

Lagerlose Motoren : eine Zukunftstechnologie?

Autor(en): **Binder, Andreas / Schneider, Tobias / Redemann, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **98 (2007)**

Heft 5

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-857416>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Lagerlose Motoren – eine Zukunftstechnologie?

Lagerlose High-Speed-Antriebe erreichen Drehzahlen bis 60 000/min und werden zur Alternative zu konventionell magnetisch gelagerten Antrieben

Lagerlose Motoren sind eine interessante Alternative zur berührungslosen Lagerung von Hochdrehzahlmaschinen mittels aktiver Magnetlager. Sie erlauben es, bei Beibehaltung der Magnetlagervorteile wie Wartungsarmut, Schmiermittel- und Abriebsfreiheit sowie geringen Reibungsverlusten die Anzahl und Vielfalt der benötigten Komponenten zu reduzieren. Nach erfolgreichen Anwendungen im Niederdrehzahlbereich dringt der lagerlose Motor nun auch in den Hochdrehzahlbereich vor.

High-Speed-Antriebe sind gekennzeichnet durch eine gegenüber konventionellen Antrieben deutlich erhöhte Drehzahl, wobei als Mass für «High Speed»

Andreas Binder, Tobias Schneider, Christian Redemann

die Rotorumfangsgeschwindigkeit verwendet wird. Während konventionelle Antriebe Umfangsgeschwindigkeiten in der Größenordnung bis 30 m/s aufweisen, sind High-Speed-Antriebe durch Umfangsgeschwindigkeiten von 100 bis 300 m/s charakterisiert. Durch diese hohe Geschwindigkeit kann bei gegebener Leistung das Bauvolumen der elektrischen Maschine deutlich verringert werden, wodurch sich hohe Leistungsdichten (Leistung je Volumen) und geringe Antriebsmassen ergeben [1]. Dies trifft auch auf die direkt angetriebene Arbeitsmaschine zu, sodass zum Beispiel bei Kompressorantrieben hohe Drücke schon mit einstufigen Verdichterrädern erreicht werden. Durch den Wegfall des Getriebes entsteht ein sehr wartungsarmer Antrieb, wenn die Lagerung für diese hohen Drehzahlen berührungslos magnetisch und damit verschleissfrei ausgeführt wird.

Anwendungen für High-Speed-Antriebe sind Pumpen und Verdichter mit den bereits genannten Vorteilen der Veringerung der Stufenzahl, Werkzeug-

maschinen-Hauptantriebe für das High-Speed-Cutting [2], Generatoren für Mikrogastrurbinen zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme – z.B. in grösseren Gebäuden –, Schwungradspeicherantriebe zur Speicherung der Bremsenergie auf Fahrzeugen oder in Strassenbahnnetzen, Prüfstandsantriebe, Turbomolekularpumpenantriebe usw. Das Pumpen von empfindlichen oder aggressiven Medien kann mit der Magnetlagerung vorteilhafterweise ohne rotierende Dichtungen realisiert werden, da die Lagerung schmiermittel- und abriebsfrei erfolgt.

Während für die mechanische Lagerung von High-Speed-Antrieben neben aerodynamischen Lagern hauptsächlich spezielle Spindellager mit Ölminimalschmierung in Hybridausführung zur Anwendung kommen, ist bei aktiver magnetischer Lagerung in der Regel die Radial- und die Axiallagerung mit magnetischen Zugkräften durchzuführen. Da die Lagerung mit magnetischen Zugkräften inhärent instabil ist, muss der Lagerluftspalt über Abstandssensoren laufend gemessen und die magnetische Zugkraft in der Regel über Gleichstromsteller geregelt werden. Alternativ existieren auch patentierte Verfahren mit dreiphasigen Magnetlagern. Für die magnetische Kraft-erzeugung sind geblechte Eisenrotoren und spezielle Statorblechpakete für die

Radiallager notwendig (Bild 1), während für die Axiallagerung massive scheibenförmige Rotoren verwendet werden. Für den Fall des Elektronikversagens sind mechanische Fanglager vorzusehen. Mit der Magnetlagertechnologie lassen sich neben der wartungsfreien Lagerung selbst bei höchsten Drehzahlen zusätzliche Vorteile erzielen, wie aktive Läuferbeeinflussung zur Unwuchtkompensation oder für spezielle Bearbeitungsvorgänge (z.B. Unrundscheifen), Beeinflussung der Lagerelastizität durch die Regelparameter oder Monitoringfunktionen der Lastmaschine (z.B. Überwachung von Veränderungen an den Schaufeln eines Kompressorrad). Nachteilig sind die vergrößerte axiale Länge (Bild 2) und die Anforderung, neben der dreiphasigen Antriebselektronik noch eine mehrkanalige Gleichstromelektronik für die Magnetlager zur Verfügung stellen zu müssen.

