

# **Magnet- und Fanglagerprüfstand MFLP**

## **Versuchsanlage zum Test von Magnet- und Fanglagerungen unter extremen Bedingungen**

**S. Düsterhaupt, H. Neumann, I. Noack, C. Panescu, S. Reinicke, T. Rottenbach, F. Worlitz**

*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

*Hochschule Zittau/Görlitz – University of Applied Sciences*

*Theodor-Körner-Allee 16*

*02763 Zittau, Germany*

*Tel.: +493583611383, Fax: +493583611288*

*E-Mail: S.Duesterhaupt@HSZG.de, H.Neumann@HSZG.de, I.Noack@HSZG.de,*

*C.Panescu@HSZG.de, S.Reinicke@HSZG.de, T.Rottenbach@HSZG.de, F.Worlitz@HSZG.de*

### **Kurzfassung**

Aktive Magnetlagerungen (AMB) stellen eine Schlüsseltechnologie in modernen Turbomaschinen dar.

Der Einsatz von AMB in Turbomaschinen der Kraftwerkstechnik (Dampfturbinen, Kühlmittelpumpen und Verdichter) ist durch extreme Prozess- und Umgebungsbedingungen charakterisiert, wie hohe Temperaturen und korrosive Fluide/Gase. Insbesondere der Einsatz organischer Isolationsstoffe begrenzt derzeit den Einsatztemperaturbereich der elektromagnetischen Aktoren. Aktuell sind industriübliche Isolationssysteme in Spulenwicklungen und Blechpaketen bis 180 °C dauerhaft temperaturstabil.

Bekanntere Isolationssysteme auf keramischer Basis erlauben Einsatztemperaturen bis zu 450 °C. Die Fertigung ist jedoch aufwendig und das Bauvolumen ist im Gegensatz zu konventionell isolierten Aktoren größer.

Fortschritte in der Oberflächentechnik und in den Werkstoffwissenschaften ermöglichen die Entwicklung neuartiger Isolationssysteme. Diese eignen sich aufgrund ihrer Temperaturstabilität für den Einsatz in Hochtemperaturmagnetlagerungen (HTAMB).

Beispielsweise erlaubt die Anwendung der PVD-Beschichtungstechnologie (Physical Vapor Deposition) die Herstellung kostengünstiger Dünnschichten im einstelligen Mikrometerbereich.

Weiterhin ist es ein erklärtes Ziel, Magnet- und Fanglagerungen (CB) in einer Baueinheit unterzubringen. Dies ermöglicht kompakte Maschinendesigns. Es ist geplant, diese Lagereinheiten nahe am oder direkt im Prozessraum unterzubringen. So müssen auch die Fanglagerungen ihre Funktionen

unter extremen Umgebungsbedingungen zu erfüllen.

### **1 Einleitung**

Von 2011 bis 2015 wurde das Vorhaben „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Turbomaschinen in Kraftwerksanlagen durch innovative Lagerkonzepte“ [1] bearbeitet.

Gesamtziel des Vorhabens war die Steigerung der Energieeffizienz von Turbomaschinen durch die Erhöhung des Wirkungsgrades beim Einsatz innovativer Lagerkonzepte.

Dazu sollte ein Versuchsfeld für Langzeituntersuchungen von AMB und CB unter extremen Prozess- und Umgebungsbedingungen projektiert und errichtet werden.

### **2 Versuchsfeld MFLP**

Auf Grundlage einer Entwurfsplanung erfolgte eine darauf aufbauende Detailplanung von Teilanlagen und Komponenten. Dabei lag der Schwerpunkt auf der mechanischen Detailkonstruktion folgender Versuchsstandskomponenten:

- Grundrahmen
- Druckbehälter mit innenliegenden Dichtebenen und Flanschen für die Dampfführung und den Anschluss der Instrumentierung
- Rotor inkl. Stahllamellenkupplung

- Magnetlageraktoren inkl. Stützring zur Ausrichtung
- radiale und axiale Fanglagerung (Gleit-/Wälzlager)
- radiale Notfanglagerung

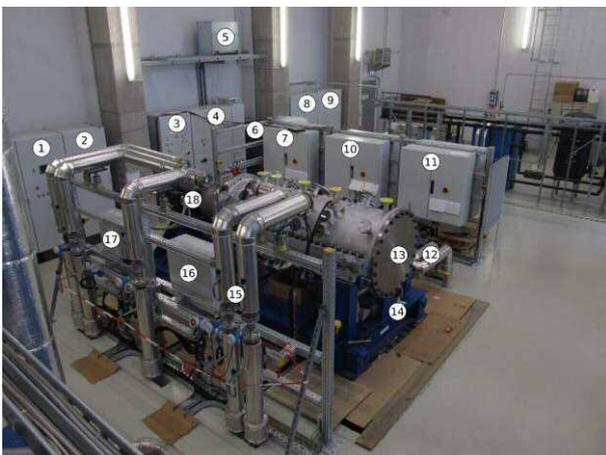
Weiterhin wurden folgende, für den Anlagenbetrieb notwendige periphere Versuchsfeldkomponenten innerhalb von Detailplanungen spezifiziert:

