

DIMENSIONIERUNG VON HOCHTOURIGEN MAGNETLAGERN AM BEISPIEL EINER MAGNETLAGERSPINDEL FÜR 140.000 U/MIN

N.Hübner

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

Am Beispiel der Auslegung einer Magnetlager-
spindel für 140.000 U/min sollen die Besonder-
heiten bei der Dimensionierung hochtouriger
Antriebe dargestellt werden.

So ist es unerlässlich, dass neben der Festig-
keitsauslegung auch besonderes Augenmerk auf
die Rotordynamik gelegt wird. Dies bedingt,
dass bezüglich des Wellenaufbaus der Spagat
zwischen dem Platzbedarf der einzelnen auf der
Welle befindlichen Komponenten und dem zum
unterkritischen Betrieb zwingend nötige, biege-
steife Aufbau umgesetzt wird.

Es wird gezeigt durch welche Maßnahmen dies
realisiert werden kann und wie die für den Be-
trieb zwingend benötigten Komponenten wie
Messsystem, Motor- und Lagerkomponenten
sehr kompakt aufgebaut werden können. Hierzu
musste zum Teil auf bisher für Magnetlager eher
unkonventionelle Werkstoffe und Aufbauten
zurückgegriffen werden.

Ein weiteres Problem stellt die möglichst ver-
koppelungsfreie Anbindung des Prüflings an die
Magnetlagerspindel dar.

Ebenfalls nicht unwesentlich sind die im Betrieb
auftretenden Verluste durch Luftreibung und
Ummagnetisierung. Diese Verluste werden vom
Antriebsmotor gedeckt und müssen durch eine
geeignete Kühlung abgeführt werden.

Hierfür wurde auf eine kostengünstige Wasser-
kühlung zurückgegriffen, welche eigentlich für
die PC Kühlung vorgesehen ist. Die vorhandene
Realisierung und die Leistungsfähigkeit dieser
PC - Flüssigkühler wird in diesen Beitrag kurz
erläutert.

1 Einleitung

Der anhaltende Trend zu immer höheren
Drehzahlen im Bereich der Antriebstechnik
erfordert auch eine entsprechende zur Ver-
fügung stehende Prüftechnik, zur Verifizie-
rung der technischen Spezifikationen neuer
Entwicklungen.

Probleme bereitet hierbei, dass es auf Grund
der hohen Drehzahlen nicht mehr ohne wei-
teres möglich ist, unmittelbar und mit einfa-
chen Mitteln einen Prüfaufbau zu bewerk-
stelligen.

Wo für Messaufgaben bei niedrigen Dreh-
zahlen noch einfache Kugellager ausrei-
chend waren, sind bei hohen Drehzahlen
teure Speziallager erforderlich, welche zu-
meist noch Nebenapparaturen z.B. für die
Ölkonditionierung, Druckluftversorgung
bzw. Schmierung erfordern.

Hier liegt der Vorteil der Magnetlager, wel-
che aufgrund des fehlenden mechanischen
Kontakts verschleißfrei und wartungsarm
arbeiten. Des Weiteren können mit ihnen
höchste Drehzahlen ($>100.000 \text{ min}^{-1}$) er-
reicht werden, da die drehzahllimitierende
Grenze hauptsächlich nur durch die Festig-
keit des Rotors bestimmt wird.

2 Dimensionierung der Magnetlager

2.1 Dimensionierung und Aufbau des Axiallagers

Als problematisch gestaltet sich bei der Dimensionierung des Axiallagers die Limitierung des maximalen Scheibendurchmessers aufgrund der Materialbelastungen durch Fliehkräfte. Diese wachsen hierbei mit dem Quadrat des Radius der Scheibe an und schon geringe Durchmesseränderungen führen zu einer starken Änderung der im Betrieb auftretenden Spannungen.

Somit ist auch die für die Kraftbildung zur Verfügung stehende magnetische Fläche begrenzt und die Axiallagerkraft kann nicht beliebig gesteigert werden.

