

Diss. ETH N° 18809

# Magnetically Levitated 2-Level Slice Motor for Application in High Purity Process Environments

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

PHILIPP KARUTZ

Dipl.-Ing., Otto-von-Guericke University Magdeburg  
born 22<sup>nd</sup> March 1981  
citizen of Cologne, Germany

accepted on recommendation of

Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner  
Prof. Dr. Jorma Luomi, co-examiner

2010

# Abstract

In recent years, the demand for ultra-clean process environments for spin processes in high-purity industry branches, such as pharmaceutical, biotechnology and semiconductor industries has been growing. In these industries small particles generated through lubricants and wear in the bearings can damage the processed structures.

The implementation of magnetically levitated motors in these application fields offers the advantage of a contactless and wearless operation. Furthermore, due to the fully circumferential air gap of such motors, a process chamber can be inserted into the air gap that creates a completely encapsulated space. In this space process dependent conditions, such as pressure, temperature, humidity can be provided locally and cost efficiently.

A high acceleration capability of the motor is crucial for these processes in order to keep the process times low and increase the equipment throughput. Additionally, the achievement of high rotation speeds in the order of several thousand revolutions per minute is demanded by the processes.

In this thesis, the conception, design and optimization of a magnetically levitated slice-shaped motor, that fulfills the industry's demand for high acceleration capability and high achievable rotation speeds is presented. Additionally, a high purity environment is ensured through an air gap large enough to accommodate a mechanically stable process chamber wall.

The slice motor, which features a small motor height compared to its diameter, allows a very high level of compactness. The motor is

implemented with a homopolar magnetic bearing and the permanent magnet synchronous drive on two circumferentially and axially shifted levels, giving the motor its name: “Magnetically Levitated 2-Level Motor (M2M)”. Through the resulting magnetic decoupling, the drive unit can be designed independent from the bearing unit, aiming for maximum acceleration capability and maximum achievable rotation speed.

Due to the two-level nature of the motor the bearing design is more challenging. Factors such as tilting issues and avoidance of couplings between bearing and drive unit must be considered. These issues are investigated in detail in this thesis.

A general classification and applicability of magnetic bearing types suitable for the application at hand is presented. The scaling laws concerning stability, stiffness and dynamics for the magnetic bearing are presented and are supported by analytical design guidelines addressing typical bearing parameters, such as permanent magnet and iron dimensions. The actual design of the magnetic bearing unit is then explained based on 3D finite element method (FEM) simulation results. The impact of different stator drive structures, which can be segmented or fully circumferential, on the bearing parameters is investigated in detail by means of 3D FEM simulations.

The drive unit is optimized for high acceleration capability and high rotation speeds in two steps. First, the optimal stator tooth shape is identified taking the high occurring ampere-turns values into consideration that are necessary to generate sufficient torque with the large implemented air gap. It is shown that the simplified straight tooth shape is more than adequate for the motor at hand. The findings can also be applied to other motor applications, where saturation effects rather than thermal issues limit the performance.

In a second step, an analytical optimization supported by 3D FEM simulation results is carried out. Here, the number of winding turns per drive phase and the tooth dimensions are varied in order to identify the optimal parameters that result in the smallest acceleration time for a given process speed span. The presented optimization method can be applied for any setup employing a permanent magnet synchronous machine.

In order to prove the necessity of 3D FEM simulations an investigative study is presented that compares the torque results of 2D and 3D solvers

against each other. Here, a modeling error can be defined and general conditions, such as the air gap length, motor height and ampere-turns values, allowing 2D simulations with similar accuracy than for the proven 3D simulations are formulated. For the given setup it is shown that only 3D simulations achieve a good accuracy and that the ampere-turns value as an indicator of the degree of saturation is a crucial parameter when deciding for an appropriate simulation method.

The scaling laws, design guidelines and optimization results are verified on a laboratory prototype. Additionally, the experimental setup and the applied control schemes are presented.

The prototypes performance parameters, which include acceleration time, maximum rotation speed, radial and axial displacement during acceleration, are then qualitatively and quantitatively compared to other existing magnetically levitated slice motor topologies. The major advantage of the prototype system in terms of maximum rotation speed is highlighted.

# Kurzfassung

Der anhaltende Trend zur Miniaturisierung und die steigenden Reinheitsanforderungen in der Pharma- und Halbleiterindustrie sowie in der Biotechnologie verlangen nach immer reineren Prozessbedingungen, da bereits kleinste Partikel die zu prozessierenden Strukturen beschädigen können.

Bei zahlreichen Bearbeitungsprozessen ist es notwendig die Prozessmittel durch Rotation gleichmässig zu verteilen oder abzuschleudern. Für diese Prozesse ist eine grosse Beschleunigungskapazität des Antriebs notwendig um die Durchlaufzeiten der Prozesse und damit die Betriebskosten gering zu halten. Weiterhin werden für einige der Prozesse hohe Drehzahlen verlangt.

Die heute standardmässig eingesetzten Servomotoren verursachen mit ihren mechanischen Lagern und Dichtungen Abrieb und somit Kleinstpartikel, welche die Prozessreinheit beeinträchtigen könnten.

