

# Entwicklung und Test eines Hochtemperatur-Sensorsystems für den Einsatz an Turbomaschinen

**S. Düsterhaupt, H. Hoffmann, H. Neumann, I. Noack, T. Rottenbach, F. Worlitz**

*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

*Hochschule Zittau/Görlitz*

*Theodor-Körner-Allee 16*

*02763 Zittau, Germany*

*Tel.: +49 3583 612 4383, Fax: +49 3583 612 3449*

*Email: s.duesterhaupt@hszg.de, hagen.hoffmann@hszg.de, h.neumann@hszg.de, i.noack@hszg.de, t.rottenbach@hszg.de, f.worlitz@hszg.de*

## Abstract

Hochtemperaturmagnetlager in Turbomaschinen erfordern Lagesensoren, die den Umgebungsbedingungen ebenfalls dauerhaft standhalten und den Lageregeln hinreichend genaue und störungsfreie Informationen über die Rotorpositionen kontinuierlich zur Verfügung stellen. Ausgehend von den Einsatzbedingungen wurden mögliche Messprinzipien untersucht. In einem zweiten Schritt erfolgte die Recherche zu temperaturbeständigen Werkstoffen für die Sensorbestandteile und auf Basis einer Marktanalyse wurde deren Verfügbarkeit geprüft. Im Anschluss wurde ein kombinierter induktiver Radial-Axial-Lagesensor als Prototyp für den Einsatz am Magnet- und Fanglagerprüfstand MFLP ausgelegt. Dazu wurde ein analytischer Auslegungsalgorithmus für schnelle Auslegungsrechnungen erstellt und in MATLAB umgesetzt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Auslegung wurde der Sensor konstruiert und gefertigt. Parallel dazu wurde eine Sensorelektronik entwickelt. Das Paper beschreibt die Auslegung und Konstruktion des Sensors und die Entwicklung der dazugehörigen Elektronik.

## 1 Motivation und Zielstellung

Der Einsatz von berührungsfreien aktiven Magnetlagern in Turbomaschinen in der Energie- und Kraftwerkstechnik ermöglicht eine wesentliche Erhöhung der Energieeffizienz bzw. des Wirkungsgrades gegenüber konventionell gelagerten Maschinen. Ursächlich dafür ist das berührungslose, reibungs- und verlustarme Funktionsprinzip der Magnetlager sowie der daraus resultierende Wegfall des Schmiersystems in

den Lagern. Die unmittelbare Nähe der Lagerung zum Prozessraum bewirkt in Verbindung mit hohen Prozesstemperaturen einen erheblichen Wärmeeintrag in die Lagerstellen. Infolge der fehlenden Kühlwirkung des Schmiermittels kann diese Wärme nur durch zusätzliche Kühlmaßnahmen abgeführt werden, die ihrerseits der möglichen Wirkungsgraderhöhung entgegenstehen und einen anlagentechnischen und energetischen Mehraufwand nach sich ziehen. Die Lösung dieses Problems zielt auf die Entwicklung von Hochtemperaturlagerungen, die ohne Kühlung betrieben werden können. Dafür sind Lagesensoren erforderlich, die unter den gleichen Umgebungsbedingungen die Rotorpositionen berührungsfrei erfassen.

Ziel ist die Entwicklung eines langzeitstabilen und zuverlässigen Lagesensorsystems für aktiv magnetgelagerte Rotoren in Turbomaschinen beim Einsatz unter hohen Temperaturen und ggf. aggressiver Atmosphäre.

## 2 Entwicklung eines hochauflösenden Lagesensors

### 2.1 Auswirkungen hoher Temperaturen

In [1] wurden die Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager dargelegt. Diese sind auf Grund der räumlichen Nähe zu den Magnetlagern auch für die Sensoren zutreffend. Aktive Magnetlager bestehen wie elektrische Maschinen aus Metallen und Isolierstoffen. Man unterscheidet elektrische Stromkreise und magnetische Kreise. Leiterwerkstoffe für elektrische

Stromkreise sind üblicherweise Kupfer oder Aluminium. Die Magnetkreise bestehen je nach Anwendungsfall aus massiven oder geblechten ferromagnetischen Materialien, deren spezifische Eigenschaften durch den Zusatz von Legierungselementen an spezielle Anforderungen angepasst werden. Bei der elektrischen Isolation wird unterschieden in die Isolation der elektrischen Leiter und die Blechisolation. Aufgabe der Leiterisolation ist die galvanische Trennung der betriebsmäßig unter Spannung stehenden elektrischen Leiter gegeneinander und gegen geerdete Bauteile. Bei magnetischen Wechselfeldern werden zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten die magnetischen Kreise aus gegeneinander elektrisch isolierten Blechen gefertigt.

Die spezifischen Eigenschaften aller in Magnetlagern eingesetzten Werkstoffe sind temperaturabhängig. Einerseits kommt es zu Temperaturerhöhungen durch von außen eingetragene Wärme (bspw. Wärme aus dem Prozess), andererseits durch Eigenerwärmung infolge von Stromwärmeverlusten, Wirbelstrom- und Ummagnetisierungsverlusten im Eisen oder dielektrischen Verlusten in den Isolierstoffen.

Für jede Werkstoffeigenschaft, die für eine bestimmte Funktion oder einen Einsatzzweck erforderlich ist und genutzt wird, gibt es Grenztemperaturen, ober- bzw. unterhalb derer diese Eigenschaften verlorengehen. So verlieren bspw. Ferromagnetika oberhalb der materialspezifischen Curietemperatur ihre typischen und als Magnetwerkstoffe im Elektromaschinenbau genutzten ferromagnetischen Eigenschaften. Der elektrische Widerstand eines elektrischen Leiterwerkstoffs nimmt mit steigender Temperatur zu, was zu einer Erhöhung der Stromwärmeverluste und letztlich zu einem weiteren Temperaturanstieg führt. Elektrische Isolierstoffe gelten bis zu einer bestimmten Temperatur als wärmebeständig, bei der keine den Gebrauch beeinträchtigenden Veränderungen auftreten [2]. Die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe begrenzt die zulässige Erwärmung einer elektrischen Maschine. Den Isolierstoffen und deren Kombinationen als Isoliersysteme werden Temperaturklassen mit jeweils zulässigen Dauergrenztemperaturen zugeordnet, deren Einhaltung von großer

Bedeutung für die Lebensdauer der Maschine ist [3].

Die Temperaturbegrenzung verfügbarer elektrischer Isolierstoffe/-systeme beschränkt derzeit auch den Einsatztemperaturbereich des zu entwickelnden Lagesensors für Magnetlager in Hochtemperaturanwendungen.

## 2.2 Anforderungen an den Lagesensor

Zur Beibehaltung des berührungslosen Funktionsprinzips aktiver Magnetlager muss die Erfassung der Rotorposition durch die Lagesensoren ebenfalls berührungslos erfolgen. Für beide Radialmagnetlager sind die Auslenkungen in horizontaler ( $x$ -Achse) und vertikaler Richtung ( $y$ -Achse) und für das Axialmagnetlager in axialer Richtung ( $z$ -Achse) zu messen.

