

ENTKOPPLUNG DES ANTRIEBSSYSTEMS VOM SCHWEBESYSTEM FÜR LAGERLOSE ASYNCHRONMASCHINEN

J. Cai, G. Henneberger

Institut für Elektrische Maschinen

RWTH Aachen

Schinkelstraße 4

D-52056 Aachen, Deutschland

Tel: +49-241-80927640, Fax: +49-241-8092270

Email: caijumei@iem.rwth-aachen.de, henneberger@rwth-aachen.de

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode zur Beseitigung der Rückwirkung der Schwebestrome auf das Drehmoment bei lagerlosen Asynchronmaschinen untersucht. Mit Hilfe von transienten Finite-Elemente-Berechnungen wurde eine lagerlose Asynchronmaschine mit gewickelterm Läufer aufgrund einer lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer ausgelegt. Die transienten Berechnungen bestätigen, daß die lagerlose Asynchronmaschine mit gewickelterm Läufer es ermöglicht, das Antriebssystem vom Schwebesystem zu entkoppeln. Außerdem kann die lagerlose Asynchronmaschine mit gewickelterm Läufer eine größere radiale Kraft erzeugen als die lagerlose Asynchronmaschine mit Käfigläufer. Das Prinzip eines Regelungssystems wird vorgestellt.

1 EINLEITUNG

Immer mehr Anwendungsgebiete, z.B. in der Medizin oder in der Herstellung von Halbleitern, fordern einen sehr sauberen Antrieb, der ohne Schmierung auskommt und verschleißfrei ist. Statt mechanischen Lagern kann ein Antrieb mit Hilfe von magnetischen Lagern verschleißfrei betrieben werden. Aber die magnetischen Lager benötigen bei konventioneller Bauweise eine längere Antriebswelle und daher einen größeren Raum für das gesamte Antriebssystem. Bei einer lagerlosen Maschine hingegen lassen sich die Funktion des Motors und die Funktion der Lager in einer Einheit kombinieren. Diese Kombination ermöglicht einen verschleißfreien Betrieb und führt zu einer kürzeren Antriebswelle.

Das Konzept lagerloser Maschinen kann mit verschiedenen Maschinentypen implementiert werden, wie z.B. mit einer lagerlosen Reluktanz Maschine [1], einer lagerlosen Asynchronmaschine [2], einer lagerlosen Permanentmagnet Synchronmaschine [3], usw.. Lagerlose Asynchronmaschinen sind vorteilhaft: Bei einer einfachen und robusten Bauform können sie große Schwebekräfte erzeugen. Nach der Untersuchung der lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer wurde festgestellt, daß eine Rückwirkung von Schwebestromen auf das Drehmoment entsteht [4]. Diese Rückwirkung hat zur Folge, daß die Antriebsregelung und die Schweberegulierung gegenseitig gekoppelt sind, wodurch die Regelung extrem aufwendig wird.

In dieser Arbeit wird eine Methode zur Entkopplung des Antriebssystems vom Schwebesystem untersucht, um diese Rückwirkung zu beseitigen.

2 THEORIE

Im Prinzip beruht die Erzeugung der Schwebekraft in einer lagerlosen Maschine darauf, daß eine Überlagerung zweier Felder mit unterschiedlichen Polpaarzahlen p_A und p_S ($p_A = p_S \pm 1$,

$A \hat{=}$ Antrieb, $S \hat{=}$ Schweben) zu einer radialen Kraft führt. Die Besonderheit einer lagerlosen Asynchronmaschine liegt darin, daß die beiden Felder Drehfelder sind. Bei einer normalen Asynchronmaschine mit Käfigläufer können die Läuferstäbe sowohl p_A -polige Ströme also auch p_S -polige Ströme induzieren. Die induzierten Läuferfelder sind daher Drehfelder. Das p_S -polige Läuferfeld kann mit dem p_S -poligen Schwebefeld zusammenwirken und ein zusätzliches Drehmoment M' erzeugen, wie in der Abbildung 1 dargestellt. Das zusätzliche Drehmoment M' bedeutet eine Rückwirkung von Schwebeströmen auf das Drehmoment. Daher werden das Antriebssystem und das Schwebesystem gegenseitig gekoppelt.