Daher ist es erforderlich diese optimal zu nutzen und auftretende Streuflüsse, die zu einer Kraftverringering führen möglichst zu vermeiden.

Mögliche Wege der Streuflüsse sind hierbei zum einen die Nutstreuung innerhalb der Statornut (1), die Streufelder zwischen dem Statoren und der Axialscheibe (2), sowie die Flussstreuung über die Welle (3) welche einen nicht unwesentlichen Anteil an der Kraftverringering darstellt und gleichzeitig unerwünschte Radialkräfte erzeugt.

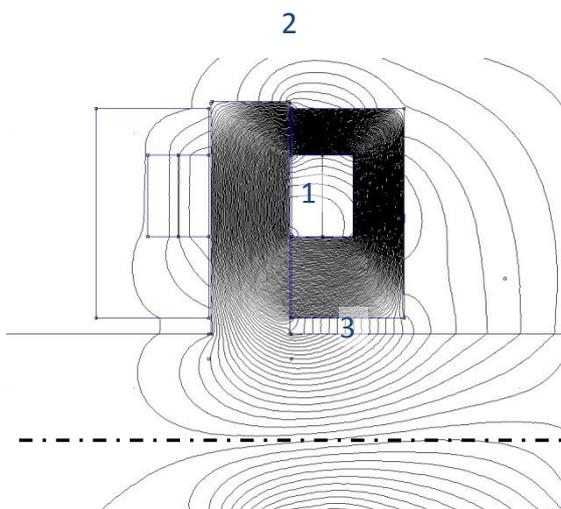


Bild 1: Streuflüsse Axiallager

Gebräuchliche Methoden zur Verringerung der Streuung im Bereich des Axiallagerin-

nendurchmessers (3) z.B. durch Einsetzen einer amagnetischen Hülse, bzw. der Verwendung einer Welle aus amagnetischem Material wirken sich ungünstig auf die Rotordynamik aus und sollten deshalb vermieden werden.

So entsteht z.B. prinzipbedingt infolge der Wärmeausdehnung beim Aufschrupfprozess ein Spalt zwischen Hülse und Axialscheibe welcher den Querschnitt und somit den Verformungswiderstand (Biegesteife c) in diesen Bereich verringert. Dies führt wiederum zum Abnehmen der kritischen Eigenkreisfrequenz ω_k (kritische Winkelgeschwindigkeit) bei der sich theoretisch eine unendlich große Auslenkung der Welle und somit eine Fanglagerberührung bis hin zum Wellenbruch ergibt. Es entsteht die gefürchtete Resonanz der Welle.

Die kritische Winkelgeschwindigkeit ergibt sich allgemein zu:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (1)$$

ω_k Kritische Winkelgeschwindigkeit
 c Federsteife für elastische Biegung
 m Wellenmasse

Die Verwendung einer Edelstahlwelle ist ebenfalls nachteilig, da hierfür die Axialscheibe aufgeschrupft werden muss.

Bedingt durch die hierfür notwendige Bohrung wird bereits bei sehr kleinen Durchmessern die entstehende Tangentialspannung im Innendurchmesser der Axialscheibe doppelt so groß wie bei Vollmaterial und der maximal mögliche Scheibendurchmesser verringert sich stark. Somit sind für hochtourige Anwendungen immer Axialscheiben aus Vollmaterial zu bevorzugen.

Um dennoch die Streuung im Bereich der Welle wirkungsvoll zu verringern wurde als mögliche Lösung dieses Problems der Statoraußendurchmesser vergrößert und die Statorpole nach innen gezogen (Bild 2). Wie im Bild 3 zu sehen, konnte durch diese Maßnahme der Streufluss im Bereich der Welle wirkungsvoll gesenkt werden.

