

# Magnetgelagerte Scheibenläufermotoren – Ein Überblick

Dipl. Ing., Philipp Karutz, Power Electronics System Laboratory ETH Zürich, Zürich, Schweiz

Dr. sc., Thomas Nussbaumer, Levitronix GmbH, Zürich, Schweiz

Prof. Dr., Johann W. Kolar, Power Electronics System Laboratory ETH Zürich, Zürich, Schweiz

## Kurzfassung

Im Laufe der vergangenen Jahre konnte ein steigender Bedarf für hochreine und kontaminationsfreie Rotationsprozesse mit hohem Beschleunigungsvermögen in der Chemie-, Pharma-, Halbleiterindustrie und der Biotechnologie beobachtet werden. Durch den Einsatz von magnetgelagerten Scheibenläufermotoren können hochreine Prozessumgebungen geschaffen werden, da durch die magnetische und damit kontaktfreie Lagerung des Rotors eine Wand in den grossen Luftspalt eingefügt werden kann. Dadurch entsteht ein abgeschlossener und hochreiner Raum, wie er für hermetisch gekapselte Pumpen, Bioreaktoren oder Prozesskammern notwendig ist. Diese Veröffentlichung beschreibt vier verschiedene magnetgelagerte Scheibenläufermotortopologien, die sich in der Konstruktion und der Bildung der Lagerkraft und des Antriebsmoments unterscheiden. Zum Überblick werden die Topologien anschließend hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie dem Beschleunigungsvermögen, der Kompaktheit und der Komplexität der Regelung, qualitativ verglichen.

## 1 Einleitung

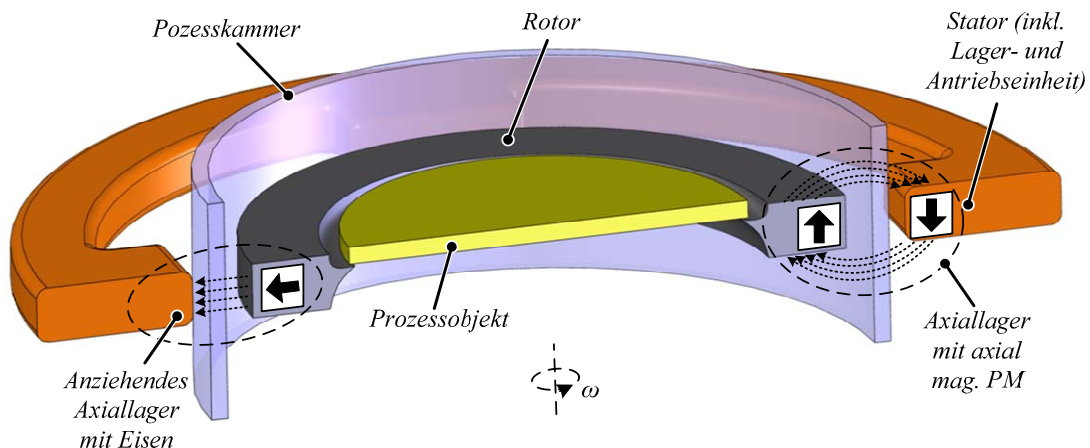
Der anhaltende Trend zur Miniaturisierung und die steigenden Reinheitsanforderungen in der Chemie-, Pharma-, Halbleiterindustrie sowie in der Biotechnologie [1] - [2] verlangen nach immer reineren Prozessbedingungen, da bereits kleinste Partikel die zu prozessierenden Strukturen beschädigen können. Bei 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 Reinraumkosten gering zu halten. Die standardmässig dazu eingesetzten Servomotoren verursachen durch ihre mechanischen Lager und Dichtungen Abrieb und somit Kleinstpartikel, die die Prozessreinheit gefährden könnten.

Die Verwendung von magnetisch gelagerten Scheibenläufermotoren für diesen Anwendungsbereich bietet die Möglichkeit eines langlebigen, verschleiss- und ab-

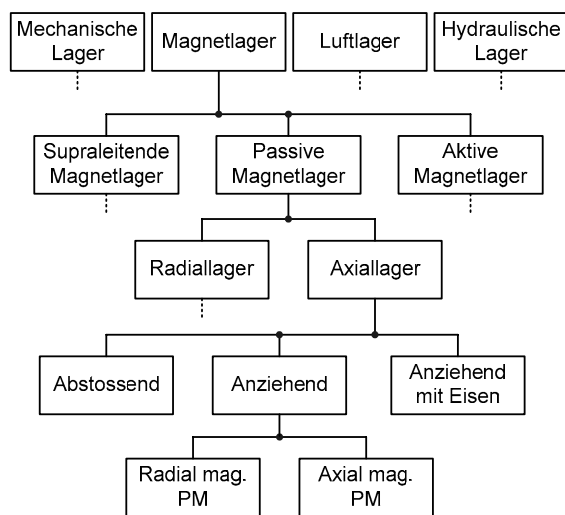
riebfreien Betriebes, wobei der Prozess durch eine in den Luftspalt eingefügte Prozesskammer komplett hermetisch abgeschlossen werden kann (siehe **Bild 1**). In dieser Prozesskammer können prozessabhängige Bedingungen (Druck, Temperatur, Reinheit) lokal begrenzt und damit kosteneffizient erzeugt werden. Für die Konstruktion einer mechanisch stabilen und chemisch beständigen Prozesskammer bedarf es eines grossen Luftspalts, damit eine ausreichende Wandstärke garantiert werden kann.