- elektrische Unterverteilung
- unterbrechungsfreie Stromversorgung
- elektrischer Wellenantrieb
- Messtechnik, übergeordnete Steuerung (Prozessleittechnik)

Über sämtliche Planungsphasen hinweg wurde der Ansatz eines modularen Versuchsstandsbaukastens verfolgt. Dabei wurden sowohl die mechanischen als auch die für den späteren Betrieb funktionellen Schnittstellen klar getrennt. Dies gewährleistete eine zeit-, qualitäts- und kostenoptimale Bearbeitung von Teilaufgaben/Aufträgen über mehrere Auftragnehmer hinweg.

Weiterhin erschließt das modulare Versuchsfeld ein sehr weites Spektrum für experimentelle Untersuchungen auf dem Gebiet der Magnet- und Fanglagerung im engeren Sinn und der Leittechnik im weiteren Sinne.

Das Ergebnis ist ein Versuchsfeld (Fig. 1 und Fig. 2) mit einem Versuchsstand, der sich in seinem Design an bewährte Konstruktionsprinzipien einer Industriedampfturbine anlehnt.



**Fig. 1:** Versuchsfeld (Teil Erdgeschoss)

Pos.

- |    |                               |
|----|-------------------------------|
| 1  | Prozessleittechnik (Master)   |
| 2  | Prozessleittechnik (Slave)    |
| 3  | Magnetlagersteuerschrank      |
| 4  | Antriebssteuerschrank         |
| 5  | Bremswiderstand               |
| 6  | Notstromversorgung            |
| 7  | Unterverteilung 2.1           |
| 8  | Unterverteilung 2.1           |
| 9  | Sensorbox 2 und 4 (Rückseite) |
| 10 | Sensorbox 1 und 3 (Rückseite) |
| 11 | Sensorbox 6 und 5 (Rückseite) |
| 12 | Rohrleitungen Abdampf         |
| 13 | Druckbehälter mit Deckel      |
| 14 | Grundrahmen                   |
| 15 | Rohrleitungen Frischdampf     |
| 16 | Sensorbox 7                   |
| 17 | Sensorbox 8                   |
| 18 | Elektrischer Wellenantrieb    |

**Tab. 1:** Teilanlagen der Versuchsanlage (Erdgeschoss)



**Fig. 2:** Versuchsfeld (Teil Keller)

Pos.

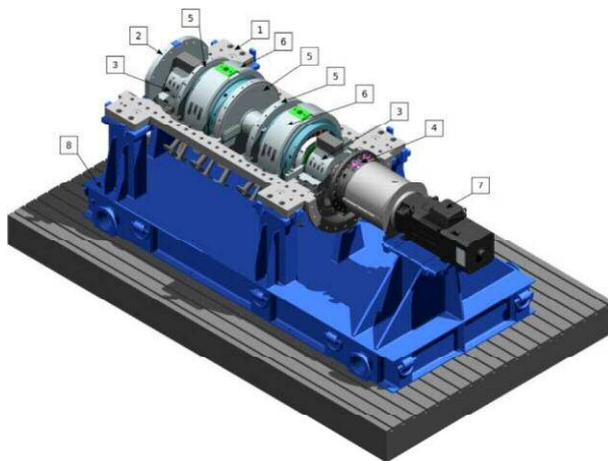
- |    |                        |
|----|------------------------|
| 1  | Abblasebehälter        |
| 2  | Bypass                 |
| 3  | Regelventile Druckluft |
| 4  | Rohrsystem Druckluft   |
| 5  | Druckluftsammler       |
| 6  | Platz für Kompressor   |
| 7  | Rohrsystem Abdampf     |
| 8  | Ventilsteuerschrank 1  |
| 9  | Regelventile Abdampf   |
| 10 | Abdampfsammler         |
| 11 | Ventilsteuerschrank 2  |
| 12 | Lagerbereich           |

**Tab. 2:** Teilanlagen der Versuchsanlage (Keller)

Im Versuchsfeld wurden folgende übergeordnete Anforderungen erfüllt:

- unabhängige Beaufschlagung der AMB und CB mit Wasserdampf bei definierten Verhältnissen
- verhältnismäßiger Demontage- und Montageaufwand
- Einsatz von „Notfanglagern“ zum Test regulärer Fanglager bis an ihre Belastungsgrenzen
- modulares Gehäusedesign zur Aufnahme unterschiedlicher Lagerbaugruppen

*Versuchsstand* – Der MFLP ist eine Horizontalmaschine. Fig. 3 zeigt den aufgedeckelten Druckbehälter mit installierten Versuchskomponenten (Tab. 3).



