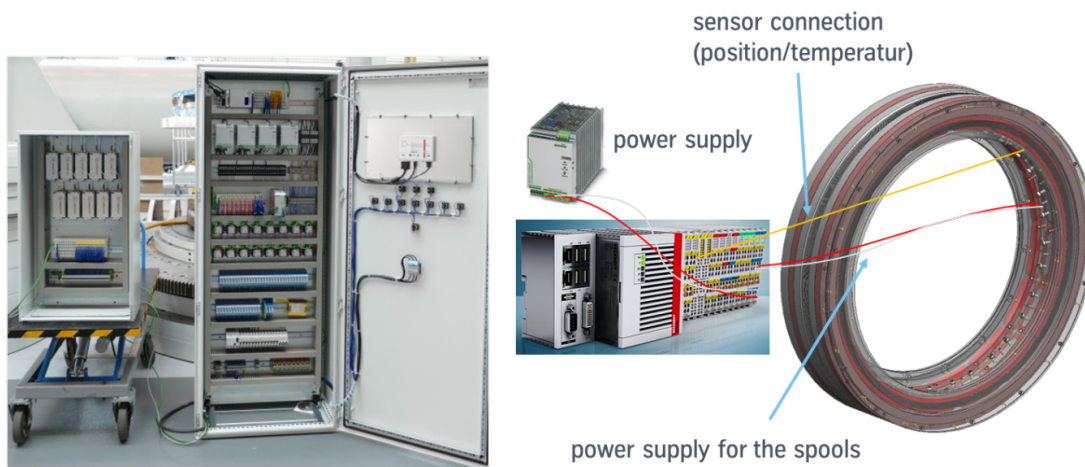
fünf Freiheitsgraden für die Regelung zu ermitteln.



**Abb. 14:** Aufbau des Stators des Prototyps

Die Lage- und Stromregelung des Prototyps wurde auf einem Industrie-PC der Fa. Beckhoff implementiert. Dieser ermöglicht eine vollständige Überwachung und Steuerung des Prototyps entsprechend der Industrie 4.0. Um mögliche elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen Sensorik und Regelung zu reduzieren, wurden die Leistungselektronik und die Messelektronik in separaten Schaltschränken untergebracht (siehe Abb. 15). Die Messsignale werden digitalisiert an den Industrie-PC übertragen.

Am Prototyp kommt ein angepasster Regelalgorithmus des Kleinversuchsstandes ZML320 zum Einsatz. Während die Auswertung der Messsignale in gleicher Weise wie am ZML320 erfolgt, ist die Berechnung von 48 Stellgrößen (32 axial, 16 radial) für die Ansteuerung der Magnete notwendig. Aufgrund von im Simulationsmodell noch nicht berücksichtigten Einzeleffekten (Wirbelströme, unbekannte Leistungsstellerdynamik) wurden die Reglerparameter empirisch ermittelt.



**Abb. 15:** Regelung des Prototyps

### 3.2 Inbetriebnahme des Prototyps und Versuchsergebnisse

Mit dem vorgestellten Prototyp wurden zunächst Drehzahlversuche durchgeführt. Hierfür wurde das Lager mit einer horizontalen Drehachse an einer Wand angebracht und mit einem Riemenantrieb angetrieben (siehe Abb. 16). Anschließend wurde der Antrieb deaktiviert und die Dauer bis zum Stillstand des Lagers gemessen. Mit den bislang implementierten empirisch ermittelten Reglerparametern sind Drehzahlen bis zu  $135 \text{ min}^{-1}$  möglich.