Das Anwendungsspektrum der magnetgelagerten Scheibenläufermotoren ist nicht nur auf die reine Prozessausrüstung beschränkt. Das Pumpen von hochreinen Flüssigkeiten, wie Säuren in der Halbleiterindustrie [3] oder Blut in der Medizintechnik [4] in einem eingekapselten Pumpkreislauf, kann ebenso mit magnetgelagerten Scheibenläufermotoren realisiert werden, wie das Verrühren hochreiner Flüssigkeiten in einem Bioreaktor [5].

Die für das kontaktlose Schweben eingesetzten Magnetlager können grundsätzlich in aktive und



**Bild 1** Schematisches Schnittbild durch einen Scheibenläufermotor mit einer Prozesskammer im Luftspalt, wobei die grundsätzlichen Lagerstrukturen des passiven Axiallagers (links) mit radial magnetisierten Permanentmagneten (PM) und (rechts) mit axial magnetisierten PM angedeutet sind.



**Bild 2** Einordnung der betrachteten passiven Magnetlagertypen.

passive Magnetlager unterteilt werden (siehe **Bild 2**). Auf das Gebiet der supraleitenden Magnetlager wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da der Kühlaufwand zur Erhaltung der Supraleitung für den betrachteten Anwendungsbereich viel zu gross wäre, allerdings sollen sie der Vollständigkeit halber erwähnt sein. Die stabilisierende Wirkung von passiven Magnetlagern wird durch Reluktanzkräfte der sich an- bzw. abstossenden Permanentmagnete erreicht, wobei die Kraft bei aktiven Magnetlagern durch geregelte Elektromagnete erzeugt wird. Aufgrund der Möglichkeit eines hochkompakten Aufbaus und aufgrund des geringeren Realisierungsaufwandes werden passive Magnetlager bevorzugt eingesetzt, allerdings können nie alle Freiheitsgrade passiv stabilisiert werden, wie in [6] gezeigt wird. Für Motoren mit scheibenförmiger Rotorausführung, also einem grossen Verhältnis von Rotordurchmesser zu Rotorhöhe, ergibt sich die Möglichkeit, bis zu drei der sechs Freiheitsgrade für die Bewegung des Rotors passiv zu stabilisieren, folglich müssen passive und aktive Magnetlager kombiniert eingesetzt werden.

In [7] wird eine Vielzahl von möglichen Anordnungen der Permanentmagnete (PM) von passiven Magnetlagern sowohl am Rotor als auch am Stator gezeigt. Die hierbei eingeführte Gruppe der passiven Radiallager eignet sich weniger für den Einsatz mit einer Prozesskammer, da die radiale Auslenkung nur passiv stabilisiert wird. Dies bedeutet besonders bei höheren Drehzahlen und auftretenden Resonanzen, dass der Rotor die Prozesskammerwand berühren oder sogar beschädigen könnte. Daher ist die Gruppe der Axiallager zu bevorzugen, wobei hier die Konzepte, die auf abstossenden Kräften beruhen, ungeeignet erscheinen, da hier die Ebenen übereinander angeordnet sind [7], was zu einem unnötig hohen und somit weniger kompakten Aufbau (sowohl rotor- wie statorseitig) führt.

Der folgende Überblick über die verschiedenen magnetgelagerten Scheibenläufermotoren bezieht sich daher ausschliesslich auf die für den vorgestellten Anwendungsbereich zu favorisierenden, anziehenden Axialmagnetlager mit Eisen und axial magnetisierten Permanentmagneten. Dazu werden im Abschnitt 2 vier

verschiedene Topologien näher erläutert, die dann in Abschnitt 3 anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen werden. Der Abschnitt 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