**Fig. 3:** Aufgedeckelter Druckbehälter mit Versuchskomponenten

Pos.	
1	Druckbehälter
2	Notfanglager
3	Fanglager, radial
4	Fanglager, axial
5	Labyrinthdichtungen
6	Aktorik des AMB
7	Elektrischer Wellenantrieb
8	Grundrahmen

**Tab. 3:** Versuchskomponenten

Während der Designphase wurde das Ziel verfolgt, den liegenden Druckbehälter modular zu konzipieren. Wie in Fig. 3 dargestellt, besitzt der Druckbehälter eine horizontale Teilfuge. Die Trennung erfolgt in ein Außengehäuse (Druckbehälter) und komponentenspezifischen Innengehäusen. Die zylindrischen und scheibenförmigen Einbauten können mit Hilfe eines

Kranes nach Abnahme des Druckbehälterdeckels entnommen werden.

Die Vorhaltung von zylindrischem Bauraum ermöglicht weiterhin, dass in Zukunft Lagergeometrien montiert werden können, deren Konstruktionsdetails heute noch nicht bekannt sind.

Wesentlicher Bestandteil des Versuchsstandes ist ein vollständig aktiv magnetgelagerter Rotor mit einer Masse von ca. 1.300 kg.

Sowohl auf der Antriebsseite (Drive End, DE) als auch auf der Nichtantriebsseite (Non Drive End, NDE) sind je ein Axial- und Radialmagnetlager in einem gemeinsamen Gehäuse installiert. DE- und NDE-Seite sind baugleich ausgeführt.

Im Fehlerfall oder bei Deaktivierung der AMB stabilisieren Fanglager das Laufzeug. Dazu können DE- und NDE-seitig optional radiale Wälz- und Gleitlager eingebaut werden. Weiterhin wird der Axial Schub durch ein axiales Gleitfanglager (DE-seitig) kompensiert.

Die Tab. 4 fasst ausgewählte Versuchskomponentenparameter zusammen.

Parameter	
<b>Rotor</b>	
Masse	1.300 kg
Länge	2.653 mm
Nenn Drehzahl	3.600 min <sup>-1</sup>
max. Drehzahl	4.000 min <sup>-1</sup>
<b>Druckbehälter</b>	
Masse	4.500 kg
Länge	2.700 mm
Durchmesser	1.700 mm
<b>Magnetlager</b>	
Tragkraft, axial	20 kN
Nennluftspalt, axial	500 µm
Tragkraft, radial	35 kN
Nennluftspalt, radial	800 µm
<b>Fanglager</b>	
Nennluftspalt	300 µm
Nennluftspalt, Notfanglager	500 µm

**Tab. 4:** Ausgewählte Versuchskomponentenparameter

*Rotor* – Das horizontal angeordnete Laufzeug (Fig. 4) kann auf eine Maximaldrehzahl von 4.000 min<sup>-1</sup> beschleunigt werden.



Fig. 4: Einbaufertig montierter Rotor

Der Rotor besteht aus

- Welle,
- zwei Zugscheiben (Komponenten der Axialmagnetlager),
- zwei Rotorblechpaketen (Komponenten der Radialmagnetlager),
- Rotorhülsen (Komponenten der Betriebs- und Notfanglager) and
- Kupplung (mechanische Verbindung zwischen Welle und elektrischem Antrieb).

*Notfanglager* – Die Fanglager, im Sinne des Untersuchungsgegenstandes, sollen bis an ihre Auslegungsgrenzen belastet werden. Die dabei auftretenden Belastungen führen möglicherweise zur Schadeneskalation.

Zur Beherrschung des Berstfalls der Fanglager ist der Versuchsstand mit Notfanglagern ausgerüstet. Dabei handelt es sich um DE- und NDE-seitig zusätzliche Fanglagerebenen, in der radiale Gleitlager eingesetzt werden. Die Notfanglager befinden sich an den Wellenenden und begrenzen im Schadensfall die maximale Verkippung des Rotors. Im Berstfall werden so der Druckbehälter, der Rotor und die Magnetlageraktoren vor Beschädigung geschützt.

*Druckbehälter* – Das Laufzeug einschließlich der Lagerungen und Dichtungen wird in einen druckfesten Rezipienten (Fig. 5) eingebaut.



Fig. 5: Druckfester Rezipient mit angeschweißten Flanschen

Im Lastenheft wurde die Anforderung formuliert, entlang der Rotorkontur spezifische Umgebungsbedingungen (Temperaturprofil) experimentell zu simulieren. Die systemtechnische Lösung separiert den Druckbehälter in 4 Abschnitte (Kammern) mit je einer Dampf- und Druckluftversorgung. Die Kammern sind durch Labyrinthdichtungen getrennt. Diese werden typischerweise im Turbomaschinenbau eingesetzt.