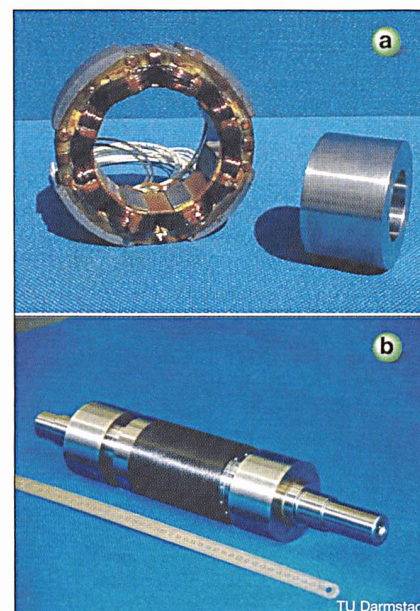


Bild 1 Stator und Rotor einer an der TU Darmstadt entwickelten Synchronmaschine

Bild 1a: Stator und Rotorblechpaket eines aktiven Magnetlagers

Bild 1b: Rotor einer permanentmagneterregten Synchronmaschine mit Magnetlagerung (40 000 /min, 40 kW)

Mathematischer Hintergrund

Querkrafterzeugung durch Überlagerung zweier Luftspaltflussdichten mit $p_2 = p_1 \pm 1$ [3]

Antriebsfeld: z.B. $2p_1 = 2$

$$B_1(t, \alpha) = \hat{B}_1 \cdot \cos(p_1 \cdot \alpha - \omega_1 \cdot t - \varphi_1)$$

z.B. erzeugt durch Rotor-Permanentmagnete und Antriebswicklung

Tragfeld: z.B. $2p_2 = 4$

$$B_2(t, \alpha) = \hat{B}_2 \cdot \cos(p_2 \cdot \alpha - \omega_2 \cdot t - \varphi_2)$$

erzeugt durch Stator-Strombelag $A_2(t, \alpha) = \hat{A}_2 \cdot \sin(p_2 \cdot \alpha - \omega_2 \cdot t - \varphi_2)$

φ_1, φ_2 : Lagewinkel von Antriebsfeld B_1 und Ständerstrombelag A_2 am Umfang (Winkel α)

Der Maxwell'sche Spannungstensor liefert die Kraft pro Fläche F/A_δ :

(A_δ : Läuferoberfläche im Luftspalt)

$$\vec{f} = \begin{pmatrix} f_r \\ f_t \end{pmatrix} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \begin{pmatrix} (B_1 + B_2)^2 - A_2^2 \\ 2 \cdot \mu_0 \cdot (B_1 + B_2) \cdot A_2 \end{pmatrix} \rightarrow F = \oint_A f d\vec{A} \rightarrow F = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \text{ mit } F_x: \text{Horizontalkraft, } F_y: \text{Vertikalkraft}$$

(r: radial, t: tangential)

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = F_{\text{Maxwell}} + F_{\text{Lorentz}} = \frac{A_\delta}{2} \cdot \begin{pmatrix} \hat{B}_1 \cdot \hat{B}_2 \\ \hat{B}_1 \cdot A_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \pm \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{pmatrix} \quad (\text{siehe Bild 4})$$

Wegen $B_2 \sim A_2 \sim I_2$ ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Kraft F und Tragstrom I_2 :

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = k_1 \cdot I_2 \cdot \begin{pmatrix} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \pm \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{pmatrix} = k_1 \cdot \begin{pmatrix} I_{2q} \\ \pm I_{2d} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \leftarrow q\text{-Komponente des Tragstroms} \\ \leftarrow d\text{-Komponente des Tragstroms} \end{array}$$

Die Richtung der Kraft hängt nur von der relativen Lage ($\varphi_1 - \varphi_2$) von B_1 und A_2 ab. Über eine feldorientierte Regelung lassen sich Horizontal- und Vertikalkraft separat über die d- und q-Komponenten des Tragstroms justieren.

Hier bringt der lagerlose Motor, bei dem die Krafterzeugung zur Lagerung in den Aktivteil des Motors integriert ist, echte Vorteile. Anstelle der Gleichstromsteller können zusätzliche konventionelle dreiphasige Umrichter für jedes Radiallager verwendet werden. Die Regelung der Läuferlage erfolgt über das aus der Antriebsregelung bekannte Konzept der feldorientierten Regelung. Es werden keine gesonderten Ständerblechpakete und Rotoreisenteile für die Lagerkrafterzeugung benötigt, sondern der Motor

selbst wird für die Radiallagerung verwendet. Bei geringer erforderlicher Axialkraft und geringen Anforderungen an eine axiale Positionierung kann wie bei der konventionellen Magnetlagerung auf ein Axiallager verzichtet werden, ansonsten ist ein zusätzliches axiales Magnetlager erforderlich. Eine Ausnahme hiervon bildet das Prinzip des lagerlosen Scheibenläufers, der ohne Axiallager auskommt, wie weiter unten erläutert wird. Durch die Lagerkraftintegration in die Maschine selbst kann die Baulänge des

Antriebs im Vergleich zu konventionell magnetgelagerten Antrieben wieder etwas verkürzt werden.