Folgende Anforderungen ergeben sich für die Lagesensoren [4, 5]:

- kleiner Messbereich (Magnetlagerspalte im Bereich 0,5 mm bis 1 mm)
- hohe Empfindlichkeit
- Ausgangssignal monoton steigend/fallend
- kleine Temperaturdrift
- hohe Bandbreite
- störresistent in elektromagnetisch stark gestörter Umgebung (elektromagnetische Felder der Elektromagnete, elektromagnetische Störungen durch Schaltverstärker)

Zur berührungslosen Messung der Rotorlage sind allgemein folgende Messprinzipien anwendbar [4]:

- optisch
- magnetisch (Hallsensoren)
- induktiv
- resistiv (Wirbelstromsensoren)
- kapazitiv
- akustisch (Ultraschall)

Die Sensorik muss beim Einsatz unter korrosiven Medien die Änderung der Rotorposition durch ein Spaltrohr messen können, dafür sind von den o. g. folgende Messprinzipien aus den angeführten Gründen nicht nutzbar:

- optisch - Lichtundurchlässigkeit des Spaltrohres
- kapazitiv - elektrische Leitfähigkeit des Spaltrohres
- akustisch - starke Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls von den Eigenschaften des Fördermediums und des Spaltrohres

Die Sensoren messen auf eine sich drehende Oberfläche. Daher gehen in das Messergebnis neben dem eigentlich zu messenden Abstand die Rundheit und die Oberflächengüte der Messspur ein, die bei der Konstruktion hinreichend genau zu tolerieren und bei der Fertigung zu berücksichtigen sind. Eine schlechte Oberflächengüte verursacht rauschartige Störungen und durch Geometriefehler entstehen Störungen mit der Drehfrequenz oder Vielfachen davon [6, 5]. Daneben gibt es Einflüsse infolge von Materialinhomogenitäten durch Hotspots oder durch Veränderungen in der Gefügestruktur durch die mechanische Bearbeitung oder Materialfehler (electrical runout). Die o. g. Einflüsse werden durch das Messsystem erfasst, im Regler weiterverarbeitet, in entsprechende Stellströme in der Leistungselektronik gewandelt und führen ggf. zur Instabilität der Lageregelung. Aus diesem Grund sind integral messende den punktuell messenden Lagesensoren vorzuziehen. Daneben sind die Einflüsse durch die thermische Ausdehnung bei verschiedenen Arbeitspunkttemperaturen durch ein differentiell messendes Sensorsystem auszugleichen. Dadurch wird gleichzeitig die Kennlinie linearisiert. Zudem sollte der Sensor unempfindlich gegen im rauen Kraftwerksbetrieb auftretende Verschmutzungen, wie bspw. Kohlestaub sein. All diese Forderungen lassen sich durch induktive Sensoren realisieren. Vorteile induktiver Sensoren sind:

- berührungslose Messung, damit verschleißfrei
- unempfindlich gegenüber Umgebungseinflüssen wie Schmutz und Feuchtigkeit
- beim Einsatz unter aggressiven Medien Messung durch ein Spaltrohr möglich
- statorfeste Anordnung mit einfacher Ausrichtung zur magnetischen Mitte

- mechanische Überarbeitung von Rotor und Stator des Magnetlagers und Sensors in einer Aufspannung
- redundante Ausführung der Sensorachsen möglich
- im Elektromaschinenbau übliche Fertigungstechnologie
- integral messendes Verfahren zum Ausgleich von Oberflächenfehlern und Materialinhomogenitäten
- differentiell messendes Verfahren zum Ausgleich der thermischen Ausdehnung und zur Linearisierung der Kennlinie
- einfache Kalibrierung
- einfache Auswertung über Brückenschaltung

Demgegenüber stehen einige Nachteile dieses Messprinzips:

- Blechung von Rotor und Stator des Sensors erforderlich
- zur Verlustminimierung dünnes Hochfrequenzelektroblech notwendig (z. B. NO20)
- Arbeitspunkt liegt im untersten Aussteuerungsbereich der Magnetisierungskennlinie (MKL)
- für die exakte Sensorauslegung sind für den Aussteuerungsbereich und das Frequenzverhalten die Daten der MKL zu beschaffen/ermitteln
- phasenselektive Gleichrichtung für den Richtungsentscheid der Rotorbewegung erforderlich

## 2.3 Entwicklung eines induktiven Lagesensor

### 2.3.1 Prinzip der induktiven Lagemessung

Das Messprinzip eines induktiven Aufnehmers beruht auf der Abhängigkeit der Induktivität  $L$  einer Spulenanordnung von deren magnetischem Widerstand  $R_m$  nach Glg. (1)

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (1)$$

mit dem magnetischen Widerstand nach Glg. (2)

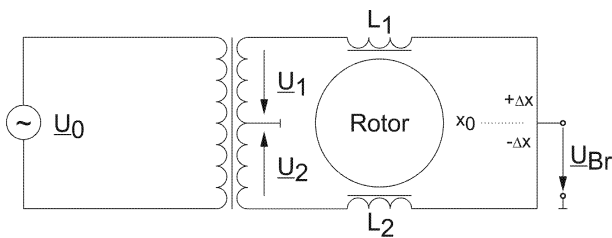
$$R_m = \frac{2s_L}{\mu_0 A} + \frac{s_{Fe}}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2)$$

Nach Glg. (2) ist der magnetische Widerstand abhängig vom Luftspalt  $s_L$  und der relativen Permeabilität des Eisens  $\mu_r$  bei konstanter Länge  $s_{Fe}$  und Querschnittsfläche  $A$  des Eisenkreises. Damit berechnet sich die Sensorspuleninduktivität  $L_{Sens}$  nach Glg. (3)

$$L_{Sens} = \frac{N^2 \mu_0 A}{2s_L + \frac{s_{Fe}}{\mu_r}} \quad (3)$$

Unter der Voraussetzung, dass  $\mu_r$  sehr viel größer als die Eisenlänge  $s_{Fe}$  ist, verhält sich die Sensorinduktivität umgekehrt proportional zum doppelten Luftspalt.

Die Lage eines magnetgelagerten Rotors variiert innerhalb der Fanglagergrenzen, die kleiner sind als der Nennluftspalt des Magnetlagers. Für die Lagemessung des Rotors werden in einer Lagerachse mindestens zwei gleichdimensionierte Sensorelemente  $L1$  und  $L2$  diametral angeordnet - vgl. Abb. 1. Damit erhält man einen Differential-Querankeraufnehmer. Die Sensorbahn des Rotors bildet hier den gemeinsamen Anker. Befindet sich der Rotor in der geometrischen Mitte  $x_0$ , so ist dessen Auslenkung Null und die Sensorspulen haben die gleiche Induktivität. Bei einer Auslenkung des Rotors aus der Mittellage um  $\Delta x$  wird der Luftspalt auf der einen Seite vergrößert und auf der anderen Seite entsprechend verringert. Adäquat verändern sich die Induktivitäten  $L1$  und  $L2$  der gegenüberliegenden Sensorspulen.