Aus der Kammeranzahl und den unabhängig voneinander einstellbaren Dampfmassenströmen ergibt sich kombinatorisch eine Vielzahl möglicher Belastungsfälle. So kann bspw. der Prozessraum, die Magnetlager- und Fanglagerung getrennt oder zusammen, beansprucht werden. In einem anderen Fall kann der Prozessraum zeitgleich mit der Fanglagerung beaufschlagt werden.

So können praxisrelevante Temperaturprofile innerhalb des Druckbehälters eingestellt werden.

*Maschinenfundament* – Der liegende Druckbehälter ist auf einem aus dem Turbomaschinenbau abgeleiteten Grundrahmen montiert. Insbesondere bei Fanglageruntersuchungen müssen dynamische Kräfte bis zu 180 kN sicher über die radialen Fanglager und den Rezipienten in das Maschinenfundament abgeleitet werden. Dafür wurde der Versuchsstand auf einer Montageplatte und einem Betonvollfundament, welches vom Gebäude schwingungstechnisch entkoppelt ist, gegründet. Das gesamte Maschinenfundament besitzt eine Masse von ca. 132.000 kg.

Fig. 6 zeigt das Stahlbetonfundament mit einer Masse von ca. 120.000 kg.



Fig. 6: Betonvollfundament

Die Aufspannplatte (Fig. 7) aus Stahlguss besitzt eine Masse von ca. 13.000 kg.



Fig. 7: Einhub der Aufspannplatte

Mit dem Maschinenfundament wird die notwendige Steifigkeit, Trägheit und Dämpfung für die auftretenden statischen und dynamischen Prozesskräfte - insbesondere zur Ableitung von Unwuchtkräften – gewährleistet.

### 3 Geplante Experimente und Tests

*Design- und Modellvalidierung* – Mit der Versuchsanlage sollen neuartige Konstruktionsprinzipien auf dem Gebiet der Magnet- und Fanglagerung experimentell untersucht werden. So stellt sich bspw. die Frage, inwieweit Gleitlager als Fanglagerungen geeignet eingesetzt werden können und wie die Magnetlageraktoren für Temperaturen über 200 °C elektrisch isoliert werden können.

Weiterhin ist geplant, insbesondere die Arbeiten auf dem Gebiet der Fanglagermodellierung fortzuführen. Die Komplexmodelle sind mit

Hilfe von Untersuchungen zur Dynamik während des Rotor-Fanglagerkontaktes experimentell zu validieren.

In diesem Zusammenhang ist auch die Zuverlässigkeit moderner Magnet- und Fanglagerungen unter extremen Umgebungsbedingungen zu analysieren. Im Gegensatz zur gegenwärtigen Vorgehensweise müssen Nichtlinearitäten und (temperaturbedingte) Parameterdriften bei der Auslegung und in den Komplexmodellen stärker berücksichtigt werden.

Der MFLP stellt die experimentelle Basis für die Untersuchungen dar.

*Tests neuartiger Fanglagerkonzepte* – Ein weiterer Fokus liegt auf den experimentellen Untersuchungen an axialen und radialen Gleitlagerungen.

Gegenwärtig werden in Großmaschinen ausnahmslos Wälzlager eingesetzt. Sie gewährleisten nachweislich die Maschinenintegrität während eines Rotor-Fanglagerkontaktes. Für Wälzfanglagerungen existieren umfangreiche Betriebserfahrungen, die einen Einsatz in industriellen Applikationen zulassen.

Allerdings ist der Lageraufbau, bestehend aus Innenring, Wälzelementen, Außenring und Rotorhülse im Gegensatz zum Gleitlager komplexer. Gleitlagerungen bestehen im einfachsten Fall aus lediglich zwei tragenden Elementen – Rotor- und Statorhülse.

Der Einsatz von Magnetlagerungen in Turbomaschinen und der damit notwendigen Fanglagerungen erfordert die Abkehr von traditionellen Konstruktionsprinzipien bereits im Designprozess.

So lassen moderne Konstruktionswerkstoffe höhere Einsatztemperaturen zu. Damit können Lagerkomponenten entweder nah am oder direkt in den Prozessraum integriert werden. Dies ermöglicht kompakte Laufzeuggeometrien mit verbesserten rotodynamischen Eigenschaften.

Fanglager sind sicherheitsrelevante Baugruppen. Der Einfluss von Dampf und/oder Kondensat führt zu einer vorzeitigen Alterung der Lagerkomponenten. Die Dispersionsbefüllung in Wälzlagern wird ausgespült oder dampft aus

und die Stahlegierungen korrodieren. Somit sind die Einsatzbedingungen im Gegensatz zu Gleitlagern von Anfang an stärker begrenzt. In Summe weisen Wälzfanglagerungen somit ggf. erhebliche Stillstandsschäden auf. Kommt es zum Rotor-Fanglagerkontakt, versagen diese. Die Maschinenintegrität ist nicht mehr gewährleistet.