## 2 Topologievorstellung

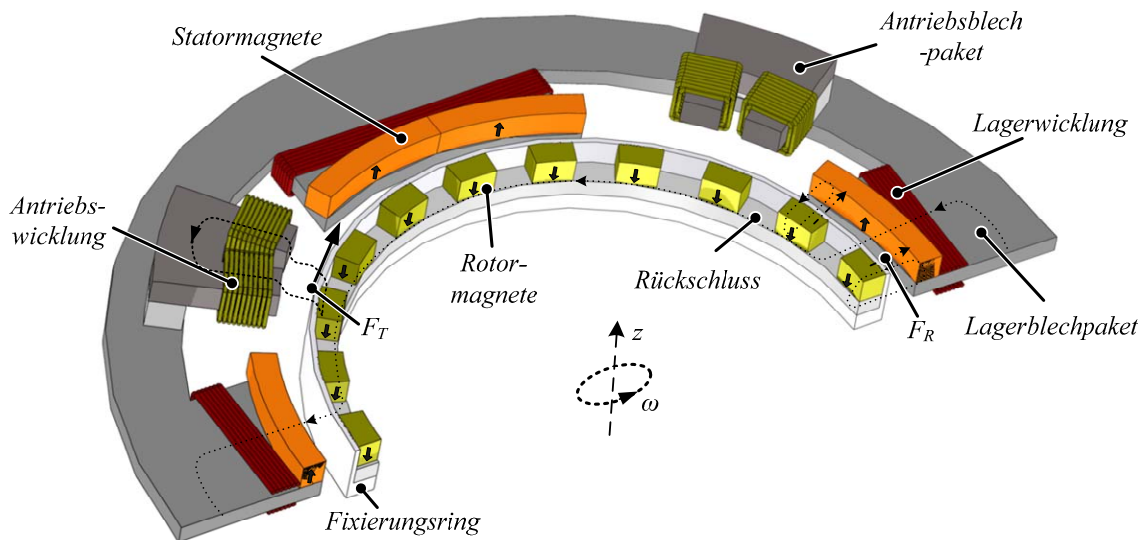
Im Rahmen des in der Einleitung erläuterten Anwendungsbereiches werden in diesem Abschnitt zunächst vier verschiedene magnetgelagerte Scheibenläufermotorkonzepte vorgestellt. Die vorgestellten Motoren besitzen alle einen ringförmigen Innenläufer, unterscheiden sich aber hinsichtlich der Verkopplung der für die Generierung der Lagertragkräfte und der Antriebsdrehmomente verantwortlichen Eisenkreise.

### 2.1 Der Magnetgelagerte Hohlwellenmotor (MHM)

Der einfache magnetgelagerte Hohlwellenmotor wurde erstmals in [8] vorgestellt und eine schematische Schnittansicht ist in **Bild 3** dargestellt. Das passive Axiallager mit axial entgegengesetzt magnetisierten Permanentmagneten auf Rotor- und Statorseite stabilisiert die Freiheitsgrade der axialen Auslenkung und der Verkipfung, so dass für das kontaktlose Schweben des hohlen Innenrotors nur die radiale Auslenkung aktiv geregelt werden muss. Obwohl sich für diesen Motortyp die Bezeichnung „lagerlos“ eingebürgert hat, handelt es sich hier strenggenommen nicht um einen lagerlosen Motor im engeren Sinn, da die Kräfte zur Lagerung und zur Drehmomentbildung in separaten Statoreinheiten generiert werden.

Um bei diesem Motorkonzept einen möglichst kompakten Aufbau zu erreichen, wird das Streufeld der zur magnetischen Lagerung genutzten Rotormagnete zusätzlich für den Antrieb mitgenutzt. Die Rotormagnete sind auf dem Eisenrückschluss fixiert, der den Rückführungspfad für den magnetischen Antriebs- bzw. Lagerfluss darstellt. Da das Antriebsprinzip auf der permanentmagneterregten Synchronmaschine basiert, muss nach [9] idealerweise eine sinusförmige, zwingend aber eine wechselförmige Flussdichteverteilung im Antriebsluftspalt vorhanden sein. Die negativen Pole des Antriebs werden durch das Auslassen von Rotormagneten erzeugt. Die daraus resultierende Herabsetzung der Lagersteifigkeit wird durch Aufspreizung des Lageröffnungswinkels kompensiert. Da eine störende gegenseitige Beeinflussung von Lager und Antrieb bei der angestrebten geringen Profilhöhe nur durch eine Verschiebung von Antrieb und Lager entlang des Umfangs erreicht werden kann, ist der dem Antrieb zu Verfügung stehende Umfang durch den grossen Lageröffnungswinkel stark eingeschränkt. Um trotzdem ein möglichst hohes Moment und damit geringe Beschleunigungszeiten erreichen zu können, wurden die Antriebswicklungen als stark bestromte, konzentrierte Wicklungen ausgeführt, deren Ausnutzung zur Drehmomentbildung aber wie in [10] gezeigt durch das Auftreten von Sättigungseffekten stark limitiert ist.