**Abb. 1:** Prinzipielle Anordnung und Verschaltung der Sensorspulen

Bei Anlegen einer Wechselspannung wirkt eine Spule als komplexe Impedanz  $\underline{Z}$ . Diese besteht aus dem Realteil, der sich aus dem ohmschen Widerstand  $R$  der Spule ergibt, und dem Imaginärteil  $jX$ , der sich aus der Kreisfrequenz  $\omega$  und der

Induktivität  $L$  zusammensetzt:

$$\underline{Z} = R + jX = R + j\omega L = R + j2\pi fL \quad (4)$$

Die Lagesensorspulen werden über einen Transformator mit Mittelanzapfung mit einer sinusförmigen Wechselspannung  $\underline{U}_0$  einer Frequenz  $f$  im zweistelligen kHz-Bereich gespeist, sodass der Imaginärteil der Impedanz sehr viel größer als der ohmsche Anteil der Sensorspule ist.

Die auslenkungsabhängigen Impedanzänderungen der gegenüberliegenden Sensorelemente werden in einer Wechselspannungsausschlagmessbrücke gemessen. Diese ist abgeglichen, wenn sich der Rotor in Mittellage befindet. Dabei sind die Impedanzen der gegenüberliegenden Sensorelemente gleich groß und die Brückenausgangsspannung  $\underline{U}_{Br}$  gleich Null.

Die treibenden Spannungen in den Brückenzweigen sind:

$$\underline{U}_1 = -\underline{U}_2 \quad (5)$$

D. h. die Spannungen sind vom Betrag gleich, jedoch um  $180^\circ$  phasenverschoben. Eine Lageänderung des Rotors aus der Mittellage  $x_0$  um  $\Delta x$  bewirkt eine Änderung der Brückenspannung infolge der Änderung der Impedanzen in den Brückenzweigen durch die vom Luftspalt abhängigen Induktivitäten. Aus dem Maschensatz folgt:

$$\underline{U}_{Br} = -\underline{U}_2 + \frac{(\underline{U}_2 - \underline{U}_1) \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (6)$$

Die Brückenspannung  $\underline{U}_{Br}$  ist eine im Betrag entsprechend der Lageänderung proportionale Spannung mit der Frequenz der Speisespannung  $\underline{U}_0$ . Die Phasenlage der Brückenspannung enthält die Information über die positive oder negative Richtung der Auslenkung.

### 2.3.2 Auswahl geeigneter Werkstoffe

In [1] wurden auf der Basis einer Literatur- und Internetrecherche Werkstoffe für Magnetlageranwendungen im Hochtemperaturbereich eruiert. Dabei wurden neben den Werkstoffen für die

elektrischen und magnetischen Kreise im Magnetlager auch die für deren Funktion maßgeblichen Isolationswerkstoffe einschließlich der Werkstoffe für Spulenkörper berücksichtigt. Anders als beim induktiven Hochtemperatursensor sollten die ferromagnetischen Werkstoffe im Hochtemperaturmagnetlager eine möglichst hohe Sättigungsflussdichte aufweisen, damit bei der Einsatztemperatur im Arbeitspunkt noch eine ausreichende Induktion für die Krafterzeugung zur Verfügung steht. Im Arbeitsbereich des induktiven Sensors beträgt die magnetische Induktion wenige Millitesla. Zum Einen soll der Sensor, der ja vom Aufbau ein kleines Magnetlager darstellt, keine zusätzlichen Kräfte auf den Rotor aufbringen und Verluste erzeugen. Zum Anderen ist zur Erfassung der Induktivitätsänderung Kleinsignalverhalten ausreichend, wodurch außerdem noch eine Linearisierung um den Arbeitspunkt stattfindet.

Ausschlaggebend für die Auswahl der im Prototyp des Hochtemperatursensors zum Einsatz kommenden Werkstoffe waren neben den erreichbaren technisch/technologischen Parametern die Verfügbarkeit am Markt und die Lieferbarkeit auch in entsprechenden Mindermengen. Daher wurden parallel zu den Arbeiten an der Entwicklung des Sensors weiterführende Materialrecherchen durchgeführt. Resultierend daraus werden am Sensor folgende Werkstoffe eingesetzt:

- Wicklungsdraht ISOTAN, Nenndurchmesser 0,3 mm, isolierend oxidierte Ausführung
- Elektroblech NO20-13 mit Elektroblechlack Remisol EB 5308
- Polyimidfolie Flexiso PI FI 16000
- Glasseidenrohrschlauch BIS ROH, unbeschichtet
- Sauereisen-Zement Nr. 8

ISOTAN ist eine unmagnetische, oxidations- und korrosionsbeständige Legierung für Heizdrähte mit einer Anwendungstemperatur an Luft bis 600 °C und einem über einen weiten Temperaturbereich von 20 °C bis 500 °C konstanten spezifischen elektrischen Widerstand von  $49 \mu\Omega\text{cm}$ . Als Spulendraht kommt die oxidiert isolierende Ausführung zum Einsatz. Der Draht

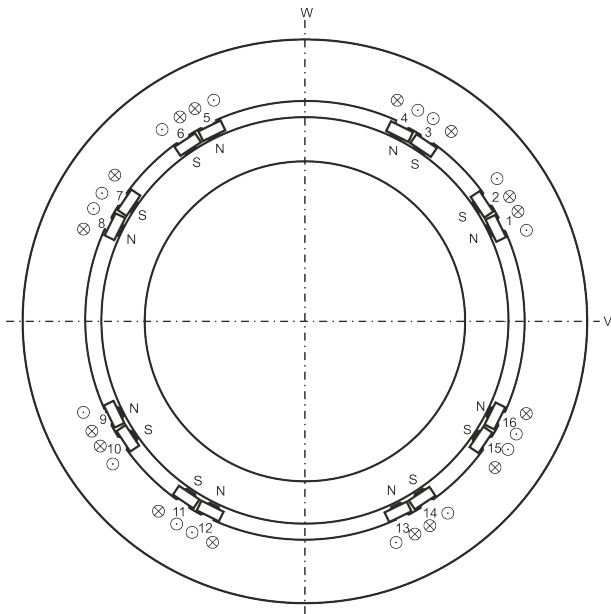
kann weich- bzw. hartgelötet und auch geschweißt werden [7]. Auf Grund der Frequenz der Speisespannung des induktiven Sensors wurde das Elektroblech NO20-13 mit einer Lackisolation Remisol EB 5308 gewählt, die eine Temperaturbeständigkeit bis 300 °C aufweist. Aus Platzgründen werden keine starren Spulenkörper sondern Polyimidfolien als Isolation zwischen dem Blechpaket und den Spulen verwendet. Diese Folie ist ebenfalls bis 300 °C Dauertemperaturbeständig. Die Verbindungen der Spulen untereinander und die ausgeführten Spulenden werden mittels Glasseidenschlauch mit einer maximalen Einsatztemperatur von 450 °C isoliert. Als elektrische Isolation und Schutz der Spulen vor chemischen, thermischen und mechanischen Einflüssen ist Sauereisen-Zement Nr. 8 geeignet. Sauereisen Nr. 8 ist ein nicht korrosiver, chemisch abbindender Zement aus Magnesiumoxid, Zirkonsilikat und Magnesiumphosphat und wird zum Vergießen, Abdichten und Isolieren bspw. von Thermoelementen, Sensoren oder Heizelementen eingesetzt. Die maximale Betriebstemperatur beträgt 1426 °C.