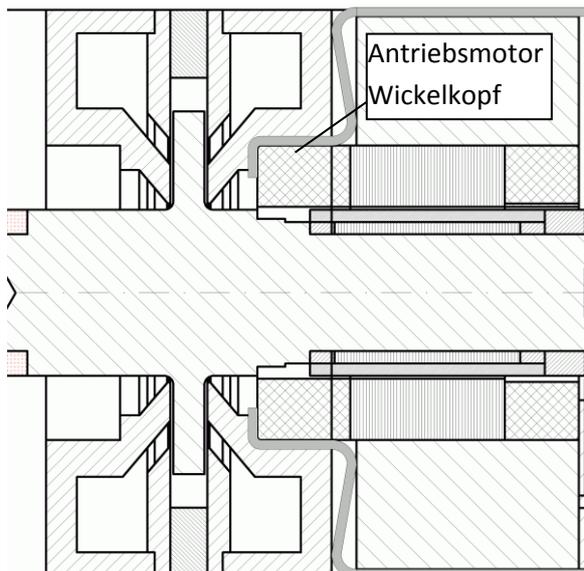


Bild 2: Nach außen gezogener Axialstator mit Motor

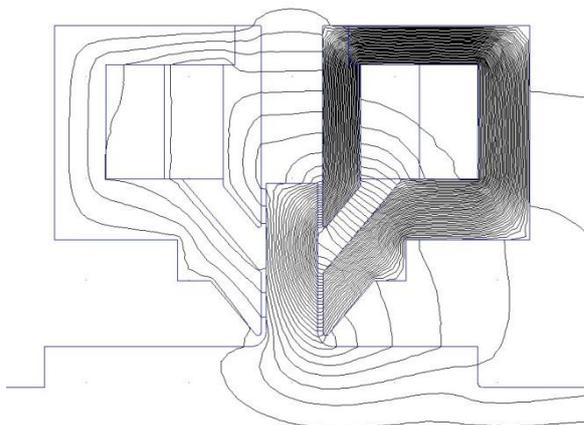


Bild 3: Streufeld nach außen gezogener Axialstator

Des Weiteren kann der nun entstandene Freiraum gleichzeitig zur Unterbringung weiterer mechanischer Komponenten genutzt werden. So wurde im vorliegenden Beispiel der Motorwickelkopf mit im Stator integriert (Bild 2, rechte Statorhälfte) und unter der linken Statorhälfte, zum besseren Werkzeugwechsel eine Blockiervorrichtung für die Welle integriert. Durch den so gewonnenen Platz kann die Wellenlänge weiter verringert werden, was sich wiederum günstig auf die Rotordynamik auswirkt.

Dabei verhält sich die Welle in erster Näherung ähnlich wie ein Biegeschwinger dessen Resonanzfrequenz sich umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Stablänge ver-

hält. Somit gilt, je kürzer die Welle, desto höher die kritische Winkelgeschwindigkeit und somit die im unterkritischen Betrieb ($\omega < \omega_k$) erreichbaren Drehzahlen.

Allerdings war die zu Verfügung stehende Axialkraft bei einem möglichen maximalen Scheibendurchmesser von 53mm immer noch nicht ausreichend und es musste ein Weg gefunden werden die aktive magnetische Fläche weiter zu erhöhen.

Eine wirksame Methode stellt hierfür die Verwendung von Wellenmaterialien mit erhöhter Festigkeit dar. So stand durch den Einsatz des Stahls 34CrNiMo6 mit einer Streckgrenze von 800 N/mm² [1] eine um 23% größere magnetische Fläche gegenüber dem Material 42CrMo4 mit 650 N/mm² [2] zur Verfügung. Entsprechend erhöht sich auch die maximale zu Verfügung stehende Axialkraft.

2.2 Dimensionierung und Aufbau der Radiallager

Die Verwendung von klassischen Heteropolarlagern ist für Magnetlager mit hohen Drehzahlen ungeeignet, da der magnetische Fluss im Rotorblechpaket bei jeder Umdrehung der Welle mehrfach seine Richtung ändert und deshalb die Ummagnetisierungsverluste bedingt durch die hohe Drehfrequenz stark steigen. So durchläuft z.B. bei einem Heteropolarlager mit 8 Polen in NNSS Anordnung der Rotor bei jeder Umdrehung der Welle zweimal die komplette Hystereseschleife des Rotorblechpaketes (Bild 4).