Die 2-phasige Lagerwicklung und die 2-phasige Antriebswicklung sind in **Bild 3** in gelb bzw. rot dargestellt. Die Mittenpositionsabweichung wird durch Positionssensoren [11] gemessen und mittels Positionsrege-



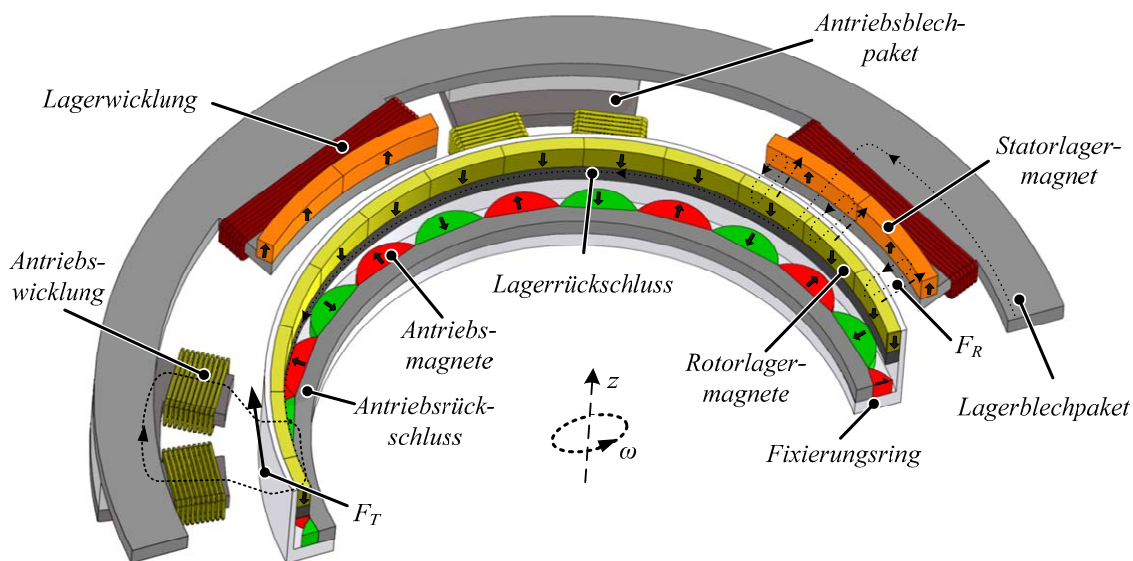
**Bild 3** Schematisches Schnittbild durch den magnetgelagerten Hohlwellenmotor (MHM). Die Flusslinien, die zur Generierung der Tangentialkraft  $F_T$  und der Radialkraft  $F_R$  beitragen, sind angedeutet.

lung zu null geregelt. Durch Winkelsensoren im Streufeld der Rotormagnete wird das Drehzahlsignal ermittelt, welches für die Geschwindigkeitsregelung benötigt wird. Die Lager- und Antriebsströme der unterlagerten Regelkreise können von einem Frequenzumrichter mit Halbbrücken-, Vollbrücken- oder auch Mittelpunktschaltung [12] bereitgestellt werden.

Die Kompaktheit des magnetgelagerten Hohlwellenmotors ist auf den gemeinsamen Rotoreisenpfad (eine Ebene) für Lager- und Antriebsfluss zurückzuführen, dadurch wird aber auch ein schwaches Antriebsmoment, das nur durch den Streufluss generiert werden kann, hervorgerufen. Im folgenden Abschnitt wird daher der magnetgelagerte Zwei-Ebenen Motor vorgestellt, der sowohl stator- als auch rotorseitig über zwei getrennte Ebenen für die Einprägung der Lagerkräfte und Antriebsmomente verfügt.

## 2.2 Der Magnetgelagerte Zwei-Ebenen Motor (M2M)

Das Grundprinzip des magnetgelagerten Zwei-Ebenen Motors, der erstmals in [13] vorgestellt wurde, besteht darin, dass die Lager- und Antriebskräfte sowohl stator- als auch rotorseitig auf zwei verschiedenen axialen Höhenebenen eingepreßt werden. Auch für diesen Motortyp hat sich die Bezeichnung „lagerlos“ eingebürgert, obwohl die Lager- und Antriebskräfte in unterschiedlichen Statoreinheiten erzeugt werden. Ein dreidimensionales Schnittbild eines solchen Motors ist in **Bild 4** gezeigt. Wie auch beim magnetgelagerten Hohlwellenmotor aus Abschnitt 2.1 wird ein Axiallager mit axial magnetisierten Permanentmagneten zur magnetischen Lagerung des ringförmigen Innenrotors eingesetzt, wobei hier aber aufgrund der reinen Lage-



**Bild 4** Schematisches Schnittbild durch den magnetgelagerten Zwei-Ebenen Motor (M2M). Die Flusslinien, die zur Generierung der Tangentialkraft  $F_T$  und der Radialkraft  $F_R$  beitragen, sind angedeutet.

rungsfunktion die Lagermagnete ohne Aussparungen ausgeführt werden können. Alternativ könnte auch ein Axiallager mit radial magnetisierten Magneten realisiert werden (siehe **Bild 2**). Auf einer axial versetzten Ebene sind abwechselnd entgegengesetzt radial magnetisierte Permanentmagnete auf dem Antriebsrückschluss des Rotors positioniert. Der Abstand zwischen Lager- und Antriebsebene ist so gewählt, dass sich Lager und Antrieb nicht beeinflussen und gleichzeitig eine minimale Rotorhöhe erreicht wird. In **Bild 4** ist eine Aufbauvariante mit konzentrierten Windungen gezeigt, die durch minimale Profilhöhe gekennzeichnet ist. Alternativ ist aber auch ein Statoraufbau mit um den gesamten Umfang verteilten Statorsegmenten für Antrieb und Lager grundsätzlich möglich. Diese Variante zeichnet sich durch verbesserte Beschleunigungsfähigkeit aus, führt jedoch zu einer grösseren Einbauhöhe.