Mit den Werkstoffen dieser handelsüblichen Einzelkomponenten ergibt sich somit eine Dauereinsatztemperatur des gesamten Sensors von 300 °C.

### 2.3.3 Algorithmus zur Auslegung des Induktiven Lagesensors

Für die Auslegung eines differentiellen Queranerkenners wurde ein Algorithmus entwickelt mit dem es ausgehend von der Rotor- und Statorgeometrie und den hinterlegten Materialdaten möglich ist, die von der radialen Rotorlage abhängige Brückenausgangsspannung in beiden Bewegungsachsen  $V$  und  $W$  entsprechend Abb. 2 zu berechnen. Für die analytische Berechnung sind nachfolgende Vorgaben erforderlich:

- geometrische Daten von Rotor und Stator (Polanordnung, Innen-, Außen- und Nutdurchmesser, axiale Ausdehnung)
- Spulendaten (Windungszahlen, Material Wickeldraht, spezifischer elektrischer Widerstand, Drahtlänge, Drahtdurchmesser)



**Abb. 2:** Radialspulen - Kennzeichnung, Verschaltung, magnetische Polarität

- Materialdaten Blechpakete (Blechsorte, -dicke, Isolationstyp, Stapelfaktor, Magnetisierungskennlinie)
- Betrag der Brückenspeisespannung und deren Frequenz
- Vektor der Rotorauslenkung (Betrag, Winkel)

Nach der Dateneingabe erfolgt die Berechnung entsprechend der Reihenfolge:

- Berechnung der Polflächen
- Berechnung der Splinefunktion der Magnetisierungskennlinie und Kontrollausgabe
- Bestimmung der lageabhängigen Luftspalte zwischen Rotor und Stator an allen Sensoren
- Ermittlung der Schnittpunkte der MKL mit den Luftspaltgeraden aller Polpaare
- Berechnung der Induktivitäten der Polpaare aus den Flussdichten der Schnittpunkte
- Ermittlung von  $Z = R + j\omega L$  für die Wicklungen aller Polpaare und Zusammenfassung zu den Zweigimpedanzen
- iterative Berechnung der luftspaltabhängigen komplexen Zweigströme zur Erfüllung der Maschengleichung
- Berechnung der lageabhängigen Brückenausgangsspannung je Achse

Zur Verifikation des analytischen Modells wur-

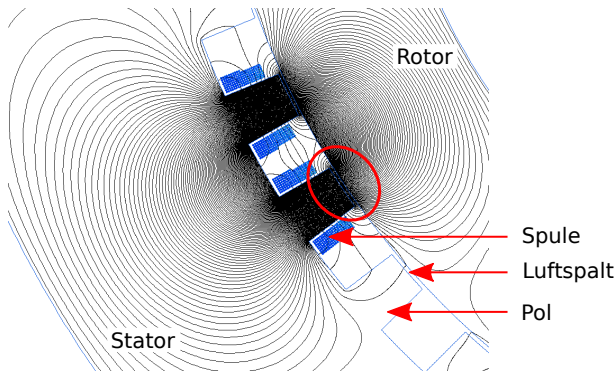
den Vergleichsrechnungen mittels FEM durchgeführt. Dazu wurde ein 2D-FEM-Modell des Sensors erstellt und parametrisiert. Vergleichsrechnungen zwischen dem analytischen Modell und dem FEM-Modell ergaben erhebliche Abweichungen bei der Berechnung der Brückenausgangsspannungen. Dabei wurden relative Fehler von bis zu 24 Prozent ermittelt. Die Größe der Fehler ist für den Auslegungsprozess inakzeptabel. Die Fehlerursachen liegen in der Abstraktion des analytischen Modells gegenüber dem die Realität wesentlich besser abbildenden FEM-Modell. Die Einflüsse folgender Einzeleffekte wurden daraufhin näher untersucht:

- Skin-Effekt
- Proximity-Effekt
- Streuflüsse
- Pol- bzw. Luftspaltaufweitung

Ziel dieser Untersuchungen war es, die arbeitspunktabhängigen Einflüsse der Einzeleffekte auf die Brückenausgangsspannung zu analysieren und zur Reduzierung der Fehler in Form von Korrekturfaktoren bzw. -funktionen im analytischen Modell zu berücksichtigen. Die Untersuchungen zeigten, dass sowohl der Skin- als auch der Proximity-Effekt bei der Betriebsfrequenz der Brückenspeisespannung keine bzw. nur marginale Auswirkungen auf die Brückenspannung haben. An den Polen kommt es durch den seitlichen Austritt der Feldlinien am Polzahn zu einer Polaufweitung, d. h. zu einer Vergrößerung der effektiv wirksamen Polflächen, vgl. Abb. 3. Nach Glg. 3 ist die Sensorinduktivität der Polfläche proportional. Demnach erhöht sich durch eine größere Polfläche die Sensorinduktivität und somit die Sensorausgangsspannung. Im Ergebnis liegt eine luftspaltabhängige Korrekturfunktion für die Polfläche  $A_{Polkorr}(s)$  vor, die in der analytischen Berechnung berücksichtigt wird. Diese berechnet sich aus der projektierten Polfläche  $A_{Polproj}$  entsprechend Glg. 7:

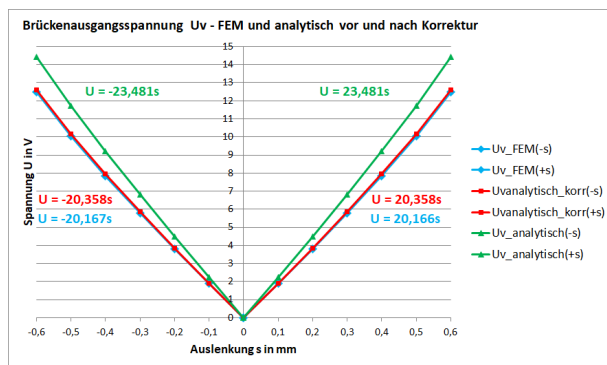
$$A_{Polkorr} = (0,0953s + 1,1178)A_{Polproj} \quad (7)$$

In Abb. 4 sind dafür beispielhaft die Ergebnisse der Berechnung der Brückenausgangsspannung  $U_V$  der V-Achse mit und ohne Korrekturfunktion im Vergleich zur FEM-Berechnung für die



**Abb. 3:** Magnetfeld an einem Sensorpolpaar mit Streufluss und Polaufweitung

Auslenkung des Rotors in der Achse der Polpaare 1/2 und 9/10 nach Abb. 2 dargestellt. Die relativen Fehler konnten hierbei von 15 % auf ca. 1 % reduziert werden. Die Empfindlichkeit