Auf der Grundlage des Konstruktionsprinzips eines hydraulischen Lagers lässt sich eine Gleitfanglagerkonstruktion ableiten.

Fig. 8: zeigt ein radiales Gleitlager mit horizontaler Teilfuge. Die Lagerkomponenten (Fig. 8) wurden innerhalb des Vorhabens für die abgeschätzten Prozesskräfte ausgelegt und konstruiert.

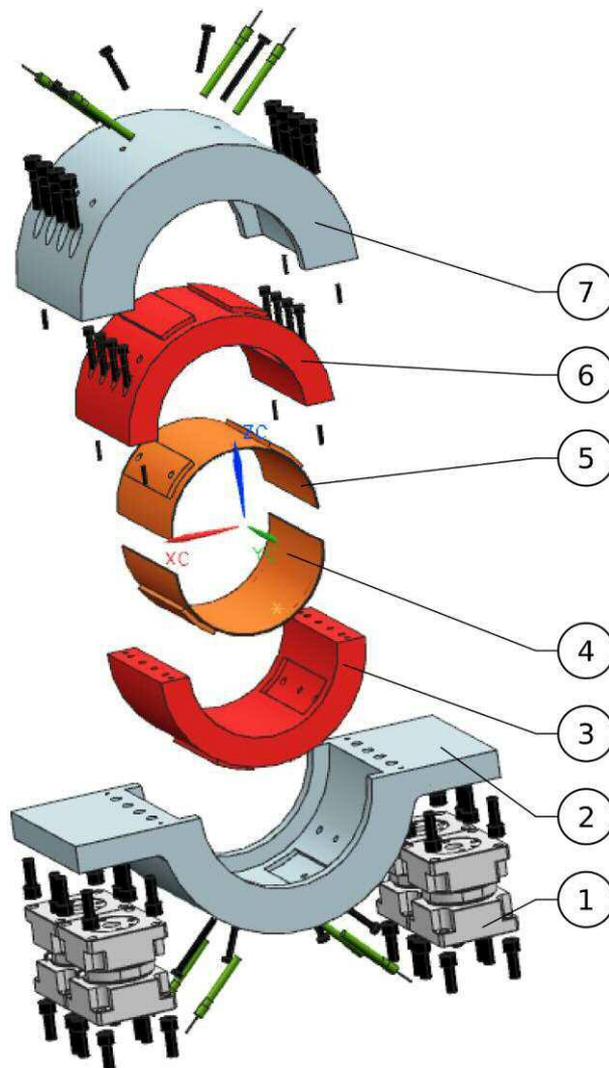


Fig. 8: Radiale Gleitfanglagerung in Schalenbauweise

Pos.	
1	Kraftmesseinrichtung
2	Lagergehäuse, unten
3	Lagerstator, unten
4	Lagerschale, unten
5	Lagerschale, oben
6	Lagerstator, oben
7	Lagergehäuse, oben

Tab. 5: Komponenten eines geteilten (radialen) Gleitfanglagers

*Langzeitverhalten von Magnet- und Fanglagern und ihren Komponenten* - Ein weiteres Ziel ist es, den dauerhaften Einsatztemperaturbereich der Lagerkomponenten zu vergrößern. Wie bereits erwähnt, ermöglichen Fortschritte auf dem Gebiet der Materialwissenschaften eine zunehmende Integration der Lager in den Prozessraum. Turbomaschinen können so kompakter konstruiert und gebaut werden. Dies führt zu einer erheblichen Verbesserung der Rotordynamik.

In Industriedampfturbinen werden an Lagerbaugruppen Temperaturen von mehr als 250 °C erwartet. Bezüglich der Magnetlageraktoren ist der Einsatztemperaturbereich derzeit auf 180 °C dauerhaft begrenzt. Limitierend ist die elektrische Isolation der Blechlaminiierung und Wicklung.

Im Gegensatz zu Gleitlagerungen, wie sie in Turbomaschinen verwendet werden, gibt es in magnetgelagerten Maschinen kein Öl, das als Kühlmedium genutzt werden kann. Zwar kann der Stator effektiv flüssig gekühlt werden, aber die Kühlung des Rotorblechpaketes kann gegenwärtig nur mit sehr hohem Aufwand erfolgen. Die dazu notwendigen Kühlaggregate verursachen zusätzliche Verluste. Der Gesamtwirkungsgrad der Lagerung sinkt.

Es ist beabsichtigt, den Kühlaufwand schrittweise zu reduzieren und zukünftig vollständig auf eine Kühlung des Rotorblechpaketes zu verzichten.