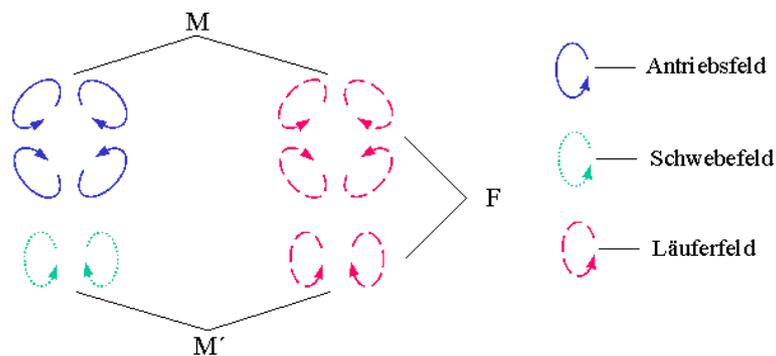


Abbildung 1: Prinzip der lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer

Um diese Kopplung zu vermeiden, sollte auf der Läuferseite kein p_S -poliges Feld induziert werden. Eine Lösung wäre es, statt des Käfigläufers einen Läufer mit einer Wicklung, deren Polpaarzahl gleich der Polpaarzahl der Antriebswicklung ist, einzusetzen. Wir nennen diese Maschine lagerlose Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer. Mit dem gewickelten Läufer kann in der Maschine nur ein Feld mit gleicher Polpaarzahl wie die Antriebswicklung auf der Läuferseite induziert werden. Und das Läuferfeld hat eine andere Polpaarzahl als das Schwebefeld. Deswegen kann das Läuferfeld mit dem Schwebefeld kein zusätzliches Drehmoment bilden. Abbildung 2 zeigt das Prinzip der Lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer.

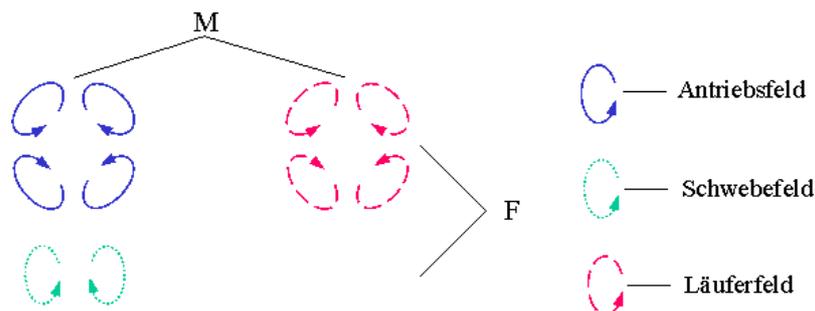


Abbildung 2: Prinzip der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer

3 AUSLEGUNG

In einer vergangenen Arbeit wurde am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH eine lagerlose Asynchronmaschine mit Käfigläufer untersucht, aufgebaut und im Prüfstand gemessen [4]. Bei der Untersuchung am Prüfstand wurde festgestellt, daß die Einschaltung und die Änderungen der Schwebeströme einen großen Einfluß auf die Antriebsregelung haben, d.h., daß eine Rückwirkung von Schwebeströmen auf das Drehmoment existiert. Diese Rückwirkung erschwert die Regelungen für Antrieb und Schweben. Um die Rückwirkung von Schwebeströmen auf das Drehmoment zu beseitigen, wurde eine lagerlose Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer nach dem oben genannten Prinzip ausgelegt. Abbildung 3

zeigt den Aufbau der lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer bzw. der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer.