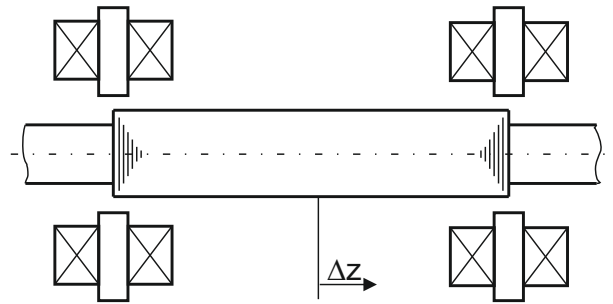
**Abb. 4:** Brückenausgangsspannung  $U_v$  vor/nach der Korrektur

des Sensors ergibt sich zu ca.

$$|E_{radial}| = 20 \text{ mV}/\mu\text{m}. \quad (8)$$

### 2.3.4 Erweiterung des Sensors um die axiale Lagemessung

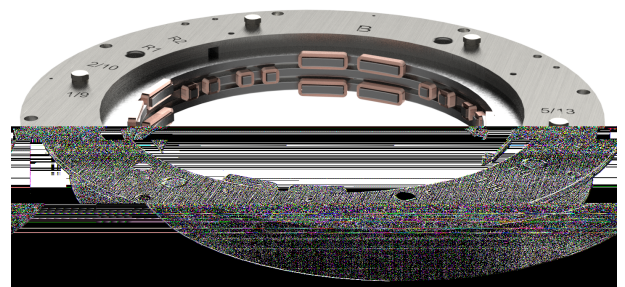
Der vorgestellte Radialsensor wurde um die Möglichkeit der axialen Lagemessung erweitert. Dazu wird die Abhängigkeit der Induktivität von der Eisenquerschnittsfläche des Magnetkreises gemäß Glg. 3 nach dem Prinzip des Differential-Tauchankeraufnehmers ausgenutzt. Der Rotor wird mittig zwischen zwei axialen Sensorspulen angeordnet, sodass der Rotor bspw. jeweils die Hälfte der Eisenquerschnittsfläche überdeckt, wie Abb. 5 zeigt. Eine axiale Auslenkung des Rotors um  $\Delta z$  führt demnach zu einer Verkleinerung der wirksamen Eisenfläche



**Abb. 5:** Axiallagesensor nach dem Differential-Tauchankerprinzip

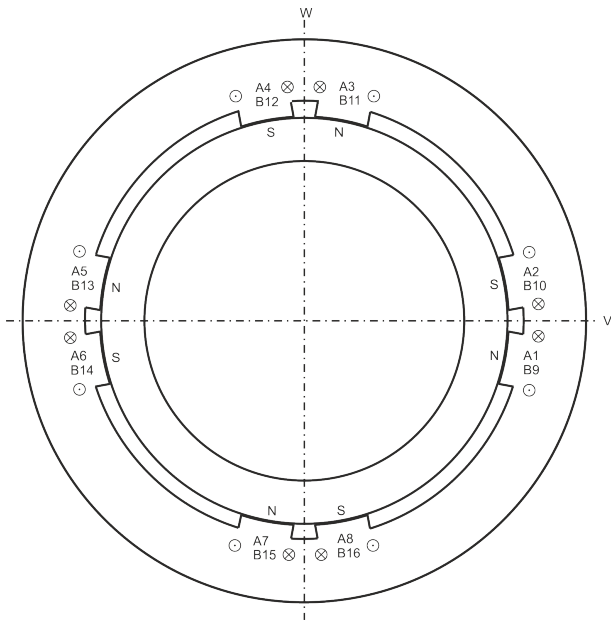
auf der linken und zu einer entsprechenden Vergrößerung der Eisenfläche auf der rechten Seite. Gleichzeitig auftretende Auslenkungen des Rotors in radialer Richtung werden durch eine Reihenschaltung der Sensorspulen auf jeder Seite des Rotors erfasst, diese werden aber im Differenzsignal nicht wirksam, da sie auf beiden Seiten des Rotors den gleichen Betrag haben.

In Abb. 6 ist der Sensorstator für beide Messsysteme dargestellt. In diesen sind drei Blechpakete eingebracht, zwischen denen Abstandsbleche angeordnet sind. Die Abstandsbleche dienen der magnetischen Trennung der unterschiedlichen Magnetkreise und sind aus paramagnetischem Material. In der Mitte befindet sich der radiale Sensor mit den Polen und Wicklungen. Die beiden äußeren Blechpakete sind identisch und tragen die Spulen des Axiallagesensors entsprechend der Anordnung nach Abb. 7. Eine



**Abb. 6:** Sensorstator zur kombinierten Messung der axialen und radialen Rotorauslenkung

Modellierung des Axialsensors ist mit 2D-FEM-Programmen nicht mehr möglich. Daher erfolgte die Modellierung und Berechnung des Sensors in 3D. Abb. 8 zeigt die berechneten Brückenausgangsspannungen  $U_z$  des Axialsensors für eine

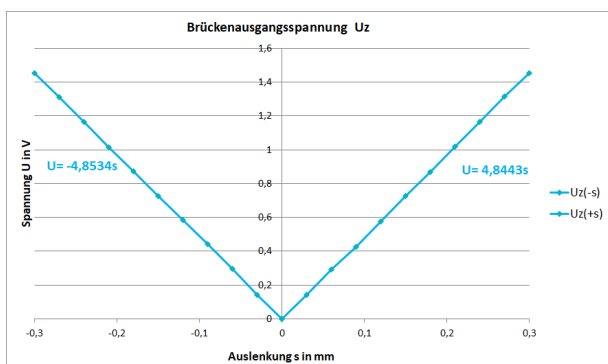


**Abb. 7:** Blechschnitt der axialen Sensorringe und Verschaltung der Sensorspulen

axiale Auslenkung des Rotors im Bereich von  $\pm 0,3$  mm. Die Empfindlichkeit beträgt demnach ca.

$$|E_{axial}| = 4,8 \text{ mV}/\mu\text{m} \quad (9)$$

und somit rund ein Viertel der Empfindlichkeit des Radialsensors. Diese kann funktionsbedingt durch eine Vergrößerung der Polflächen erhöht werden.



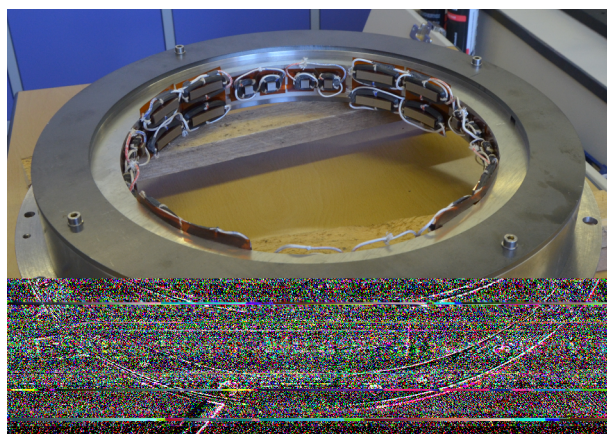
**Abb. 8:** Brückenausgangsspannung des Axialsensors bei einer Auslenkung zwischen  $\pm 0,3$  mm

### 2.3.5 Fertigung und Vorbereitung der Inbetriebnahme

Im Ergebnis der Auslegungsrechnungen des kombinierten Axial-/Radialsensors auf Basis der vorausgegangenen Werkstoffauswahl für die

Sensorkomponenten lagen die geometrischen Abmaße und die elektrischen/magnetischen Daten für die Konstruktion des Sensors vor. Zusätzliche Restriktionen für die Anschlusskonstruktion ergaben sich aus den geometrischen und konstruktiven Gegebenheiten am B-seitigen Wellenende und dem Notfanglager des Versuchstandes MFLP, an dem der Sensor praktisch getestet und untersucht werden soll. Auf dieser Grundlage erfolgte die Erstellung der Fertigungs- und Prüfunterlagen, die Ausschreibung und die Beauftragung der Fertigung der Sensorbauteile.