Durch die nach außen magnetisierten Permanentmagnete des Antriebes lässt sich im Vergleich zum lagerlosen Hohlwellenmotor ein wesentlich höheres Drehmoment generieren, wobei durch den Aufbau auf zwei Ebenen allerdings auch das Gewicht des Rotors und dessen Höhe vergrößert werden. Dies reduziert wiederum die Beschleunigungskapazität und kann sich auch negativ auf die Verkippungssteifigkeit des Rotors auswirken. Durch das Zwei-Ebenen Motorkonzept können sowohl das Lager als auch der Antrieb getrennt von einander ausgelegt und optimiert werden (Polpaarzahl, Rückschlusstiefe, Öffnungswinkel der Lager-/Antriebsklauen,...), einen axialen Mindestabstand zwischen beiden vorausgesetzt. Eine Optimierung des Antriebes mit dem Ziel minimaler Beschleunigungszeiten wird in [14] gezeigt.

Mit dem hier beschriebenen Zwei-Ebenen Motor kann aufgrund der radialen Antriebsmagnete und der getrennten Optimierung von Lager und Antrieb prinzipiell eine weitaus höheres Drehmoment als mit dem Magnetgelagerten Hohlwellenmotor (siehe Abschnitt 2.1) erreicht werden. Wie bereits erwähnt, schmälert allerdings das aufgrund der grösseren Bauhöhe erhöhte

Rotorgewicht das resultierende Beschleunigungsvermögen. Auf Grundlage des Lagerlosen Motors [4] können jedoch auch Antriebs- und Lagerkräfte rotor- und statorseitig in einer einzigen Ebene durch den Einsatz von Passiv-Axiallager mit radial magnetisierten Permanentmagneten erreicht werden. Zwei Motorkonzepte, die sich dieses Prinzips bedienen, werden in den nächsten beiden Abschnitten vorgestellt.

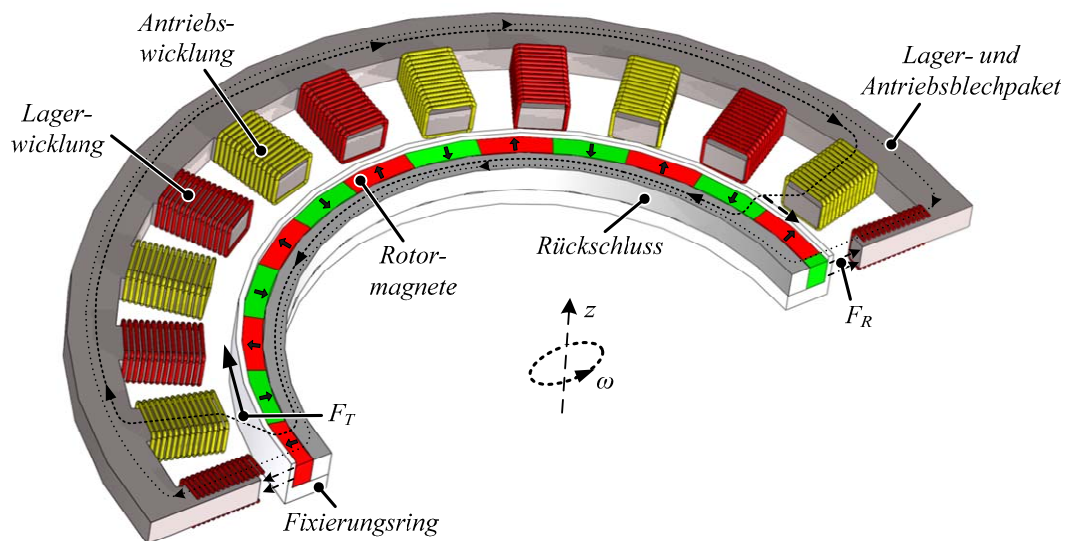
### 2.3 Der Lagerlose Mehrklauenmotor (LMM)

Der lagerlose Mehrklauenmotor wird in [15] beschrieben und findet in mehreren Varianten mit Innenrotordurchmessern kleiner als 100 mm bereits seine industrielle Anwendung in Pumpsystemen [4], [5]. Bei diesen Anwendungen ist der Rotor meist ein ringförmiger Permanentmagnet (mit der Polpaarzahl 1), der in ein Impellergehäuse eingeschlossen ist.

In [16] wird die Lagertragkraftbildung beim LMM durch die Überlagerung benachbarter Harmonischer und die Antriebsmomentbildung durch Überlagerung gleicher Harmonischer beschrieben. Daher wird ein sinnvolles Design erreicht, wenn die Lagerwicklung in Bezug auf die Motorwicklung ein Luftspaltfeld erzeugt, welches eine Harmonische höher oder tiefer liegt, wobei die Motorwicklung dieselbe Harmonische erzeugt wie das Permanentmagnetfeld.