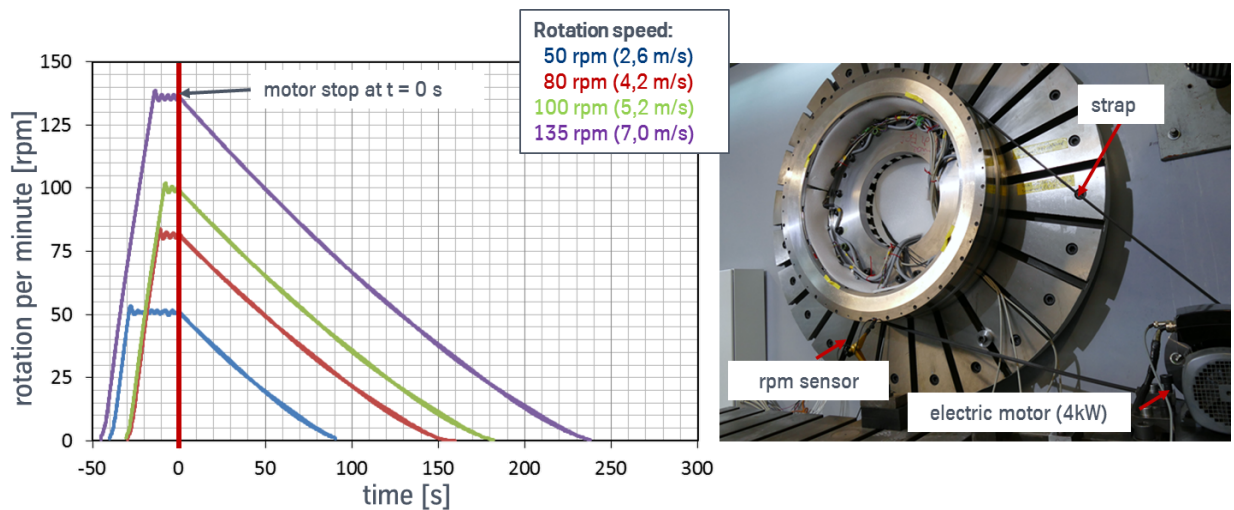


Abb. 16: Drehzahlversuche mit dem Versuchslager

Wesentliches Kriterium für die Leistungsfähigkeit dieses Lagertyps sind die während des Betriebes entstehenden Wirbelstromverluste, da sie die Drehbewegung des Lagers bremsen. Um diese am Prototyp zu erfassen, wurden Drehversuche mit Messung des anschließenden Auslaufverhaltens durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde der Rotor mit einem Riemenantrieb auf eine Zieldrehzahl beschleunigt. Nach dem Erreichen einer vorgegebenen Zieldrehzahl wurde der Antrieb abgeschaltet und die Auslaufdauer gemessen. Die Drehzahl des Rotors wurde über die integrierte Sensorik erfasst. Wirbelstromverluste eines Magnetlagers steigen extrem mit der Drehzahl und bremsen die Rotationsbewegung des Rotors. Es wäre somit zu erwarten, dass bei hohen Wirbelstromverlusten das Magnetlager bei höheren Drehgeschwindigkeiten einen starken Anstieg der Bremsbeschleunigung zeigt. In Abb. 17 sind die ermittelten Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei Drehgeschwindigkeiten bis  $7 \text{ m/s}$  ( $135 \text{ min}^{-1}$ ) kein signifikanter Anstieg der Bremsbeschleunigung zu messen ist. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die aus der Relativbewegung resultierenden Wirbelstromverluste relativ gering sind.