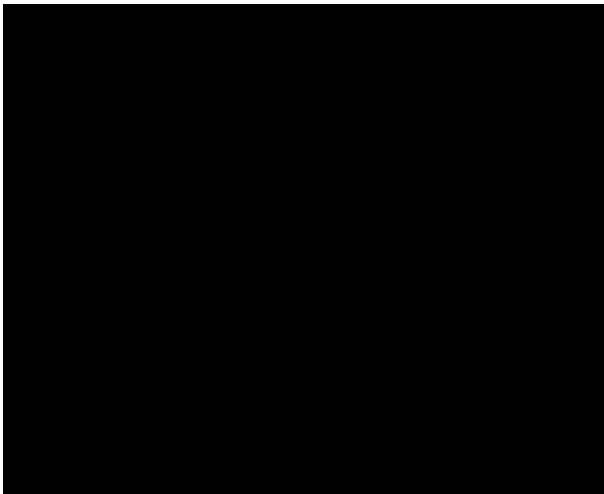
Nach der Fertigung und Lieferung der Sensorkomponenten erfolgte deren Montage. Rotorseitig wurde das Blechpaket einschließlich der Deckbleche mit einem thermischen Schrumpfsitz auf dem Blechpakethalter befestigt, der seinerseits über einen Zentrierflansch am Wellenende montiert wird. Gegen axiale Verschiebung ist das Blechpaket mit einem Halteblech am Blechpakethalter verschraubt und damit gesichert. Statorseitig wurden die einzelnen radialen und axialen Sensorspulen auf die Pole der Blechpakete aufgesteckt, die Verbindungsdrähte zwischen den Spulen verschweißt und die Anschlussdrähte über den Blechpaketrückern nach außen geführt. Das komplette Blechpaket wurde danach mit einem thermischen Schrumpfsitz in das Statorgehäuse eingesetzt und über einen Gehäusedeckel verspannt und gesichert. Abb. 9 zeigt den zusammengebauten Sensorstator mit den Sensorspulen. Nach der Komplettierung von Sensorrotor und



**Abb. 9:** Sensorstator nach dem Zusammenbau -stator wurde der Sensor auf eine eigenentwickel-



te und gebaute Kalibriervorrichtung gespannt. Diese besteht aus einer starren Aufspannung für den Sensorstator und einer beweglichen Aufnahme des Rotorteiles. Die Aufnahme des Rotorteiles wurde auf einem XY-Messtisch und einem Höhenverstellisch montiert. Über Feingewindespindeln mit Skalenteilung von  $5\ \mu\text{m}$  bzw.  $10\ \mu\text{m}$  ist eine Verschiebung des Rotors in allen drei Achsen  $x, y, z$  möglich. Als Referenzmesssystem wurden in allen Achsen Wirbelstromsensoren installiert. Diese messen auf einen Referenzmesskörper in Form eines Quaders aus 42CrMo4. Eine computergestützte Messwerterfassung gestattet die Messung und zeitsynchrone Aufzeichnung der Brückenausgangsspannungen und der Signale des Referenzmesssystems. Damit können nach Fertigstellung und Inbetriebnahme der Sensorelektronik (Abschnitt 3.3.2) die Sensor-kennlinien ermittelt und der Sensor kalibriert werden. In Abb. 10 ist der Sensor auf der Kali-



**Abb. 10:** Sensor auf der Kalibriervorrichtung

briervorrichtung dargestellt.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Kalibrierung des Sensors ist geplant, diesen am Versuchsstand MFLP zu montieren und unter praxisnahen Bedingungen zu testen. Im Vorfeld erfolgt der Verguss des Sensorstators mit Sauereisen-Zement. Das dient der mechanischen Fixierung und dem Schutz der Spulenwicklungen.

### 3 Sensorelektronik

#### 3.1 Messprinzip

Der Einsatz des induktiven Sensors erfordert eine geeignete Elektronik. Diese übernimmt die Speisung der jeweiligen Halbbrücke der drei Bewegungsachsen  $x, y, z$  mit einem harmonischen Signal (differentielle Ausgangsspannung  $\pm 15\ \text{V}$ ; Signalfrequenz  $17,5\ \text{kHz}$ ; sinusförmig). An den Mittelanzapfungen der Halbbrücken werden die harmonischen Brückenausgangssignale abgegriffen und als lageabhängige Messsignale über phasenselektive Gleichrichter aufbereitet.

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Endstufe wurden folgende elektrische Parameter der Messhalbbrücken für die radiale Mittellage ermittelt:

- Induktivität von  $13,6\ \text{mH}$
- ohmscher Widerstand der Wicklungen von ca.  $200\ \Omega$

Daraus resultiert ein durch die Endstufen zu treibender Strom von max.  $50\ \text{mA}$ .

#### 3.2 Schaltungsentwurf

Für den Axial- und Radialsensor werden baugleiche Baugruppen eingesetzt. Die Schaltungsentwicklung wurde konservativ und unter Berücksichtigung bekannter Grundschaltungen durchgeführt.

Abb. 11 zeigt die konzeptionelle Baugruppe als Zusammenschaltung von drei Modulen und ihre Anbindung an die Wechselspannungsmessbrücke.

Dem Konzept liegt grundsätzlich eine NF-Verstärkerschaltung zugrunde, wie sie auch in Audioanwendungen eingesetzt wird. Die Forderung nach einer leistungsfähigen und verzerrungsarmen Brückenspeisung führte zur Auswahl einer vorkonfektionierten Audio-Endstufe mit Darlington-Transistor.

**Oszillator** – Der Oszillator funktioniert nach dem Wien-Robinson-Prinzip. Schaltungsdemonstratoren müssen oft in weiten Bereichen einstellbar und abstimmbare sein. Der Wien-Robinson-Oszillator ist ein Schwingkreis, der

mit zwei RC-Schaltungen (Hoch-/Tiefpass) vergleichsweise einfach aufgebaut und dennoch in einem weiten Frequenzbereich stabil trimmbar ist. Er kommt ohne induktive Bauelemente aus. Der Oszillator speist die nachgeschalteten NF-Verstärkermodule sinusförmig mit einer Frequenz von 17,5 kHz. Durch die Anpassung der parasitären Beschaltung kann die Oszillatorfrequenz in einem weiten Bereich eingestellt werden.

Abb. 12 zeigt das Oszillatormodul.