Funktionsprinzip lagerloser Motoren

Wird in eine Drehfeldmaschine mit der Polzahl $2p_1 = 2$ eine zusätzliche dreiphasige Wicklung in denselben Nuten integriert, die die Polzahl $2(p_1 + 1) = 4$ erzeugt, so entsteht durch Wechselwirkung zwischen den beiden Magnetfeldern unterschiedlicher Polzahl eine seitliche Kraft (Bild 3, [3]). Diese ist zeitlich konstant, wenn die elektrische Frequenz der Ströme in der Antriebswicklung ($2p_1 = 2$) identisch ist mit der Frequenz der Ströme in der Tragwicklung ($2p_2 = 4$). Anschaulich kann man dies in Bild 3 anhand der anziehenden Kräfte zwischen den Nord- und Südpolen von Stator- und Rotorfeld verstehen. Das zweipolige Rotorfeld B_1 der Rotorpermanentmagnete (hier: permanent erregte Synchronmaschine) erzeugt mit dem zweipoligen Drehfeld des

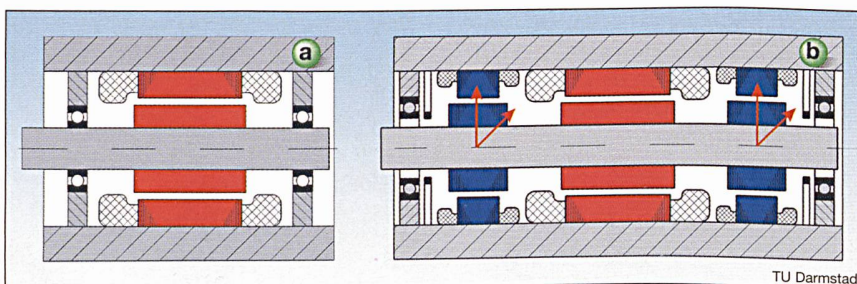


Bild 2 Axiale Verlängerung eines magnetisch gelagerten Rotors durch Magnetlager (blau)

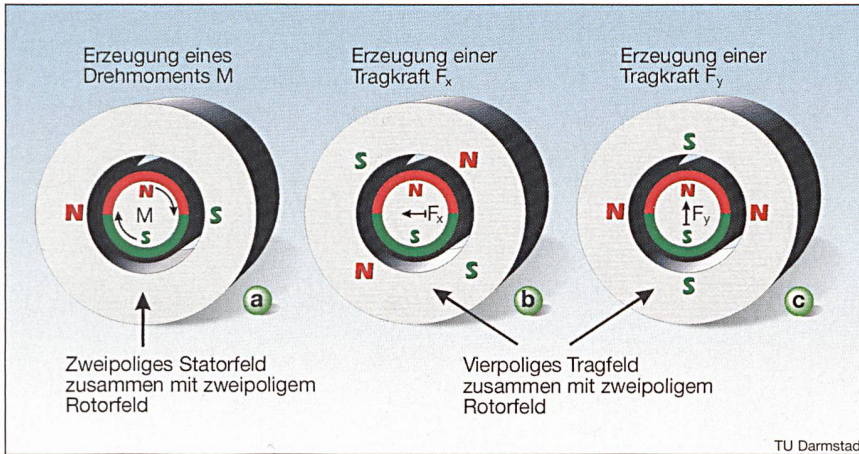


Bild 3 Anschauliche Erklärung der Querkräfte in lagerlosen Motoren

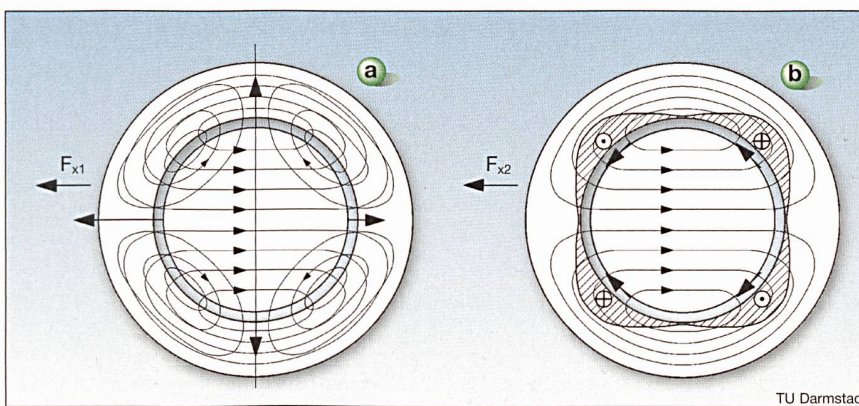


Bild 4 Entstehung von Maxwell- (links) und Lorentz-Kräften (rechts) im Luftspalt lagerloser Motoren