Die Verwendung von magnetisch gelagerten Scheibenläufermotoren für den beschriebenen Anwendungsbereich bietet die Möglichkeit eines langlebigen, verschleiss- und abriebfreien Betriebes, wobei der Prozess durch eine in den Luftspalt eingefügte Prozesskammer komplett hermetisch abgeschlossen werden kann. In dieser Prozesskammer können prozessabhängige Bedingungen (Druck, Temperatur, Reinheit) lokal begrenzt und damit kosteneffizient erzeugt werden. Für die Konstruktion einer mechanisch stabilen und chemisch beständigen Prozesskammer bedarf es eines grossen Luftspalts, damit eine ausreichende Wandstärke garantiert werden kann.

Das Konzept, die Entwicklung und die Optimierung eines magnetisch

gelagerten Scheibenläufermotors, der die Anforderungen der Industrie bezüglich Beschleunigungsvermögen und hoher erreichbarer Drehzahl bei gleichzeitig grossem Luftspalt erfüllt, wird in dieser Arbeit vorgestellt.

Die Verwendung einer Scheibenläufertopologie (geringe Motorhöhe im Vergleich zum Motordurchmesser) stellt hierbei ein hohes Mass an Kompaktheit sicher. Der entwickelte Motor vereint ein homopolares Magnetlager und eine permanentenerregte Synchronmaschine, welche auf zwei am Umfang und axial verschobenen Ebenen angeordnet sind. Daher wird der Motor als “Magnetisch gelagerter 2-Ebenen Motor (M2M)” bezeichnet. Durch die resultierende vollständige magnetische Entkopplung können das Magnetlager und der Antrieb unabhängig von einander ausgelegt werden. Hierbei wird durch die Verwendung von zwei Ebenen die Lagerauslegung anspruchsvoller (Verkipppungsproblematik, Vermeidung von magnetischen Kopplungen zwischen Lager und Antrieb), weshalb sie im Detail in dieser Arbeit untersucht wird.

Die grundsätzliche Klassifizierung von verschiedenen Magnetlagertypen und deren Anwendbarkeit für die beschriebenen Industrieprozesse wird einleitend gezeigt. Die Skalierungsgesetze der Lagerstabilität, der Lagersteifigkeit und der Lagerdynamik werden präsentiert und mit Hilfe von analytischen Auslegungsrichtlinien untermauert. Der eigentliche Entwurf des Magnetlagers wird dann an Hand von 3D FEM Simulationen erklärt. Zusätzlich wird der Einfluss von verschiedenen Antriebsstatorstrukturen (segmentiert oder vollumfänglich) auf die Lagerparameter mit Hilfe von 3D FEM Simulationen untersucht.

Die Antriebseinheit wird in zwei Schritten auf hohe Beschleunigungsfähigkeit und hohe erreichbare Drehzahlen optimiert. Als erstes wird die optimale Statorzahngeometrie (klassischer T-förmiger Zahn oder vereinfachter gerader Zahn) unter Berücksichtigung der hohen auftretenden Durchflutungswerte bestimmt. Die hohen Durchflutungswerte sind notwendig, um trotz des grossen Luftspalts ein ausreichend hohes Antriebsmoment zu erzeugen. Es wird gezeigt, dass die gerade Zahnform für den untersuchten Motor geeigneter ist. Die Resultate der Untersuchung können auch auf andere Motoranwendungen, bei denen die Sättigungseffekte und nicht die thermischen Effekte limitierend wirken, übertragen werden.

In einem zweiten Schritt wird die analytische Optimierung des Antriebs gestützt auf 3D FEM Simulationen durchgeführt. Dabei werden die Windungszahl pro Antriebsphase und die geometrischen Dimensio-

nen der Antriebszähne ermittelt, für welche die kleinste Beschleunigungszeit für einen vorgegebenen Drehzahlbereich erreicht werden kann. Die vorgestellte Optimierungsmethode kann dabei auch auf andere permanente Synchronmaschinen angewendet werden.

Um die Notwendigkeit für 3D FEM Simulationen aufzuzeigen wird eine Untersuchung durchgeführt, welche die Resultate von 2D und 3D Drehmomentsimulationen vergleicht. Der Unterschied zwischen 2D und 3D Simulationen wird dabei mit dem Modellierungsfehler bemessen. Weiterhin werden grundsätzliche Bedingungen formuliert, welche die Verwendung von 2D Simulationen erlauben. Für den vorgestellten Motor wird gezeigt, dass sich eine ausreichende Simulationsgenauigkeit nur unter Verwendung von 3D Simulationen erreichen lässt. Dabei ist der Durchflutungswert als Mass für die Sättigung ein entscheidender Parameter, der bei der Auswahl der Simulationsart berücksichtigt werden muss.

Die Skalierungsgesetze, Auslegungsrichtlinien und Optimierungsergebnisse werden anschliessend anhand eines Laborprototyps verifiziert. Der experimentelle Aufbau und die verwendeten Regelverfahren werden dabei näher beschrieben.

Die Leistungsparameter wie Beschleunigungszeit, maximale Drehzahl und radiale und axiale Auslenkung während der Beschleunigung werden abschliessend sowohl qualitativ als auch quantitativ mit drei anderen bestehenden magnetisch gelagerten Motorkonzepten verglichen. Dabei wird der Hauptvorteil des M2M Konzepts, die hohe Maximaldrehzahl, bestätigt.