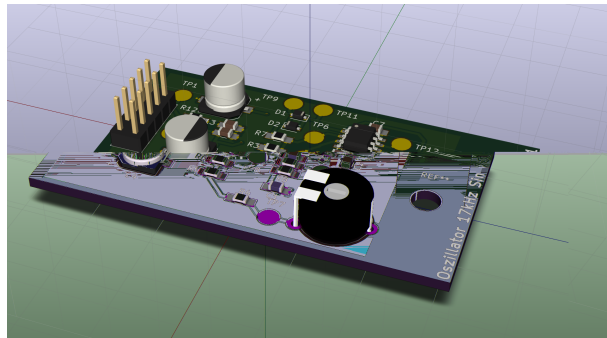


Abb. 12: Konstruktion des Oszillatormoduls

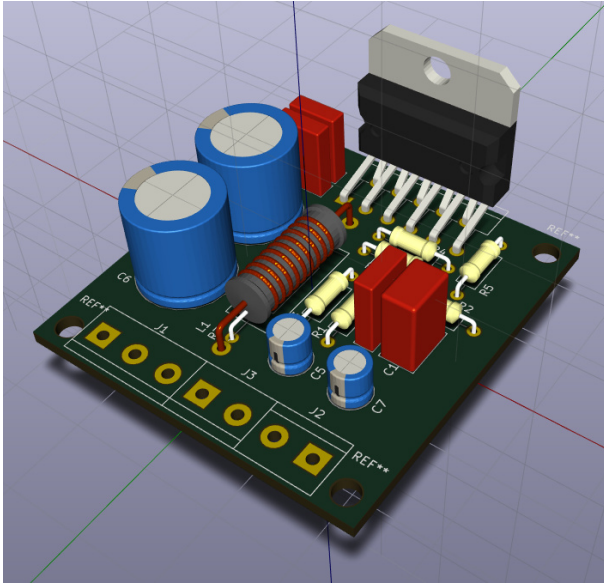
**Differentieller NF-Verstärker** – Es werden pro Baugruppe zwei Endstufen differentiell miteinander verschaltet. Sie speisen die Wechselspannungsmessbrücke mit einer Spannung von  $\pm 15$  V.

Abb. 13 zeigt das NF-Verstärkermodul.

**Phasenselektiver Gleichrichter** – Der phasenselektive Gleichrichter erhält vom Oszillator ein Referenzsignal. Damit ist dem Gleichrichtermodul die Phasenlage des Oszillatorsignals bekannt. Weiterhin wird der Gleichrichter mit einem harmonischen Signal (Mittelanzapfung einer Halbbrücke des induktiven Sensors) gespeist. Dieses Messsignal weist eine luftspaltabhängige Amplitude und Phasenlage auf.

Der phasenselektive Gleichrichter ist ein Zweiweggleichrichter. Aus der relativen Phasenlage des Messsignals zum Referenzsignal wird ein Schalter (MOSFET) gesteuert. Dieser kommutiert bei Phasengleichlage die negative Halbwelle in die positive Ebene. Bei einer Phasenverschiebung von  $180^\circ$  zwischen Referenz- und

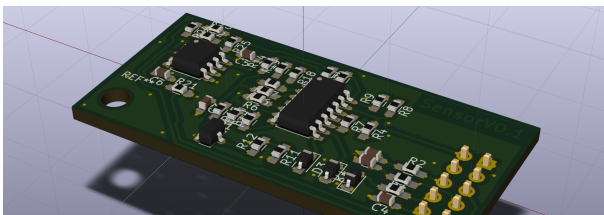
Abb. 11: Blockschaltbild der Sensorelektronik



**Abb. 13:** Konstruktion des Verstärkermoduls

Messsignal wird die positive Halbwellen in die negative Ebene kommutiert. Im Ergebnis wird so die positive oder negative Auslenkung des Rotors als positiver oder negativer Effektiv- bzw. Gleichrichtwert im Sensorsignal durch ein positives/negatives Vorzeichen abgebildet. Die Amplitude ist das Maß für den Grad der Auslenkung.

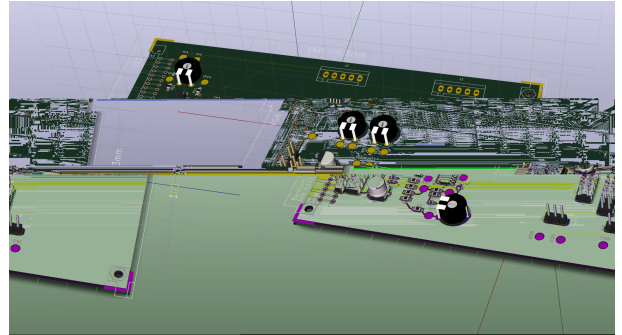
Abb. 14 zeigt das Gleichrichtermodul.



**Abb. 14:** Konstruktion des Gleichrichtermoduls

Die Komponenten werden auf eine Trägerplatine (Abb. 15) adaptiert.

Es wurde eine entsprechende Elektronik konzipiert und gefertigt. Parallel dazu wurde ein Gehäuse auf den Einsatz der Elektronik vorbereitet.



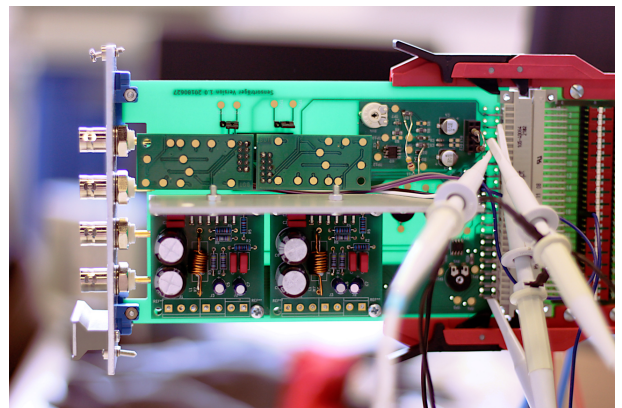
**Abb. 15:** Konstruktion der Trägerplatine

### 3.3 Inbetriebnahme

#### 3.3.1 Vorinbetriebnahme der Elektronik

Die einzelnen Module wurden zunächst im Labor separat auf ihre Funktion geprüft und schrittweise in Betrieb genommen. Konstruktions- bzw. Bestückungsfehler wurden behoben. Es musste auch eine Pegelanpassung zwischen dem Vorverstärker und den Endstufen vorgenommen werden. Die Gesamtschaltung konnte erfolgreich vorab in Betrieb genommen werden.

Abb. 16 zeigt eine vollständig bestückte Platine mit den Schaltungsmodulen.



**Abb. 16:** Vollständig aufgebaute Sensorelektronik

Die Schaltung ist für eine Brückenspeisespannung von maximal  $\pm 40\text{ V}$  ausgelegt. Damit wird auch bei längeren Kabelwegen noch ein ausreichend großer Signal-Rausch-Abstand gewährleistet. Für Funktionstests der Sensorelektronik am Sensorelement wurde die Speisespannung vorübergehend auf  $\pm 15\text{ V}$  reduziert.