Stroms in der Antriebswicklung (Strombelag A_1) das Drehmoment M . Dasselbe Rotorfeld erzeugt mit dem vierpoligen Feld des Stroms in der Tragwicklung (Strombelag A_2), abhängig von dessen räumlicher Orientierung, eine horizontale Kraftkomponente F_x oder eine vertikale Kraftkomponente F_y . Bei Rotation dreht das Tragfeld in diesem Beispiel halb so schnell wie das Antriebsfeld und sorgt so dafür, dass die Kräfte F_x und F_y trotz weiterdrehendem Rotor nach Betrag und Richtung konstant bleiben. Im Detail ist diese Kraftentstehung in Bild 4 am Bei-

spiel der Kraftkomponente F_x erläutert. In Bild 4a) überlagert sich das zweipolige Rotorfeld dem vierpoligen Feld der Tragwicklung und verstärkt es in der linken Maschinenhälfte, schwächt es aber in der rechten Maschinenhälfte. Dadurch ist der magnetische Zug nach links grösser als nach rechts, was zur horizontalen Kraftkomponente F_{x1} nach links führt (Maxwell-Kräfte). Der Magnetzug in vertikaler Richtung hebt sich nach oben und unten auf. Die Kraftbeiträge des Rotorfelds B_1 auf die stromdurchflossenen Leiter der Tragwicklung (Lorentz-Kräfte) – die

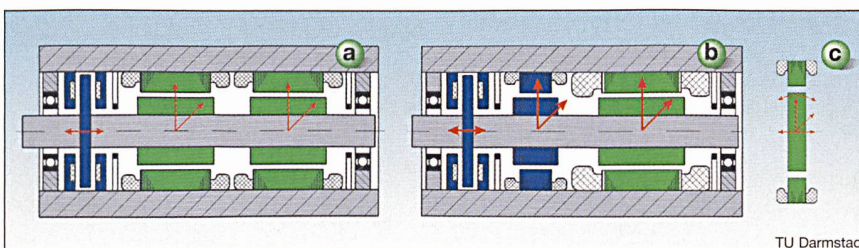


Bild 5 Bauformen lagerloser Motoren

Bild 5a: Radiale Zweipunkt Lagerung mittels zweier lagerloser Halbmotoren (grün)

Bild 5b: Kombimotorkonzept: radiale Zweipunkt Lagerung mittels Magnetlager (blau) und lagerlosem Motor (grün)

Bild 5c: Lagerloser Scheibenläufermotor, einpunktige Lagerung

wegen der Drehfeldwicklung annähernd sinusförmig am Umfang verteilt sind (Strombelag A_2) – sind tangential gerichtet. Die Vektorsumme ergibt die resultierende Kraftkomponente F_{x2} nach links (Bild 4b). Die Summe $F_{x1} + F_{x2} = F_x$ ergibt die resultierende horizontale Magnetkraft. In Bild 4 ist das Tragfeld in seiner relativen Lage zum Läuferfeld so orientiert, dass nur eine horizontale Kraft F_x auftritt, während die Vertikalkraft F_y null ist.

Allgemein funktioniert dieses Prinzip für Polpaarzahlkombinationen $p_2 = p_1 \pm 1$. Die Kraft wirkt radial am Umfang; die Lage der Kraft über dem Umfangswinkel α wird durch die relative Phasenlage von Antriebs- und Tragstrom zueinander eingestellt. Diese Kraft ist proportional dem Produkt aus Magnetfeld mit der Polpaarzahl p_1 (Rotorfeld und Antriebswicklung) und Strom bzw. Strombelag der Tragwicklung A_2 . Durch eine feldorientierte Regelung des Tragstroms relativ zum Feld der Antriebswicklung kann die Grösse der Kraft und ihre Richtung, also die beiden Komponenten F_x und F_y , so über eine feldorientierte Regelung (d- und q-Stromregelung) geregelt werden, dass der Läufer stabil schwebt. Eine Herleitung der Kräfte aus den sinusförmig im Luftspalt verteilten Feldern findet sich im Anhang. Dazu sind weiterhin Abstandssensoren zur Lagemessung des Läufers erforderlich sowie aus Sicherheitsgründen mechanische Fanglager. Die Gleichstromsteller entfallen. Da ein Motor ein Radiallager darstellt, sind verschiedene Realisierungskonzepte für lagerlose Motoren vorstellbar (Bild 5). Eine Möglichkeit ist der Einsatz zweier lagerloser Halbmotoren, um bei zylindrischen Läufern eine Zweipunkt Lagerung zu realisieren. Grosse Axialkräfte müssen durch ein gesondertes Axiallager herkömmlicher Bauart beherrscht werden. Für hohe Drehzahlen und Leistungen kann anstelle von zwei Halbmotoren ein Kombimotorkonzept verwendet werden, bei dem ein magnetisches Radiallager, kombiniert mit einem Axiallager, zusammen mit einem lagerlosen Motor die Zweipunkt Lagerung realisiert. Dieser lagerlose Kombimotor ist axial kürzer als die Bauweise mit zwei Halbmotoren, daher mechanisch steifer (höhere Biegeeigenfrequenzen) und somit besser für höhere Drehzahlen geeignet. Bei Motoren kleiner Leistung sind Scheibenläufer mit grossem Luftspalt und Permanentmagneterregung im Läufer möglich. Das Kippen und der Axialversatz werden dann durch den axialen magnetischen Zug der Permanentmagnete beherrscht [4–6]. Die Radiallagerung erfolgt einpunktig.