Durch Variation von Polpaarzahl, Anzahl der Statorklauen und Anzahl der Phasen ergibt sich eine Vielzahl von Topologievarianten, die sich in ihrer Ausnutzung der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung zur Drehmoment- und Tragkraftbildung unterscheiden. Konzeptionelle Untersuchungen hierzu sind in [17] und [18] zu finden.

In jedem Fall führen größere Rotordurchmesser zu einer erhöhten Anzahl an Statorklauen und zu einer hohen Polpaarzahl, um Magnet- und Rückschlusstiefe gering zu halten und die Wicklungen sinnvoll auszunutzen. Eine mögliche Motorstruktur ist schematisch in **Bild 5** dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass nur noch



**Bild 5** Schematisches Schnittbild durch den lagerlosen Mehrklauenmotor (LMM). Die Flusslinien, die zur Generierung der Tangentialkraft  $F_T$  und der Radialkraft  $F_R$  beitragen, sind angedeutet.

kreissegmentförmigen Permanentmagnete mit wechselnder radialer Magnetisierung auf dem Rotorrückschluss sitzen. Es handelt sich daher um ein anziehendes Passiv-Axiallager mit Eisen (siehe **Bild 2**). Am Stator können wie in **Bild 5** gezeigt die Lager- und Antriebswicklungen abwechselnd angebracht werden oder auch auf den Statorklauen kombiniert werden. Eine getrennte Ausführung bedeutet auch hier wieder den Vorteil einer separaten Wicklungsauslegung von Antrieb und Lager.

Das Konzept des Lagerlosen Mehrklauenmotors führt offensichtlich zu einem sehr kompakten Aufbau mit grossem Beschleunigungspotenzial. Aufgrund der hohen Spulendichte entlang des Umfanges ergeben sich jedoch neue Herausforderungen bezüglich der Positionierung und Störempfindlichkeit der Positions- und Drehzahlsensoren. Weiterhin müssen die Lagerfelder beim LMM im Gegensatz zu den Varianten aus den Abschnitten 2.1 und 2.2 die elektrische Drehfrequenz aufweisen. In Kombination mit der hohen notwendigen Polpaarzahl, der stets vorhandenen Limitierung seitens der Verarbeitungsgeschwindigkeit und Auflösung der Signalelektronik und der begrenzten Stromanstiegsgeschwindigkeit in den Spulen sind daher mit dieser Topologie sehr hohe Drehzahlen nur schwer erreichbar.

## 2.4 Der Lagerlose Segmentmotor (LSM)

In **Bild 6** ist der Lagerlose Segmentmotor dargestellt, der in [19] erstmals vorgestellt wurde. Bei diesem Motor werden die Lagerkräfte und das Antriebsmoment gleichzeitig durch die überlagerten Flüsse an mehreren Statorelementen generiert. Auch bei diesem Motorkonzept kommt ein anziehendes Passiv-Axiallager mit Eisen zum Einsatz. Die Rotorstruktur ähnelt der des Lagerlosen Mehrklauenmotors aus Abschnitte 2.3, sieht jedoch keinen um den vollen Umfang ausgeführten Stator mehr vor. Stattdessen weisen die Statorsegmente explizit ausgeführte Rückschlussklauen auf. Die daraus resultierende geringere Eisendichte am Stator bewirkt eine geringere passive Axialstabilität im Vergleich zu den vorhergehenden Konzepten,

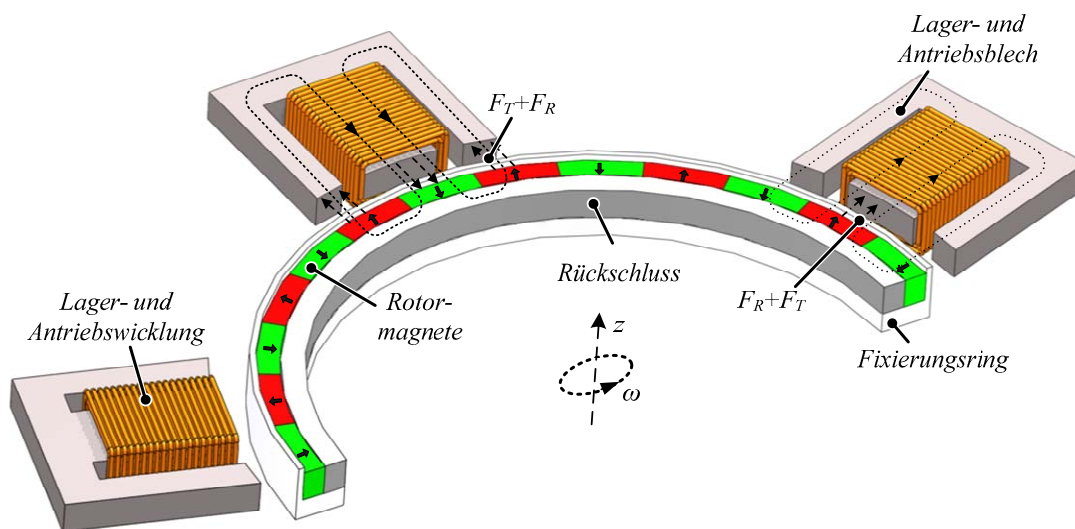
gleichzeitig sinkt aber auch die aktiv zu kompensierende radiale Instabilität.

