

Diss. ETH No. 20329

The Bearingless Mixer in Exterior Rotor Construction

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
THOMAS REICHERT
M.Sc. ETH Zurich
born on the 31st of May 1983
citizen of Schleitheim, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner
Prof. Dr. Ralph Kennel, co-examiner

2012

Abstract

Mixing is an important work step in several industrial sectors such as the pharmaceutical and chemical industry or in food mixing. The mechanically stirred vessel is the most commonly employed mixer in the volume range of 50–20 000 liters. For state-of-the-art bottom-mounted mixers, the impeller inside the reactor is connected to a motor unit placed outside by means of a shaft passing through a sealed opening or with a magnetic coupling. However, both implementations suffer from drawbacks such as pinch-off areas or particle generation due to abrasive wear. These effects impair the reaction output, especially for shear-sensitive or high-purity applications (e.g. bioreactors).

In this work, a bearingless slice motor in exterior rotor construction is proposed, which can be advantageously employed for a reactor as one single bottom-mounted impeller. A tank indentation is required, inside which the stator is placed. The rotor, which builds the mixing head with impeller blades mounted onto it, is the only component placed inside the reactor. Magnetic forces between the stator outside and the rotor are generated, which levitate and rotate the impeller in a contactless manner.

This thesis investigates the characteristics of the bearingless mixer in exterior rotor construction. In a first step, a comparison is drawn with the interior rotor equivalent in terms of torque generation with optimal split ratio, volume exploitation and winding arrangements.

In a second step, all the possible topologies with varying slot/pole combination are examined. Due to the limited stator space of the exterior rotor construction, only a small number of stator teeth between 3 and 6 is recommendable. In combination with different rotor pole pair numbers, the control and performance characteristics of the topologies are derived and the most promising topology is evaluated.

Early experimental results and a 3D finite element analysis reveal that the bearingless mixer in exterior rotor construction is rather critical in

terms of its passive bearing stability. Therefore, constructional measures are investigated which aim at improving this stability.

An extensive design optimization is undertaken based on a 3D finite element analysis in order to derive the optimal values for a prototype setup. Additionally, the scalability of the system is investigated, given that scale-up is an important research area in the field of sensitive mixing. Based on geometric similarity, the relevant scale-up laws are derived for the reaction itself and for the drive and bearing performance.

Finally, three different prototype setups based on the topology evaluation and design optimization are presented and the sensor systems, the power electronic converters and the control implementations are explained. Furthermore, the motor losses and the efficiency are analyzed and measurements of the drive and bearing performance are undertaken in order to confirm the results previously established.

Kurzfassung

Mischen ist ein wichtiger Arbeitsschritt in zahlreichen Industriesektoren, wie etwa in der Pharma- und Chemieindustrie oder in der Lebensmittelverarbeitung. Dabei ist der mechanische Rührkessel der am häufigsten eingesetzte Mixertyp für Tankvolumina zwischen 50 und 20 000 Litern. Bei den aktuell eingesetzten, unten am Tank angebrachten Mixern wird das Flügelrad im Reaktor von einem ausserhalb platzierten Motor angetrieben, wobei die Rührleistung entweder mittels einer Welle durch eine abgedichtete Tanköffnung oder mittels einer magnetischen Kupplung übertragen wird. Bei beiden Bauarten resultieren jedoch unerwünschte Nachteile wie etwa Quetschzonen oder Partikelgeneration durch Abrieb. Dadurch wird insbesondere für scherkraftsensitive oder höchstreine Anwendungen (z.B. Bioreaktoren) der Reaktionsertrag geschmälert.

In dieser Arbeit wird ein lagerloser Scheibenläufer in Aussenläufer-Bauform vorgeschlagen, welcher vorteilhaft als Einzelrührer (unten am Tank angebracht) eingesetzt werden kann. Dazu muss eine Tankeinbuchung realisiert werden, in welche der Stator von aussen her platziert wird. Der Rotor, welcher direkt mit dem Flügelrad verbunden den Mixerkopf bildet, ist die einzige Komponente, welche im Reaktorinnern platziert wird. Magnetische Kräfte zwischen dem Stator ausserhalb und dem Rotor werden erzeugt, welche den Mixerkopf kontaktfrei schweben und drehen lassen.

Zuerst werden die Eigenschaften des lagerlosen Mixers in Aussenläufer-Bauform untersucht. Dazu wird in einem ersten Schritt ein Vergleich mit dem äquivalenten Innenläufer-Konzept gezogen in Bezug auf Drehmomentgenerierung bei optimaler Rotor/Stator-Aufteilung, sowie bezüglich Volumenausnutzung und Wicklungsanordnung.

In einem zweiten Schritt werden alle möglichen Topologien mit variierender Nut-/Polzahl-Kombination untersucht. Aufgrund des beschränkten Statorvolumens im Falle der Aussenläufer-Bauform ist jedoch nur eine geringe Anzahl von Statorzähnen zwischen 3 und 6 empfehlenswert.

Für diese Statorvarianten zusammen mit Rotoren verschiedener Polpaarzahl werden die Regelbarkeit und weitere wichtige Motorcharakteristiken evaluiert.

Erste experimentelle Resultate sowie eine 3D Finite-Elemente Analyse zeigen, dass der lagerlose Mixer in Aussenläufer-Bauform eher kritisch bezüglich der passiven Lagerstabilität ist. Aus diesem Grund werden verschiedene bauliche Massnahmen vorgeschlagen, welche auf eine Verbesserung dieser Stabilität abzielen.

Eine ausführliche Design-Optimierung wird durchgeführt, basierend auf einer 3D Finite-Elemente Analyse, um die optimalen Werte für einen Prototyp-Aufbau zu ermitteln. Zusätzlich muss die Skalierbarkeit des Systems untersucht werden, da insbesondere im Gebiet des sensitiven Mischens die Reaktorskalierung ein bedeutendes Forschungsgebiet ist. Daher werden, basierend auf geometrischer Ähnlichkeit, die relevanten Gesetzmässigkeiten sowohl für die Skalierung des Mischvorgangs als auch für die Antriebs- und Lagerleistung hergeleitet.

Zum Schluss werden drei verschiedene Prototypen vorgestellt, welche auf Grundlage der vorangegangenen Erkenntnisse entworfen wurden. Die verwendete Sensorik, die eingesetzte Leistungselektronik, sowie die Regelungsimpementierung werden vorgestellt. Ausserdem wird eine Verlust- und Effizienzanalyse durchgeführt. Die in dieser Arbeit hergeleiteten Erkenntnisse werden abschliessend mittels Messungen der Antriebs- und Lagerleistung bestätigt.