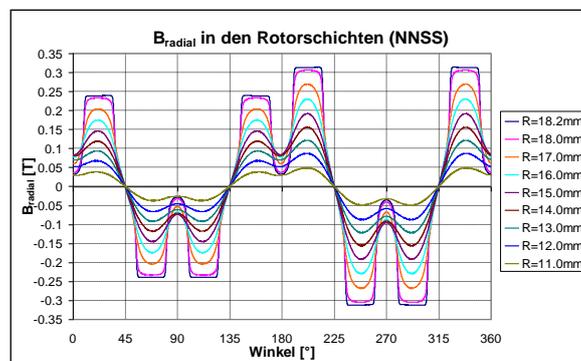


Bild 4: Radialer Feldverlauf in verschiedenen Tiefen des Rotors [3]

In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei der Verwendung von 0,2 mm Blechen für das Rotorblechpaket, Heteropolarlager bis zu einer Drehzahl von 60.000 U/min einsetzbar sind. Darüber hinaus bereitet es Probleme die durch Ummagnetisierung entstehenden Wärmeverluste ausreichende abzuführen und es sinkt der Gesamtwirkungsgrad da diese Verluste vom Antriebsmotor gedeckt werden müssen.

Im Gegensatz dazu tritt bei Homopolarlagern der Fluss in radialer Richtung in das Rotorblechpaket ein. Im Rotor dagegen verläuft der Fluss in axialer Richtung. Somit findet bei jeder Umdrehung kein kompletter Durchlauf der Hystereseurve mehr statt und die Ummagnetisierungsverluste sinken signifikant.

Allerdings entsteht vor allen im Bereich der Pollücke zwischen den Homopolarstatoren auch eine pulsierende radiale- und eine in der Polarität wechselnde tangential magnetfeldkomponente, die weiterhin zu Ummagnetisierungsverlusten führt. Daher ist es insbesondere für hohe Drehzahlen notwendig den Rotor geblecht auszuführen (Bild 5).

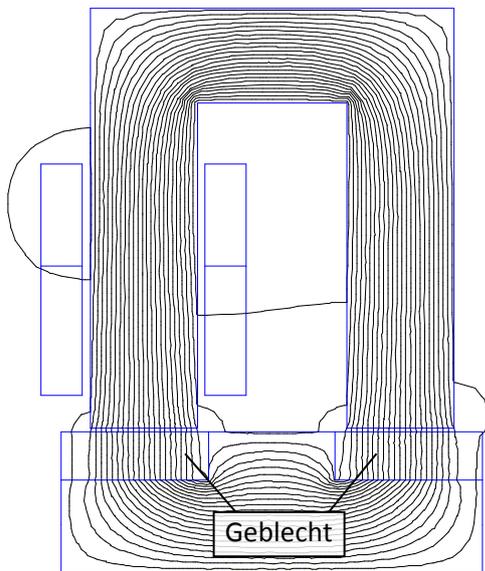


Bild 5: Homopolarlager unter dem Polen geblecht [3]

Dies hat auch den Vorteil, dass als erwünschter Nebeneffekt der magnetische Fluss tief in den Rotor geführt wird und die Eindringtiefe in die Welle vor allen bei hohen Frequenzen enorm verbessert wird.

Nachteilig ist jedoch der damit verbundene erhöhte mechanische Aufwand, da das Rotorblechpaket hierfür auf die Welle aufgeschraubt werden muss.

Des Weiteren, stellt wie zuvor beschrieben, auch bei Radiallagern die Fliehkraft eine limitierende Größe für den Außendurchmesser des Blechpakets und somit für die verfügbare magnetische Fläche dar.