Das Motorkonzept zeichnet sich durch eine einfachen mechanischen Aufbau, hohe Kompaktheit und Flexibilität bezüglich der radialen Positionierung der Statorelemente aus, wobei aber die Regelung von Lager und Antrieb durch den Beitrag jedes einzelnen Statorelementes wesentlich komplizierter wird. Mit dem Rotordurchmesser steigt typischerweise auch die Anzahl der Statorelemente und somit die Anzahl der notwendigen Stromsensoren sowie der von der Leistungselektronik anzusteuernenden Phasen. Auch bei diesem Motor sind bestimmte Verhältnisse zwischen Statoröffnungswinkel und Polpaarzahl einzuhalten, um eine Funktion des Motors und eine effiziente Ausnutzung der Wicklungen gewährleisten zu können. Wie auch beim LMM führt die hohe elektrische Drehzahl im Lager bei diesem Motorkonzept zu einer Limitierung der maximal erreichbaren Drehzahl durch die limitierte Signalverarbeitungsgeschwindigkeit und die begrenzte Stromanstiegsgeschwindigkeit in den Lagerespulen.

## 3 Vergleich der Topologien

In diesem Abschnitt werden die zuvor vorgestellten magnetgelagerten Scheibenläufermotortopologien entsprechend der in **Tabelle 1** dargestellten Kriterien qualitativ miteinander verglichen.

Der magnetgelagerte Hohlwellenmotor zeigt im Vergleich zu den anderen drei vorgestellten Motortopologien deutliche Schwächen im Bereich Beschleunigungsvermögen (nur der Streufuss ist für die Antriebsmomentenerzeugung nutzbar). Das Erreichen sehr hoher Drehzahlen wird limitiert, da die umfangsmässige Aufteilung von Lager-, Antriebs- und Sensoreinheiten am Stator bei diesem Konzept naturgemäss auf eine hohe Polpaarzahl führt, welche wiederum den maximal in die Antriebswicklungen einzuprägenden Strom aufgrund der hohen auftretenden elektrischen Frequenzen limitiert [14]. Andererseits ist das Konzept des MHM einfach in seiner Auslegung und Regelung und weist eine hohe Lagerstabilität bei moderater Kompaktheit



**Bild 6** Schematisches Schnittbild durch den lagerlosen Segmentmotor (LSM) mit fünf Statorelementen. Die Flusslinien, die zur Generierung der Tangentialkraft  $F_T$  und der Radialkraft  $F_R$  beitragen, sind angedeutet.

TABELLE 1: Qualitativer Vergleich der verschiedenen Motortopologien, wobei (+) eine besonders gute, (✓) eine durchschnittliche und (-) eine eher schlechte Leistung in der jeweiligen Kategorie bedeutet.

	MHM	M2M	LMM	LSM
Beschleunigungsvermögen	-	✓	+	+
Erreichen hoher Drehzahlen	✓	+	-	-
Stabilität d. Lagers	+	✓	✓	✓
Einfachheit v. Design u. Regelung	+	+	✓	-
Kompaktheit	✓	-	+	+
Flexibilität d. mech. Aufbaus	✓	✓	✓	+
Ebenen Rotor	1	2	1	1
Ebenen Stator	2	2	1	1

auf.

Das Konzept des magnetgelagerten Zwei-Ebenen Motors ist durch den axial sehr langen und damit schweren Rotor durch äusserst geringe Kompaktheit gekennzeichnet und hat daher nur eine durchschnittliche Beschleunigung und Lagerstabilität. Allerdings ist durch die Entkopplung von Lager und Antrieb die Regelung einfacher und die Drehzahl kaum beschränkt.

Der lagerlose Mehrklauenmotor zeichnet sich besonders durch sein überdurchschnittlich gutes Beschleunigungsvermögen bei einer gleichzeitig hohen Kompaktheit aus. Die Regelung und Eisenkreisauslegung kann bei geschickter Wahl der Statorklauen-, Polpaar- und Phasenzahl wenig kompliziert ausfallen. Hohe Drehzahlen können jedoch nur schwer erreicht werden und eine Herausforderung liegt in der geschickten Positionierung der stöempfindlichen Distanz- und Winkelsensoren.