### 3.3.2 Inbetriebnahme des Sensorsystems

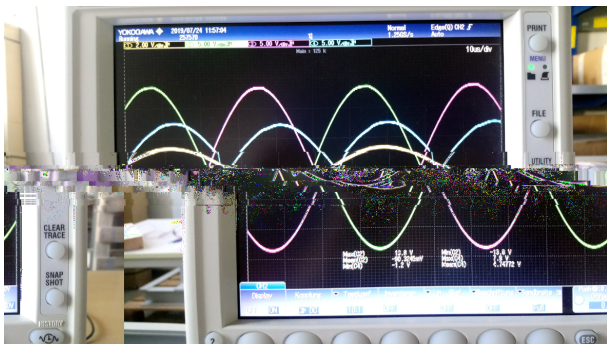
Im nächsten Schritt wurde die Elektronik mit dem induktiven Sensorelement zusammengesetzt. Zu diesem Zweck wurde der Sensorring in die Kalibriereinrichtung eingespannt (Abschnitt 2.3.5) und das Rotorblechpaket in den Luftspaltgrenzen axial bzw. radial linear verfahren.

Die Kalibriereinrichtung ist mit einem diversitären Lagemesssystem ausgerüstet. Hierbei werden Wirbelstromsensoren eingesetzt. Im Rahmen von Validierungsuntersuchungen werden diese Lageinformationen als Referenz genutzt.

Abb. 17 zeigt den Testaufbau mit der Kalibriereinrichtung im Vordergrund. Im Hintergrund sind die Sensorelektronik, Spannungsquellen und der Oszillograph erkennbar.

**Abb. 17:** Testaufbau mit der Kalibriereinrichtung

Abb. 18 zeigt beispielhaft das Oszillogramm einer Messfahrt entlang einer radialen Achse.



**Abb. 18:** Messung an der Lagesensorik

Es wurden die Spannungsverläufe der Brückenspeisung (magenta, grün), des Messsignals an der Mittelanzapfung der Halbbrücke (gelb) und das Messsignal nach der phasenselektiven Gleichrichtung (blau) messtechnisch erfasst.

Die Brückenspeisungen und das Messsignal an der Mittelanzapfung zeigen erwartungsgemäß harmonisches Verhalten mit 17,5 kHz. Der Rotor wurde definitionsgemäß positiv aus seiner Neutrallage ausgelenkt. Der phasenselektive Gleichrichter kommutiert die negativen Halbwellen in die positive Ebene. Das Oszillogramm zeigt eine pulsierende Gleichspannung mit positivem Vorzeichen. Der Betrag änderte sich erwartungsgemäß mit dem Grad der Auslenkung.

Das gleichgerichtete Messsignal zeigt Verzerrungen. Ursächlich dafür ist der MOSFET mit seinen Schalteigenschaften (kapazitives Verhalten zwischen Gate und Source) im phasenselektiven Gleichrichter. Sie verursachen deutliche Gruppenlaufzeiten.

### 3.4 Fazit

Der Funktionsnachweis wurde am induktiven Sensorsystem erfolgreich geführt. Das qualitative Signalverhalten und insbesondere die Schaltungsfunktionen stellten sich erwartungsgemäß an sämtlichen Testpunkten ein und sind damit plausibel. Die Validierung der Messergebnisse, d. h. der Vergleich mit den Simulationsergebnissen (Abschnitte 2.3.3 und 2.3.4) wird als nächstes Einzelziel verfolgt. Dazu sind weitere Experimente auch unter Berücksichtigung von Referenzlageinformationen notwendig.

Der diskrete Schaltungsaufbau des Demonstrators unterstützte das Verständnis für die Funktionsweise der Module. Die Inbetriebnahme der Elektronik zeigte damit aber auch Schwächen bzw. Fehler im Schaltungsdesign und der -konstruktion. In diesem Zusammenhang ist ein Redesign des Schaltungslayouts geplant. Ziel ist hier, die induktive Lagesensorik zu integrieren, digitalisieren und mit geeigneten Algorithmen

für den Einsatz nach Industrie 4.0 zu ertüchtigen.

#### 4 Zusammenfassung

Es wird das Ziel verfolgt, ein langzeitstabiles und zuverlässiges Lagesensorsystem für aktiv magnetgelagerte Rotoren in Turbomaschinen für den Einsatz bei hohen Temperaturen zu entwickeln.

Mit handelsüblichen Materialien (ISOTAN-Wicklungsdraht, NO20-13-Elektroblech usw.) und standardisierten Fertigungsverfahren wurde ein Sensorelement ausgelegt, konstruiert und gefertigt. Dieses soll bis zu 300 °C temperaturstabil betrieben werden können.

Die dazu notwendige Messelektronik wurde unter Anwendung bekannter Grundschaltungen (Oszillator, NF-Verstärker, phasenselektiver Gleichrichter) konstruiert und ein Demonstrator gefertigt.

Es wurden erste Funktionstests im Rahmen der Inbetriebnahme durchgeführt. Die Experimente unter Normalbedingungen zeigen ein plausibles Verhalten der funktionalen Zusammenhänge zwischen der Luftspaltänderung und den elektrischen Parametern. Positive und negative Auslenkungen des Rotors werden im Sensorsignal vorzeichenrichtig abgebildet, ebenso der Auslenkungsgrad.

#### Ausblick

Die Funktionen und Eigenschaften des Sensorsystems müssen verifiziert werden. Dazu ist das Messsystem zu kalibrieren. Die experimentell ermittelten statischen Kennlinien der radialen und axialen Sensorik werden mit den Auslegungsergebnissen verglichen.

Nach Abschluss der Untersuchungen bezüglich der elektrischen und magnetischen Parameter muss das Sensorelement mit dem Sauereisen-Zement vergossen werden. Anschließend sind Experimente zur Verifikation des Temperaturverhaltens (z. B. Drift des ohmschen Wicklungswiderstandes) und der Temperaturbeständigkeit bis 300 °C durchzuführen. Dazu wird der vergossene Sensor innerhalb von Langzeittests

in einem Laborofen thermisch definiert belastet.

Abschließend sind experimentelle Untersuchungen zur Dynamik des Sensorsystems geplant. Dazu wird das Sensorelement am Rotor des Magnet- und Fanglagerprüfstandes MFLP montiert und bei Drehzahl getestet.

Parallel dazu ist ein Redesign der Sensorelektronik geplant.

Mit Abschluss der experimentellen Arbeiten soll ein qualifiziertes Hochtemperatur-Sensorsystem für den Einsatz in aktiven Magnetlagerungen zur Verfügung stehen.

#### References

- [1] Rottenbach T.; Vanek, C. ; Worlitz, F.: Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager. In: *Proceedings 11. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz*. Chemnitz, Sep. 2017
- [2] Oburger, Wilhelm: *Isolierstoffe der Elektrotechnik*. Springer-Verlag Wien GmbH, 1957
- [3] Fischer, Rolf: *Elektrische Maschinen*. Carl Hanser Verlag München, 2017
- [4] Gempp, T: *Mechatronik eine lagerlosen Spaltrohrpumpe*. Diss. ETH Zürich, 1997
- [5] Schweitzer, Gerhard ; Maslen, Eric H.: *Magnetic Bearings - Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [6] Schweitzer, G. ; Traxler, A. ; Bleuler, H.: *Magnetlager - Grundlagen, Eigenschaften und Anwendung berührungsfreier, elektromagnetischer Lager*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993
- [7] Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG (Hrsg.): *Datenblatt ISOTAN*. 2014