So ist z.B. bei der konzipierten Höchstdrehzahl von 150.000 U/min und einem Sicherheitsfaktor von 1,5 nur ein maximaler Rotorblechpaketdurchmesser von 22,1 mm möglich. Dieser ist bei der rotordynamisch vorgegebenen maximalen Wellenabschnittslänge der Radiallager, für die Erzeugung einer Tragkraft von 40 N nicht ausreichend.

Durch die Verwendung des Materials VACODUR S-PLUS der Firma Vacuumschmelze konnte der Durchmesser auf 27 mm erhöht und die geforderte Tragkraft realisiert werden.

Hierbei handelt es sich um eine hochfeste Eisen Kobalt Legierung mit einer Streckgrenze von $R_m=400 - 800 \text{ N/mm}^2$ [5] die Auswertung der Zugproben des verwendeten Blechmaterials ergaben im vorliegenden Fall ein R_m von 518 N/mm^2 [6] und besaßen somit eine ausreichende Sicherheit. Dagegen besitzt das sonst gebräuchliche Material NO20 nur eine Streckgrenze von 330 N/mm^2 [4].

Ein weiterer Vorteil dieser Legierung ist, dass die Sättigungsinduktion mit $B_S=2,2 \text{ T}$ wesentlich höher als bei NO20 mit $B_S=1,2 \text{ T}$ ausfällt, wodurch theoretisch bei gleicher Fläche die 3,4 fache Kraft erreichbar wäre. Praktisch ist dies jedoch aufgrund von Streuungseffekten nur schwer zu erreichen.

Nachteilig ist jedoch der enorme Preis dieses Materials von 175 € pro Kilo (Stand 29.03.2010) welcher aufgrund der gegenwärtigen Rohstoffpreissituation sicherlich noch weiter steigen wird und somit eher nur

für Kleinst- und Spezialantriebe ökonomisch einsetzbar ist.

3 Optimierung der Wellenrotordynamik

Weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der Eigenfrequenz der Welle sind die Verkürzung der Messspur und damit des Abschnitts Lagemessung auf der Welle, sowie eine massenmäßige Anpassung der Wellenelemente.

3.1 Verkürzung des Lagemesssystems

Zur berührungslosen Lageerfassung der Welle wird ein entsprechendes Lagemesssystem benötigt, welche über eine hohe Auflösung im Mikrometerbereich bei gleichzeitig hoher Grenzfrequenz ($f_G > 16 \text{ kHz}$) verfügt.

Aufgrund der benötigten Erdung der Welle (außer bei synchronisierten Messsystemen) und dem hohen Platzbedarf kam für den Einsatz ein kapazitives Messsystem nicht in Frage.

Auch Wirbelstrommesssysteme waren aufgrund des Platzbedarfs ungeeignet. So ist bei der Verwendung des Sensors TQ401 der Fa. Vibrometer und einem Messbereich von 0,5 mm, je ein Mindestabstand von 8 mm zu benachbarten leitfähigen Teilen einzuhalten [7]. Somit würde für die Sensormessspur 16 mm Wellenlänge pro Messebene benötigt, was zu einer enormen Verringerung der Welleneigenfrequenz führt.

Zudem kommt es infolge des geringen Wellendurchmessers von 27 mm durch Übersprechen der Sensoren in einer Magnetlagerachse bereits zu einer Störspannung von $15 \mu\text{mpp}$ [7] welche durch die magnetische und kapazitive Störungseinkopplung der eng benachbarten Radiallagerstatoren (Abstand=8 mm) noch weiter verstärkt wird.

Des Weiteren empfiehlt es sich aufgrund einer ungleichen Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit an der Wellenoberfläche („magnetische Spots“) zur Rauschreduzierung eine separate Messspur auf die Welle aufzubringen. Dabei ist zu beachten, dass das aufgebrachte Material eine ausreichende

Festigkeit besitzt und insbesondere bei Materialpaarungen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, ein Fliehkraftbedingtes abheben, auch bei hohen Wellentemperaturen ausgeschlossen wird.