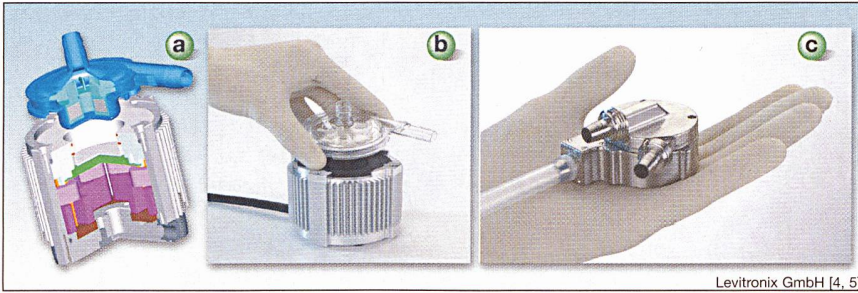


Bild 6 Lagerlose Scheibenläufermotoren als Blutpumpen

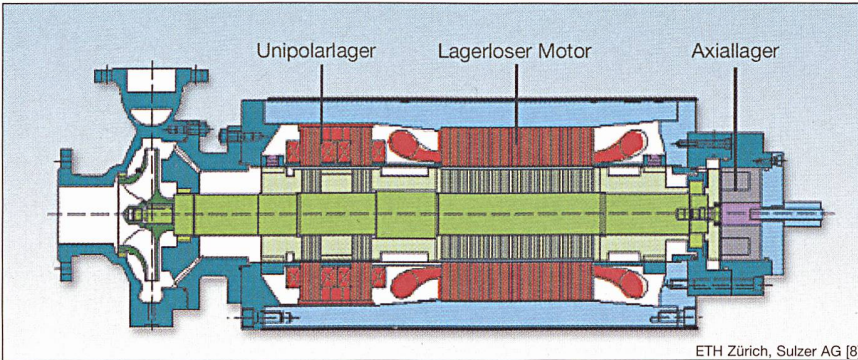


Bild 7 Lagerlose Spaltröhropumpe
30 kW, 3000/min

Ausführungsbeispiele für Low Speed

Im Bereich kleiner Läuferumfangsgeschwindigkeiten ist der lagerlose Permanentmagnet-Scheibenläufermotor (PM-Scheibenläufermotor) als Pumpenantrieb in mehreren Ausführungen am Markt erhältlich. Anwendungen sind hermetisch gekapselte Pumpen und Gebläse, die ohne rotierende Dichtungen, ohne Leckage, ohne Verunreinigung des Mediums und ohne Verschleiss der Lager betrieben werden können. Sie werden daher als Pumpen für sensible Medien (z.B. Blut), für Rührwerke in der Bio- und Medizintechnik oder Reinraumantriebe in der Halbleitertechnik eingesetzt. Ähnlich wie beim konventionellen Magnetlager-

antrieb lässt sich auch hier das Lager-system als Diagnoseeinrichtung für die Arbeitsmaschine (z.B. Durchfluss und Druckbestimmung) verwenden. Diese Motoren sind im unteren Leistungsbereich (< 4 kW, [7]) angesiedelt (Bild 6). Für grössere Leistungen ist der lagerlose Kombimotor oder das Konzept mit zwei Halbmotoren zu verwenden (z.B. Antrieb für Spaltröhropumpen, 30 kW, 3000/min, [8], Bild 7). Diese Konzepte sind allerdings bis dato nur als Prototypen durch die Kooperation von Industrie und unterschiedlichen Universitäten verwirklicht worden. Es wurden dabei in den letzten 10 bis 15 Jahren alle gängigen Drehstrommotorprinzipien theoretisch und experimentell untersucht: Asynchronläufer mit Kupferdrahtwicklung oder Sonderkäfigwicklung, Permanentmagnetläufer, Synchron-Reluktanzläufer sowie Switched-Reluctance-Läufer [3, 9–11].