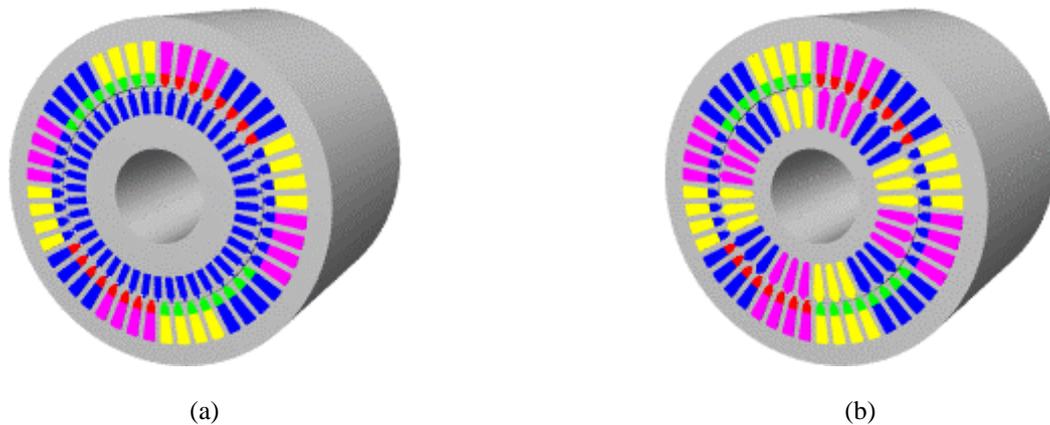


Abbildung 3: Aufbau der lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer (a) und der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer (b)

Die beiden Maschinen haben den gleichen Luftspalt und einen identischen Ständer-Aufbau, d.h. die gleiche Blechung, die gleiche dreiphasige vierpolige ($p_A=2$) Antriebswicklung und die gleiche dreiphasige zweipolige ($p_S=1$) Schwebewicklung. Der Unterschied zwischen den beiden Maschinen liegt nur in der Läuferbauform. In die Läufernuten der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer wurde eine dreiphasige vierpolige ($p_R=2$, $R \hat{=} \text{Läufer}$) Wicklung eingelegt. Die Läuferwicklung hat die gleiche Polpaarzahl wie die Antriebswicklung.

Die Läuferbleche der lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer haben 44 rechteckige Nuten, d.h., Anzahl und Form der Nuten sind nicht geeignet für eine dreiphasige vierpolige Wicklung. Deshalb wurde die Geometrie der Läufernuten der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer neu ausgelegt. Dabei wurde zunächst die Anzahl der Läufernuten auf 36 festgelegt und die Nuten mit einer runden Form analytisch untersucht. Danach wurden die Läufernuten durch transiente Finite-Elemente-Berechnungen optimiert, da die elektromagnetische Verteilung und die radiale Kraft bei konstanter Durchflutung abhängig von der Nutbreite und der Nuthöhe ist. Nach der Optimierung sollte einerseits die Maschine eine möglichst große radiale Kraft erzeugen können, andererseits sollte die Maschine auch möglichst nicht in den Sättigungsbereich geraten. Abbildung 4 zeigt die untersuchten Läufernuten mit unterschiedlichen Nutbreiten und Nuthöhen.

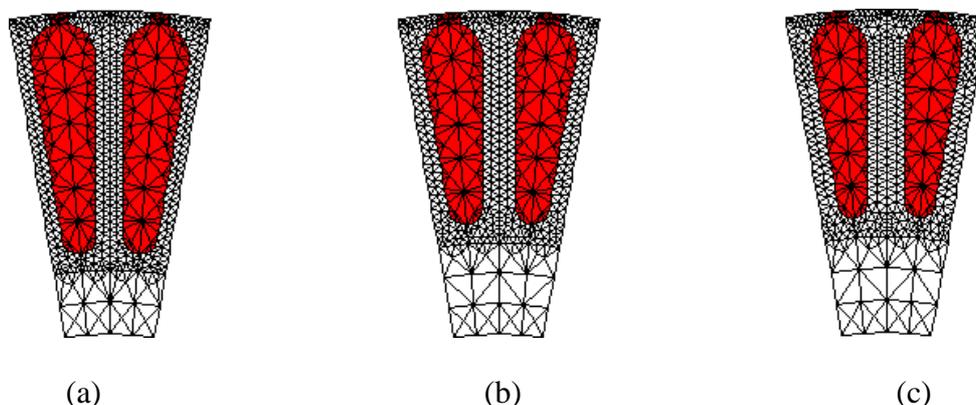


Fig. 4: Läufernuten mit unterschiedlicher Nutgröße

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Nutgröße

Läufer- nuten	Nutbreite (mm)	Nuthöhe (mm)	Kupfer- füllfaktor	Stromdichte (A/mm ²)	maximale Induktion (T)	radiale Kraft (N)
(a)	5.8	20.36	0.6114	2.63	2.005	350.06
(b)	5.4	17.78	0.7407	3.171	1.85	518.59
(c)	5.0	17.36	0.8372	3.583	1.846	550.83