Letztendlich stellte sich das optische Messsystem für diesen Anwendungsfall als das geeignetste heraus. Die axiale Ausdehnung der Messspur auf der Welle beträgt nur 4 mm, es ist kostengünstig und weitestgehend unempfindlich gegen Störeinkopplung.

Außerdem kann der Optikträger (Bild 6) gleichzeitig für die Unterbringung der Fanglager genutzt werden, wodurch der Platzbedarf weiter reduziert werden kann.

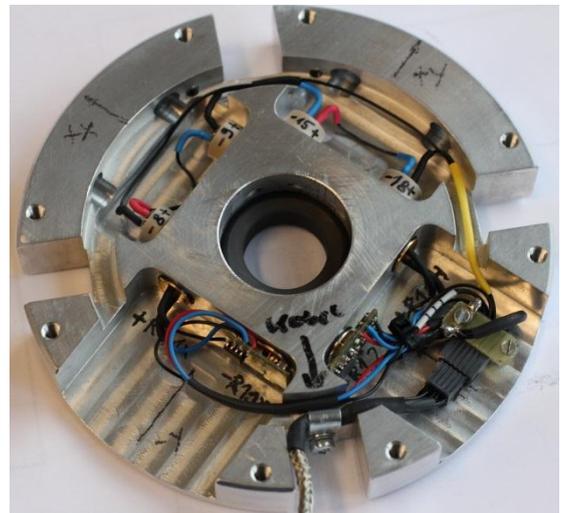


Bild 6: Optikträger bestückt

3.2 Massenmäßige Optimierung der Welle

Wie im Bild 7 dargestellt, treten bei der Biegeschwingung erster Ordnung (V-Schlag) in der Wellenmitte die größten Biegemomente auf.



Bild 7: Biegeeigenschwingung 1. Ordnung [8]

Zum Erreichen einer Möglichst biegesteifen Welle ist es daher sinnvoll, in diesem Bereich die Wellendurchmesser mit einem großen Durchmesser und einer somit hohen

Versteifung zu legen. Daher ist auch die Platzierung des Axiallagers als Element mit der höchsten Masse in diesen Bereich am sinnvollsten. Des Weiteren gilt es Schwingungsanregende Masselemente an den freien Wellenenden möglichst gering zu halten. Im vorliegenden Fall wurden hierfür in der Welle Bohrungen vorgesehen, welche das Gewicht reduzieren.

4 Ankopplungen der Welle an den Prüfling

Ein weiteres Problem stellt die Prüflingsankopplung dar, da bisher keine Kuppelungen in dieser Drehzahlordnung auf dem Markt verfügbar sind.

Es musste eine einfache Lösung gefunden werden, die zur Entkopplung von Schwingungen elastisch ist und zur Vermeidung von Unwuchten gleichzeitig eine verkipfungsfreie und gute zentrische Führung gewährleistet.

Im Bild 8 ist die entsprechende Drehmomentmesswelle mit der Ankoppelstelle dargestellt.

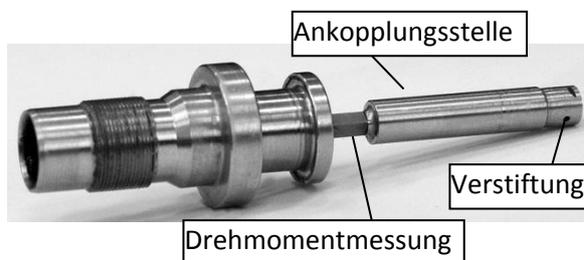


Bild 8: Drehmomentmesswelle mit Ankopplung

Hierbei handelt es sich um eine Steckkupplung bei der die Drehmomentübertragung über ein P4C Polygonprofil im Inneren der der Ankoppelstelle oder über eine mit Überwurfring gesicherte Verstiftung übertragen wird.