Die Lösung ist in einer Optimierung der elektrischen Isolation zu sehen. Sie besteht derzeit aus organischen Materialien wie Lack und Harz. Es ist beabsichtigt, anorganische Isolationsmaterialien, bspw. keramische Beschichtungswerkstoffe, einzusetzen. Mit mo-

dernen Methoden der Oberflächentechnik (Physical Vapor Deposition mittels Sputtern) ist es möglich, Isolationsschichten im Mikrometerbereich abzuscheiden.

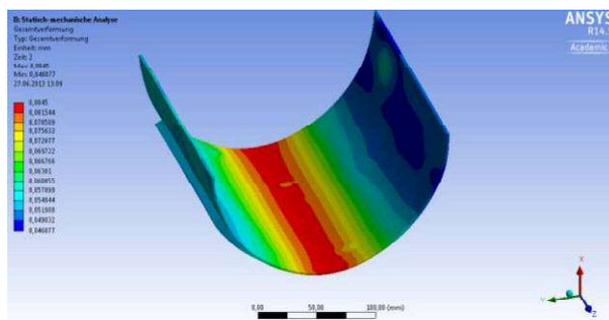
Neben der thermischen Wirkung wird auch die Langzeitwirkung von Wasserdampf und Kondensat auf die Lagerkomponenten zu untersuchen sein. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Korrosionsanfälligkeit von Eisen und Nicht-Eisenmetallen.

Die Lagerkomponenten können nicht oder nur teilweise aus Chromstahl gefertigt werden. Insbesondere für die Blechlaminierung in den Magnetlageraktoren und die Wälzlageringringe müssen zwingend andere metallische Werkstoffe eingesetzt werden. Weiterhin sind auch die Rotorhülsen anfällig für Korrosion. Wälzelemente stellen hingegen kein Problem dar. Sie sind aus Keramik.

Letztlich sollen Langzeituntersuchungen zeigen, wie und in welchem Umfang Magnet- und Fanglager in gemeinsamen Baueinheiten und gekapselt in Prozessräumen untergebracht werden können.

#### 4 Erste Ergebnisse

*Numerische Simulation einer Gleitfanglegerung* - Das ausgelegte und konstruierte Gleitfangleger (Fig. 8) wurde unter der Berücksichtigung ausgewählter Belastungsfälle mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) analysiert. Innerhalb von Festigkeitsanalysen wurden u. a. die maximalen Verformungen und mechanischen Spannungswerte ermittelt. Fig. 9 zeigt beispielhaft die absolute Verformung der unteren Lagerschale.



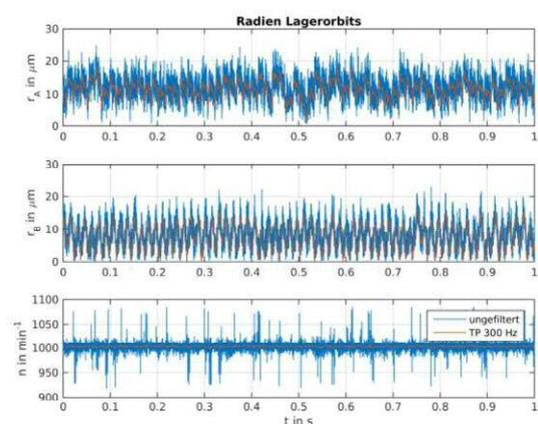
**Fig. 9:** Linienpressung der unteren Lagerschale eines Gleitfanglegers (FEM-Analyse)

Es wurde die Linienpressung mit einer Maximalkraft von 180 kN angenommen. Die Lagerschale verformte sich dabei um max. 85  $\mu\text{m}$  gegenüber dem unbelasteten Zustand.

Diese neuartige Konstruktion eines Gleitfanglegers soll in einem Folgeprojekt unter normalen und extremen Prozessbedingungen getestet werden. Weiterhin werden in diesem Rahmen die Ergebnisse der Lagerauslegung und der numerischen Simulation validiert. Außerdem sollen Optimierungen hinsichtlich der Lagergeometrie und der Materialauswahl auf der Grundlage der Ergebnisse und Betriebserfahrungen abgeleitet werden.

*Nachweis der stabilen Lageregelung bei Drehzahlbetrieb* – Im Rahmen der Inbetriebnahme des Versuchsfeldes musste der Nachweis der stabilen Lageregelung erbracht werden. Dazu wurde der Rotor auf max. 4.000  $\text{min}^{-1}$  beschleunigt und die Lageorbits messtechnisch erfasst. Es wurde die maximalen Radien ausgewertet.

Fig. 10 zeigt die Radien  $r_A$  (DE-seitig) und  $r_B$  (NDE-seitig) in den aktiven Radialmagnetlagern bei 1.000  $\text{min}^{-1}$ .



**Fig. 10:** Radien der Lageorbits bei 1.000  $\text{min}^{-1}$

Fig. 11 zeigt die zugehörigen Orbits an beiden Lagerstellen. Der maximale Orbit am DE-seitigen Magnetlager beträgt ca. 18  $\mu\text{m}$ . Am NDE-seitigen Magnetlager beträgt der maximale Orbit ca. 14  $\mu\text{m}$ .