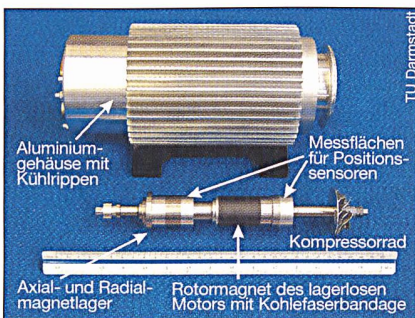


Bild 8 Ausführter Prototyp des lagerlosen High-Speed-Motors für 60 000/min
Der Prototyp wurde an der TU Darmstadt entwickelt

Entwicklungen für High Speed (40 000–60 000/min)

Für Hochdrehzahlantriebe ist der lagerlose Kombimotor wegen seiner kompakten Bauweise prädestiniert. Zurzeit wird ein kleiner Prototyp für 500 W, 60 000/min als Kompressorantrieb an der TU Darmstadt¹⁾ experimentell erprobt (Bild 8). Dieses in Kooperation mit der Firma Levitec GmbH (Lahnau) durchgeführte Projekt umfasst einen zweipoli-

gen PM-Rotor, der mit einer vierpoligen Tragwicklung gelagert wird. Die zweite Lagerstelle übernimmt ein kombiniertes Radial-/Axiallager mit Permanentmagnet-Gründerregung. Im Labor wurden mit dem Prototyp Drehzahlen bis zu 60 000/min erreicht. Bild 9 zeigt die mittels der Positionssensoren im Leerlauf gemessene radiale Auslenkung des Rotors in x- und y-Richtung aus dem Zentrum bei einer Drehzahl von 60 000/min. Man erkennt, dass der Rotor erfolgreich in der Mitte des Fanglagerspiels von $\pm 150 \mu\text{m}$ gehalten wird.

Die elektromagnetische Bemessung dieses Antriebs sowie der Entwurf weiterer grösserer Antriebe – geplant ist ein weiterer Antrieb in einem vergleichbaren Drehzahlbereich, jedoch mit deutlich gesteigerter Leistung – erfolgt zweckmässigerweise mit der Methode der numerischen Feldberechnung [12]. Aufgrund der bei hohen Drehzahlen in der Regel abgesetzten magnetischen Flusssdichte zur Verringerung der Ummagnetisierungsverluste ist aber der Magnetkreis weitgehend linear, sodass auch analytische Berechnungsmethoden verwendet werden können. Wesentliches Know-how steckt in der Adaption der feldorientierten Regelung eines konventionellen Antriebsstromreglers für die Magnetlagerung, die der Positionsregelung unterlagert ist. Die TU Darmstadt verwendet dazu das Regelungskonzept und die Steller der Firma Levitec und konzentriert sich auf Design und Optimierung des elektromagnetischen und mechanischen Systems, dem bei hohen Drehzahlen wegen der erhöhten Zusatzverluste durch Wirbelströme im Rotor entscheidende Bedeutung zukommt.

Ausblick

Magnetisch gelagerte High-Speed-Antriebe erlauben dank der hohen Drehzahlen hohe Leistungsdichten und führen zu kompakten Antrieben zum Beispiel im Pumpen- und Verdichterbereich. Lagerlose Motoren vereinfachen das magneti-

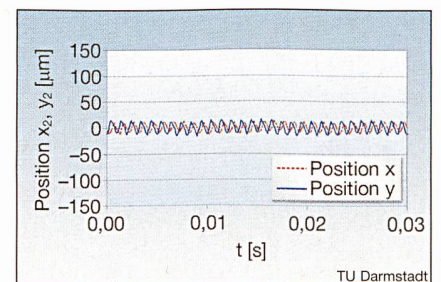


Bild 9 Radiale Auslenkung der Welle des lagerlosen High-Speed-Motors bei einer Drehzahl von 60 000/min

sche Lagersystem, da die Drehstromstandardantriebstechnik für die Magnetlagerung adaptiert werden kann. Lagerlose PM-Scheibenläufermotoren für kleinere Leistungen sind am Markt erhältlich und für Drehzahlen bis etwa 55000/min entwickelt worden [13]. Für Zylinderläufer speziell für grössere Leistungen und höhere Rotorumfangsgeschwindigkeiten sind das Konzept des lagerlosen Kombimotors und die Lösung mit zwei Halbmotoren Gegenstand der Forschung und Entwicklung. Sie stehen in Konkurrenz zu Antrieben mit konventioneller Magnetlagerung und haben dank der Krafteinleitung in der Paketmitte ein gutes Potenzial, die hohen mechanischen Anforderungen bei diesen hohen Drehzahlen sicher zu beherrschen. In einem wachsenden Markt für magnetisch gelagerte Antriebe wird sich daher neben der konventionellen aktiven Magnetlagerung auch der lagerlose Motor etablieren können.