Die Länge der Steckkupplung verhindert effektiv Kippbewegungen und eine Schwingungsentkopplung findet über den flexiblen Vierkant im Bereich der Drehmomentmessung statt. Zum Schutz vor unzulässig hohen Schwingamplituden wurde eine optische

Schwingungsüberwachung mit integriertem Fanglager vorgesehen.

5 Kühlwasser-Rückkühlung

Zur Vermeidung einer unzulässig hohen Erwärmung der Spindelkomponenten ist die Verwendung einer Kühlung unerlässlich. Im vorliegenden System kam dabei aufgrund folgender Vorteile eine Wasserkühlung zum Einsatz:

- Geringe Baugröße bei hoher Kühlleistung und daher sehr kompakt
- Leiser und vibrationsarmer Betrieb
- Hohe Ausfallsicherheit
- Günstiger Systempreis
- Verunreinigung des optischen Messsystems durch das Einblasen von Staub wird vermieden

Während früher im privaten Bereich die PC Wasserkühlung nur einigen Enthusiasten vorbehalten war, gibt es mittlerweile zahlreiche kostengünstige und leistungsfähige Lösungen.

Die dabei verwendeten aktiven Radiatoren sind ebenfalls bestens für die Kühlung von Magnetlagerspindeln mit geringen Verlustleistungen geeignet. In Tab. 1 sind zum Vergleich vorhandene Kühlleistungen und Kostenbeispiele angeführt.

Anzahl der Lüfter (Ø 120 mm)	Kälteleistung bei $dT = 20\text{ K}$ und $\dot{Q}_{H_2O} = 0,6 \frac{m^3}{h}$	Kühlsystem Preis (ohne Anschlüsse)
1	525 W	100 €
2	950 W	140 €
3	1175 W	145 €
4	1430 W	225 €

Tab. 1: Beispiel Kälteleistung und Kosten von PC-Kühlwasser Rückkühlern

Im vorliegenden System mit einer Verlustleistung von ca. 680 W (Gesamtverluste bei Maximaldrehzahl von 140.000 U/min) wur-

de ein Dual Radiator mit zwei Lüftern eingesetzt. Die Kühlwassererwärmung betrug ca. 14 Grad.

6 Zusammenfassung

In diesen Artikel wurde gezeigt, wie es im Zusammenspiel von mehreren Optimierungsfaktoren gelang die kritische Winkelgeschwindigkeit der Magnetlagerwelle mit einfachen Methoden soweit zu erhöhen, dass ein unterkritischer Betrieb gewährleistet ist. Die dabei entstandene Spindel wurde im Testbetrieb bis zu einer Drehzahl von 147.000 U/min erfolgreich getestet und die Ergebnisse der Rotordynamik- und Festigkeitsberechnung konnten validiert werden.

7 Literatur

- [1] Werkstoffdatenblatt 1.6582 (34CrNiMo6) Dr. Sommer Werkstofftechnik, 07. 2008
- [2] Werkstoffdatenblatt 1.7225 (42CrMo4) Dr. Sommer Werkstofftechnik, 09. 2010
- [3] Paditz, Marcus: Vergleich von Magnetlagern in homopolarer und heteropolarer Bauweise hinsichtlich der Rotorverluste sowie Untersuchungen der Induktionsverteilung speziell bei Homopolarlagern. - 2007. - 102 S. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Elektrotechnik und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2008
- [4] Glauer, Daniel: Bericht zur Durchführung und den Ergebnissen von Zugversuchen, Praktikumsarbeit Chemnitz 2010
- [5] VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. <<http://www.vacuumschmelze.de/index.php?id=1048>> verfügbar am 17.08.2011
- [6] Prüfprotokoll Vacuumschmelze
- [7] Instruction Manual PROXIMITY SYSTEM TQ 400 SERIES PROXIMITY TRANSDUCER WITH IQS 45X SIGNAL CONDITIONER, Vibrometer 07.2004
- [8] EAAT Firmenschrift Magnetische Lager Aufbau, Wirkungsweise und Einsatzverfahren, Firmenschrift 09.2007