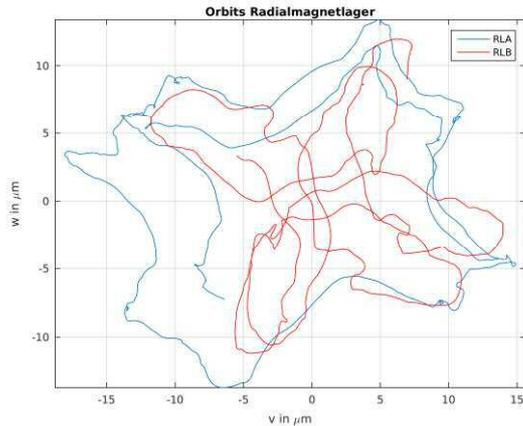


Fig. 11: Lageorbits bei 1.000 min<sup>-1</sup>

Fig. 12 zeigt die Radien  $r_A$  (DE-seitig) und  $r_B$  (NDE-seitig) in den aktiven Radialmagnetlagern bei 4.000 min<sup>-1</sup>.

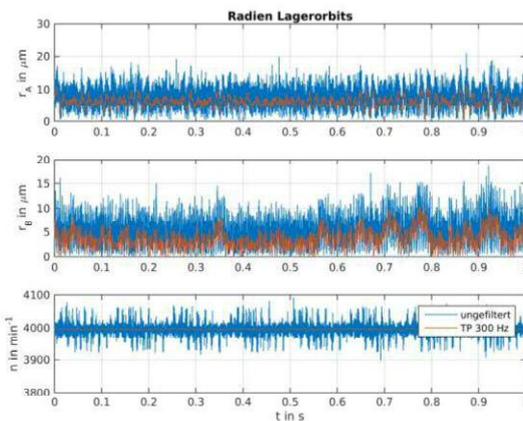


Fig. 12: Radien der Lageorbits bei 4.000 min<sup>-1</sup>

Fig. 13 zeigt die zugehörigen Orbits an beiden Lagerstellen. Der maximale Orbit am DE-seitigen Magnetlager beträgt ca. 11 μm. Am NDE-seitigen Magnetlager beträgt der maximale Orbit ca. 8 μm.

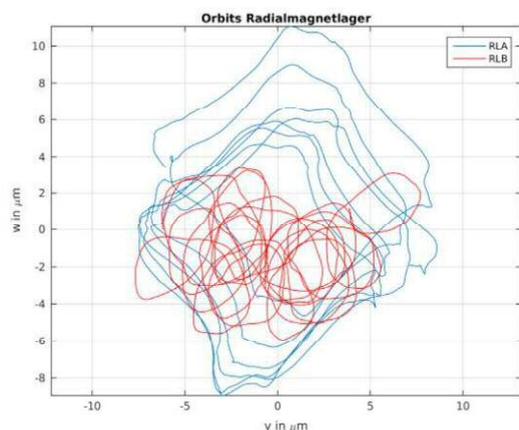


Fig. 13: Lageorbits bei 4.000 min<sup>-1</sup>

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Lageregelung bis zur Maximaldrehzahl von 4.000 min<sup>-1</sup> stabil arbeitet. Die Auslenkungen an den dargestellten Haltedrehzahlen liegen unterhalb von 20 μm und werden mit zunehmender Drehzahl geringer.

*Sternfahrten zur Lagebestimmung des Laufzeugs bezüglich der Radialfanglagerung* - Innerhalb dieser Inbetriebnahmeversuche wurde geprüft, inwieweit der Rotor bezüglich der radialen Fanglagerung positioniert/zentriert ist. Dazu erfolgt eine achsenweise Verlagerung des Rotors innerhalb der Fanglagerinnenringe mit Hilfe der Führungsgrößenvorgabe „Lage“. Der Kontakt zwischen Rotor und Fanglagerinnenring führt zu einer Änderung der Steifigkeit. Dies wird durch das Abknicken der Magnetlagerströme in den entsprechenden Achsen angezeigt.

Fig. 14 zeigt den Zeitverlauf der Sternfahrt im DE-seitigen Radialfanglager.