Referenzen

[1] A. Binder, M. Klohr, T. Schneider: Losses in high speed permanent magnet motor with magnetic levitation for 40000/min, 40 kW. Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2004, Vol. 1, p. 93-94, (full version 6 pages on CD-ROM), Krakau, Polen, 5.-8. September 2004.
 [2] C. Redemann: Zusätzlicher Kundennutzen durch den Einsatz von Magnetlagern in Bearbeitungsspindeln, Gestaltung von Spindel-Lager-Systemen. WZLforum, RWTH Aachen, 9.-10. März 2006.
 [3] U. Bikle: Die Auslegung lagerloser Induktionsmaschinen. Dissertation, ETH Zürich, Schweiz, 1999.
 [4] R. Schöb, N. Barletta, J. Hahn: The bearingless centrifugal pump - a perfect example of a mechatronics system. Proceedings of 1st

IFAC-Conference on Mechatronics Systems, Darmstadt, Deutschland, 18.-20. September 2000.
 [5] R. Schöb: Centrifugal pump without bearings or seals. World Pumps, S. 2-5, 2002.
 [6] R. Schöb, H.-G. Reiter, V. Poirier et. al.: A bearingless motor for a left ventricular assist device (LVAD). Proceedings of 7th International Symposium on Magnetic Bearings, Zürich, Schweiz, 23.-25. August 2000.
 [7] P. Bösch: Lagerlose Scheibenläufermotoren höherer Leistung. Dissertation, ETH Zürich, Schweiz, 2004.
 [8] C. Redemann, P. Meuter, A. Ramella, T. Gemp: 30 kW bearingless canned motor pump on the test bed. Proceedings of 7th International Symposium on Magnetic Bearings. S. 189-194, Zürich, Schweiz, 23.-25. August 2000.
 [9] S. Silber, W. Amrhein, P. Bösch, R. Schöb, N. Barletta: Design aspects of bearingless slice motors. IEEE Transactions on Mechatronics, Vol. 10, Nr. 6, Dezember 2005.
 [10] L. Hertel, W. Hofmann: Basic approach for the design of bearingless motors. Proceedings of 7th International Symposium on Magnetic Bearings, S. 341-346, Zürich, 23.-25. August 2000.
 [11] M. Ooshima, A. Chiba, T. Fukao, A. Rahmann: Design and analysis of permanent magnet-type bearingless motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, Nr. 2, S. 292-299, April 1996.
 [12] T. Schneider, A. Binder, L. Chen: Design procedure of bearingless high-speed permanent magnet motors. Proceedings of 12th International Symposium on Electromagnetic fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF), Baiona, Spanien, 15.-17. September 2005.
 [13] R. Baumschlager, R. Schöb, J. Schmied: Bearingless Hydrogen Blower. Proceedings of 8th International Symposium on Magnetic Bearings, S. 277-282, Mito, Japan, 26.-28. August 2002.

Angaben zu den Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. **Andreas Binder** ist seit 1997 ordentlicher Professor an der TU Darmstadt und Leiter des Instituts für Elektrische Energiewandlung. *TU Darmstadt, Institut für Elektrische Energiewandlung, D-64283 Darmstadt, abinder@ew.tu-darmstadt.de*

Tobias Schneider studierte von 1997 bis 2002 Elektrotechnik an der TU Darmstadt und ist seitdem wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energiewandlung an der TU Darmstadt. *TU Darmstadt, Institut für Elektrische Energiewandlung, D-64283 Darmstadt, tschneider@ew.tu-darmstadt.de*

Dr. sc. techn. **Christian Redemann** promovierte im Jahr 2000 an der ETH Zürich. Er ist Gruppenleiter Entwicklung Systeme bei der Firma Levitec GmbH *Levitec GmbH, D-35633 Lahnu, christian.redemann@levitec.de*

¹⁾ Institut für Elektrische Energiewandlung (EW).

Résumé

Les moteurs sans paliers – une technologie d'avenir?

Les moteurs à haute vitesse sans paliers atteignent des régimes de 60000/min et deviennent une alternative aux moteurs à paliers magnétiques conventionnels. Les moteurs sans paliers représentent une alternative intéressante aux coussinets sans contact des machines à grande vitesse de rotation et paliers magnétiques actifs. Ils permettent, tout en conservant les avantages des paliers magnétiques comme le faible entretien, l'absence d'usure et de lubrifiants ainsi que les faibles pertes par friction, de réduire le nombre et la variété des composants nécessaires. Après des applications réussies dans le domaine des faibles vitesses de rotation, le moteur sans paliers pénètre désormais aussi dans le domaine des hauts régimes.