In Tabelle 1 sind die elektromagnetischen Werte und die radiale Kraft nach den Finite-Elemente-Berechnungen mit unterschiedlichen Läufernutgrößen aufgelistet. Es ist eindeutig, daß abnehmende Nutbreiten und Nuthöhen zu zunehmender radialer Kraft, zunehmender Stromdichte und abnehmender maximaler Induktion führen. Bei konstanter Durchflutung nimmt der Kupferfüllfaktor ebenfalls zu. Nach dem Vergleich aller Werte ist die Läufernutform (b) am günstigsten. Einerseits ergibt die Nutform (b) eine ausreichend große radiale Kraft. Andererseits hat die Nutform (b) einen realistischen Kupferfüllfaktor. Die elektrischen und magnetischen Belastungen sind auch günstig verteilt.

Im folgenden sind die mechanischen Daten der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer aufgelistet.

Ständeraußendurchmesser:	165 mm
Ständerinnendurchmesser:	103 mm
Läuferaußendurchmesser:	102 mm
Läuferinnendurchmesser:	45 mm
Luftspalt:	0.5 mm
Eisenpaketlänge	122 mm

4 WIRKUNG DER LÄUFERWICKLUNG

Die Besonderheit bei lagerlosen Maschinen liegt darin, daß Rotation und Schweben gleichzeitig durch das Zusammenwirken der Antriebsströme, der Schwebeströme und der Läuferströme ermöglicht werden. Um die transienten Vorgänge des Schwebens und der Rotation des Läufers darstellen zu können, müssen die Maschinen mit transienten Feldberechnungsmethode berechnet werden. Eine statische Feldberechnung kann nur ein stillstehendes Maschinenmodell darstellen und ist nicht ausreichend für ein rotierendes Maschinenmodell. Insbesondere bei lagerlosen Asynchronmaschinen sind alle Felder Drehfelder. Nur eine transiente Feldberechnung kann zu den der Realität entsprechenden Ergebnissen führen. Deswegen wurden transiente Finite-Elemente-Berechnungen für die beiden vorgestellten lagerlosen Asynchronmaschinen durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die radiale Kraft als Ergebnis der transienten Feldberechnungen. Abbildung 6 zeigt das Drehmoment aus der transienten Feldberechnung.

Zum Zeitpunkt $t=0s$ werden die Maschinen mit Antriebsströmen eingeschaltet und gleichzeitig drehen sich die Maschinen. Dann werden das Antriebsfeld und das Läuferfeld gebildet, und ein konstantes Drehmoment wird erzeugt. Die Maschine läuft wie eine normale Asynchronmaschine. Zum Zeitpunkt $t=0.1s$ werden die Schwebeströme in die Maschine eingepreßt. Dann wird das Schwebefeld gebildet. Die Überlagerung aller Felder ergibt eine konstante radiale Kraft.