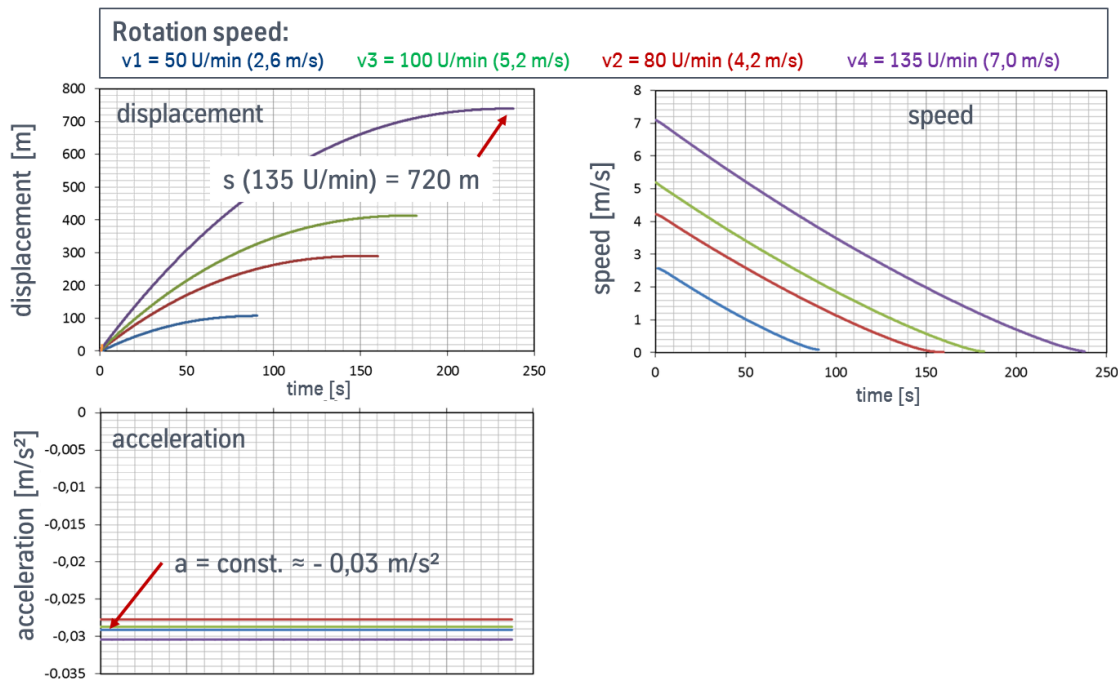


Abb. 17: Rotationsversuche mit dem Versuchslager

#### 4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung eines neuartigen magnetischen Momentenlagers vorgestellt. Ziel war es, die Vorteile einer Magnetlagerung (geräuscharmer und verschleißfreier Betrieb) auf Anwendungen zu übertragen, bei denen üblicherweise Großwälzlager eingesetzt werden. Zielanwendung ist die Lagerung eines Computertomographen. Der geräuscharme Betrieb ist hier von besonderer Bedeutung. Darüberhinaus ergeben sich für solche magnetischen Momentenlager Anwendungsgebiete überall dort, wo die axiale und die radiale Lagerung in einer Ebene realisiert werden soll. Neben dem Computertomographen ist die Anwendung auch bspw. in Radarantennen denkbar.

Mit dem Kleinversuchsstand konnte der Funktionsnachweis für das magnetische Momentenlager erbracht und die Validierung von Modell und Regelstrategie durchgeführt werden.

Das Versuchslager im Maßstab 1:1 wurde durch die thyssenkrupp Rothe Erde GmbH speziell für die Anwendung in CT-Systemen konstruiert. Dieser besitzt gegenüber dem Kleinversuchsstand eine modifizierte Anzahl und Anordnung der Lagermagnete. Nach Anpassung der Regelalgorithmen an das Versuchslager konnte eine erfolgreiche Inbetriebnahme durchgeführt werden. Durch Versuche mit unterschiedlichen Drehzahlen konnte der Funktionsnachweis am Prototyp erbracht werden. Die Versuche zeigten weiterhin, dass Wirbelstromeinflüsse, resultierend aus der Relativbewegung von Stator und Rotor, gering sind.

Für eine Optimierung der Reglerparameter und damit der Leistungsfähigkeit des Versuchslagers muss eine Anpassung des Modells, unter Berücksichtigung von Einzeleffekten (Wirbelstromeinflüsse aus Stellereingriffen, Leistungsstellerdynamik), erfolgen.

## Quellenverzeichnis

- [1] Hahn, L. ; Munke, I.: *Werkstoffe für die Elektrotechnik und Elektronik*. VEB Verlag Technik Berlin, 1973
- [2] Werner, R.: *Vorlesungsunterlagen Traktions- und Magnetlagertechnik*. TU Chemnitz, 2009