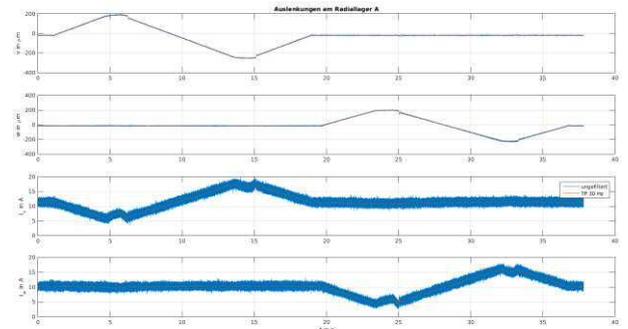
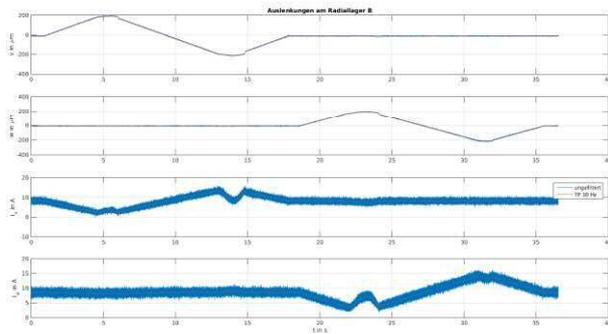


Fig. 14: Sternfahrt im DE-seitigen Radialfanglager

Folgende Auslenkungen wurden am Berührungspunkt mit dem DE-seitigen Radialfanglager messtechnisch ermittelt:

- v-positiv 190,50 μm
- v-negativ -253,30 μm
- w-positiv 196,60 μm
- w-negativ -228,80 μm

Fig. 15 zeigt den Zeitverlauf der Sternfahrt im NDE-seitigen Radialfanglager.



**Fig. 15:** Sternfahrt im NDE-seitigen Radialfanglager

Folgende Auslenkungen wurden am Berührungspunkt mit dem NDE-seitigen Radialfanglager messtechnisch ermittelt:

v-positiv	191,80 $\mu\text{m}$
v-negativ	-211,70 $\mu\text{m}$
w-positiv	194,10 $\mu\text{m}$
w-negativ	-217,28 $\mu\text{m}$

Der Funktionsnachweis für die Sternfahrt wurde erbracht. Die Berührungspunkte mit den Radialfanglagern können zuverlässig erkannt werden.

## 5 Zusammenfassung

Das Testfeld ist für experimentelle Untersuchungen und Langzeittests von AMB und CB ausgelegt. Dabei können extreme Umgebungs- und Prozessbedingungen, in Anlehnung an Kraftwerksprozesse, skaliert eingestellt werden.

Dies erfordert ein modulares Versuchsanlagenkonzept. Es müssen in entsprechendem Umfang Umbauten möglich sein, ohne die Integrität der Versuchsanlage zu gefährden. Der Beitrag fasst die hierzu notwendige Strategie bezüglich des Druckbehälters, des Rotors und der Lagerauslegung zusammen.

Zur Erreichung der Versuchsziele wurde ein vollständig aktiv magnetgelagerter Versuchstands-läufer konstruiert. Dieser wird mit Hilfe eines elektrischen Wellenantriebes auf max. 4.000  $\text{min}^{-1}$  beschleunigt.

Das Laufzeug ist in einem druckfesten Behälter untergebracht. Das Behältervolumen ist durch innenliegende Dichtebenen in 4 Abschnitte (Kammern) gegliedert. Mit Hilfe eines Dampf- und Druckluftsystems können die Kammern weitestgehend unabhängig voneinander beaufschlagt werden. So können thermische und/oder chemische Untersuchungen am Rotor und an Lagerkomponenten durchgeführt werden.

Ferner stellt der Druckbehälter auch eine Barriere im Sinne des Sicherheitskonzeptes dar. Ausgewählte Experimente führen ggf. zu einem Versagen insbesondere von Fanglagerkomponenten. Im Berstfall lösen sich Fragmente und werden in Richtung der Druckbehälterinnenwand beschleunigt. Die Barriere verhindert ein Durchdringen. Mensch und Umwelt werden geschützt.

Der Prüfstand ist modular konzipiert. Es können wahlweise axiale/radiale Gleit- und Wälzlagerungen in den entsprechenden Bauräumen montiert werden. Dafür stehen ausreichend dimensionierte mechanische Schnittstellen zur Verfügung.

Eine Besonderheit ist die zusätzliche Fanglagerebene mit vergrößertem Luftspalt. Diese Notfanglagerung (Gleitlager) stabilisiert den Rotor im Berstfall der regulären Fanglagerung. Sie ist für den einmaligen Rotor-Fanglagerkontakt bestimmt.

Mit diesem Testfeld ist es möglich, Entwicklungen und Erprobungen neuartiger und innovativer Lagerkonzepte durchzuführen. Dabei können die Untersuchungen unter skalierten Kraftwerksbedingungen durchgeführt werden.

## Quellen

- [1] Worlitz, F.; Düsterhaupt, S.; Neumann, H.; Panescu, C.; Reinicke, S.; Rottenbach, T.; Li, L.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Turbomaschinen in Kraftwerksanlagen durch innovative Lagerkonzepte. Vorhaben SAB EuK InET P 100081306, Abschlussbericht, 2015