Schlussendlich ist der lagerlose Segmentmotor ein Motorkonzept, welches ein hohes Beschleunigungsvermögen, eine hohe Kompaktheit und eine hohe Flexibilität des Aufbaus vereint. Gleichzeitig erhöht sich die Komplexität der Regelung aber drastisch, auch hier ist die maximal erreichbare Drehzahl stark limitiert.

## 4 Zusammenfassung

Die in dieser Veröffentlichung vorgestellten magnetgelagerten Scheibenläufermotortopologien weisen verschiedene Grade der Verkopplung der Eisenkreise für Lagertragkraft- und Antriebsmomentenerzeugung auf, welche sich direkt auf das Beschleunigungsvermögen, die Stabilität und die Komplexität der Regelung auswirken. Die Funktionsweise, die Vorteile und die Herausforderungen der einzelnen Topologien wurden ausführlich beschrieben und die Haupteigenschaften qualitativ verglichen. Mit Hilfe dieses Überblicks kann die für eine spezifische Anwendung passende Topologie ausgewählt werden.

## 5 Literatur

[1] Chartered Semiconductor Manufacturing, "IBM, Chartered, Infineon and Samsung announce process and design readiness for silicon circuits on 45nm low-power technology," *Press Release*, Seoul, 29<sup>th</sup> August 2006.

[2] Intel, "Intel Demonstrates Industry's First 32nm Chip and Next-Generation Nehalem Microprocessor Architecture," *Intel Developer Forum*, San Francisco, 18<sup>th</sup> September 2007.

[3] R. Schöb, "Frei schwebend - Spaltrohrpumpe fördert ohne Lager und ohne Dichtung," *Process Magazin für Chemie- und Pharmatechnik*, no.12, pp. 38-40, December 2002.

[4] R. Schöb et. Al, "A bearingless motor for a left ventricular assist device (LVAD)," *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearings*, pp.383-388, 23 - 25 August 2000.

[5] R. Schöb, N. Barletta, M. Weber and R. von Rohr, "Design of a Bearingless Bubble Bed Reactor," *Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearings*, Cambridge, pp. 507-516, 1998.

[6] S. Earnshaw, "On the nature of molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether," *Trans. Camb. Phil. Soc.*, vol. 7, Part 1, pp. 97-112, 1839.

[7] J. Delamare, E. Rulliere, J.P. Yonnet, "Classification and synthesis of permanent magnet bearing configurations," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.31, no.6, pp 4190-4192, Nov. 1995.

[8] T. Schneeberger, J. W. Kolar, "Novel Integrated Bearingless Hollow-Shaft Drive," *Proc. of the IEEE Ind. Applic. Conf. IAS*, Tampa, pp. 70-75, 8 - 12 October 2006.

[9] D.P.M. Cahill, B. Adkins, "The permanent magnet synchronous motor," *Proc. Inst. Elec. Eng.*, vol. 109, no. 48, pp. 483-491, December 1962.

[10] P. Karutz, T. Nussbaumer, W. Gruber, J. W. Kolar, "Saturation Effects in High Acceleration Bearingless Slice Motors," *Proc. of the 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge (UK), 2008.

[11] J. Boehm; R. Gerber, N.R.C. Kiley, "Sensors for magnetic bearings," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.29, no.6, pp. 2962-2964, November 1993.

[12] M. T. Bartholet, T. Nussbaumer, D. Krähenbühl, F. Zürcher, J. W. Kolar, "Modulation Concepts for the Control of a Two-Phase Bearingless Slice Motor Utilizing Three-Phase Power Modules," *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Power Conversion Conference (PCC'07)*, Nagoya, Japan, 2 - 5 April 2007.

[13] P. Karutz, T. Nussbaumer, W. Gruber, J. W. Kolar, "The Bearingless 2-Level Motor," *Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand, December 2007.

[14] P. Karutz, T. Nussbaumer, W. Gruber, J. W. Kolar, "Maximizing Acceleration Capability of Bearingless Slice Motors," *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, Portugal, 6 - 9 September 2008.

[15] R. Schöb and N. Barletta, "Principle and Application of a Bearingless Slice Motor," *Proc. of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Magnetic Bearings*, Kanazawa, Japan, pp. 313-318, 1996.

[16] K. Raggl, T. Nussbaumer, J. W. Kolar, "Comparison of Winding Concepts for Bearingless Pumps," *The 7<sup>th</sup> international Conference on Power Electronics (ICPE)*, pp. 1013-1020, 2007.

[17] S. Silber, W. Amrhein, P. Boesch, R. Schoeb, N. Barletta, "Design aspects of bearingless slice motors," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 10, no.6, pp. 611-617, Dec.2005.

[18] M.T. Bartholet, S. Silber, T. Nussbaumer, J.W.Kolar, "Performance Investigation of Two-, Three- and Four-Phase Bearingless Slice Motor Configurations", *Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand, Dec. 2007.

[19] W. Gruber, W. Amrhein, "Design of a Bearingless Segment Motor," *Proc. of the 10<sup>th</sup> Int. Symp. on Magnetic Bearings*, Martigny, 2006.