articles spécialisés

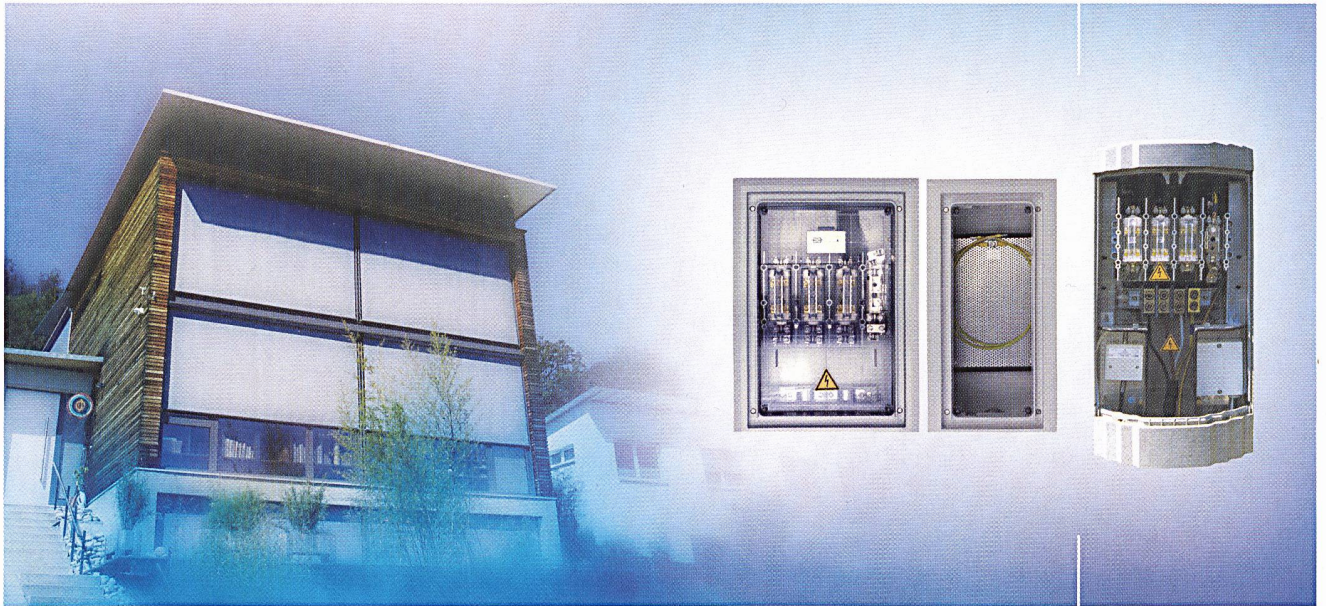
Aderendhülsen

Aderendhülsen

Vogt AG Verbindungstechnik
 CH-4654 Lostorf Switzerland
 Tel 062 285 75 75
 Fax 062 285 74 74

Vogt
 Verbindungstechnik

www.vogt.ch



Moderne Hausanschlussysteme
 – elegant für den Bauherrn und flexibel
 für das Elektrizitätswerk.

**RAUSCHER
 STOECKLIN**

Rauscher & Stoecklin AG
 Reuslistrasse 32, CH-4450 Sissach
 T +41 61 976 34 66, F +41 61 976 34 22
 info@raustoc.ch, www.raustoc.ch

**«Der Sicherheitstester»
 EurotestXE MI 3102**



Einfach, selbsterklärend und menügeführt
Installationsprüfungen nach EN 61 557 (NIV + NIN)
Automatische Testabläufe, Messkampagnenspeicher
Individuelle Protokolle mit EuroLinkXE-Software

ELKO
 SYSTEME AG

Messgeräte • Systeme • Anlagen
 Zur Kontrolle und Optimierung des Verbrauches elektrischer Energie
 Brüelstrasse 47 CH-4312 Magden Telefon 061-845 91 45 Telefax 061-845 91 40
 E-Mail: elko@elko.ch Internet: www.elko.ch



100% korrosionsfest für Abwasserreinigungs-,
 Kehrlichtverbrennungs- und Aussenanlagen,
 Lebensmittelindustrie, Bahn- / Strassentunnel,
 unterirdische Bauten, Offshore-Einrichtungen.
Zu international konkurrenzfähigen Preisen:

- **LANZ HE-Stromschienen** 400 A – 6000 A 1000 V.
 Korrosionsfest. Giessharzvergossen IP 68.
 EN / IEC-typengeprüft. Produktion ISO 9001. LM1
- **G-Kanäle, Gitterbahnen, Multibahnen, Weit-
 spann-Mb, Steigleitungen** aus Stahl tauch-
 feuerverzinkt DIN 50 976, rostfrei A4 WN 1.4571,
 und 1.4539, oder nach Kundenwunsch.
 Geprüft für Funktionserhalt im Brandfall E 30 / E 90.
- **MULTIFIX-Profilschienen und -Rohrschellen** für koor-
 dinierte Installationen von Kabel, Rohren und Leitungen.
 Abrutschsicher verzahnt. ACS Schocktest 3 bar.

**Robust dimensioniert. Perfekt verarbeitet. CE- und IEC-
 konform. Für Beratung, Offerte, preisgünstige Lieferung**
lanz oensingen ag Tel. 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24

Mich interessieren
 Bitte senden Sie Unterlagen.

Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. _____

A6

lanz oensingen ag
 CH-4702 Oensingen Südringstrasse 2
 Telefon 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24
 www.lanz-oens.com info@lanz-oens.com