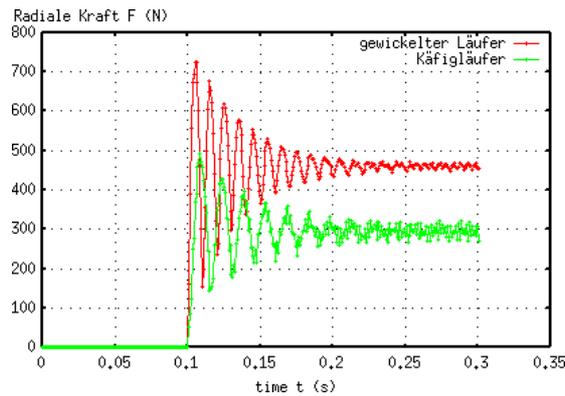


Abbildung 5: Radiale Kraft aus der transienten Feldberechnung

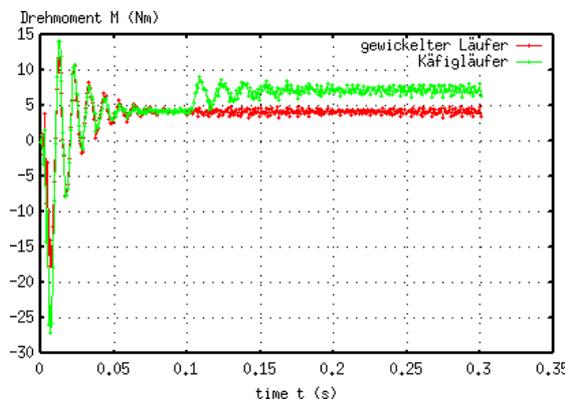


Abbildung 6: Drehmoment aus der transienten Feldberechnung

Die Ergebnisse zeigen, daß beide Maschinen sowohl ein konstantes Drehmoment als auch eine konstante radiale Kraft erzeugen können. Bei der lagerlosen Asynchronmaschine mit Käfigläufer hat die Einschaltung der Schwebeströme einen großen Einfluß auf das Drehmoment. Bei der lagerlosen Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer hingegen haben die Schwebeströme keinen Einfluß auf das Drehmoment. Zudem erzeugt die Maschine mit gewickeltem Läufer eine größere radiale Kraft als die Maschine mit Käfigläufer.

Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die radiale Kraft und das Drehmoment bei unterschiedlichen Schwebeströmen der lagerloser Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer.

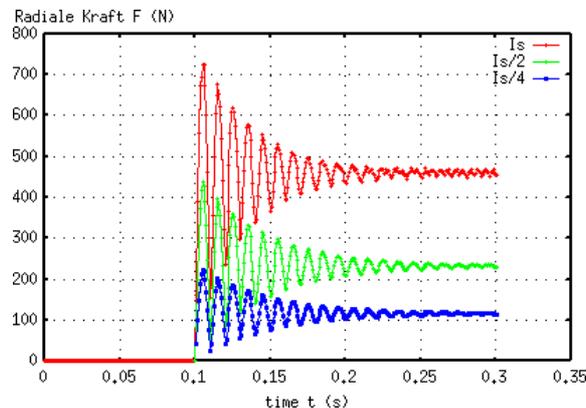


Abbildung 7: Radiale Kraft bei unterschiedlichen Schwebeströmen

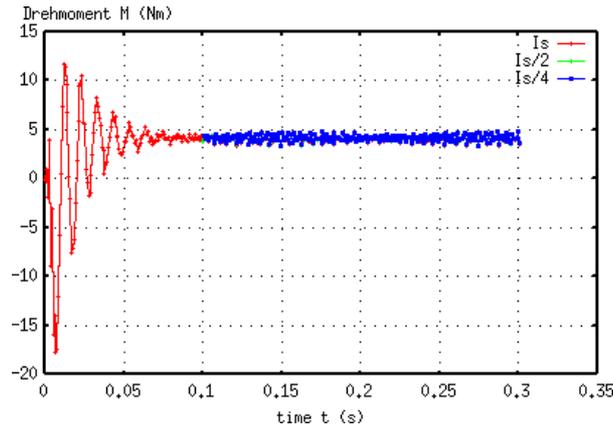


Abbildung 8: Drehmoment bei unterschiedlichen Schwebeströmen

Die Ergebnisse bestätigen, daß die radiale Kraft proportional zu der Größe der Schwebestrome ist. Aber die Änderungen der Schwebestrome haben keinen Einfluß auf das Drehmoment.

Der Vergleich der Ergebnisse der transienten Berechnungen für die beiden Maschinen mit unterschiedlichen Läufern zeigt, daß die Rückwirkung von Schwebestromen auf das Drehmoment bei lagerloser Asynchronmaschine mit Käfigläufer auftritt und bei lagerloser Asynchronmaschine mit gewickelter Läufer nicht auftritt.

5 REGELUNGSSYSTEM

Die Ergebnisse der transienten Berechnungen zeigen, daß die lagerlose Asynchronmaschine mit gewickelter Läufer es ermöglicht, das Antriebssystem vom Schwebesystem zu entkoppeln. Einerseits ist das Drehmoment unabhängig von den Schwebestromen, andererseits ist die radiale Kraft bei konstanter Belastung eine Funktion der Schwebestrome und der Exzentrizität des Läufers. Deswegen können das Antriebssystem und das Schwebesystem getrennt geregelt werden. Abbildung 9 zeigt das Diagramm des gesamten Regelungssystems. Für die Antriebsregelung wird die feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine verwendet.

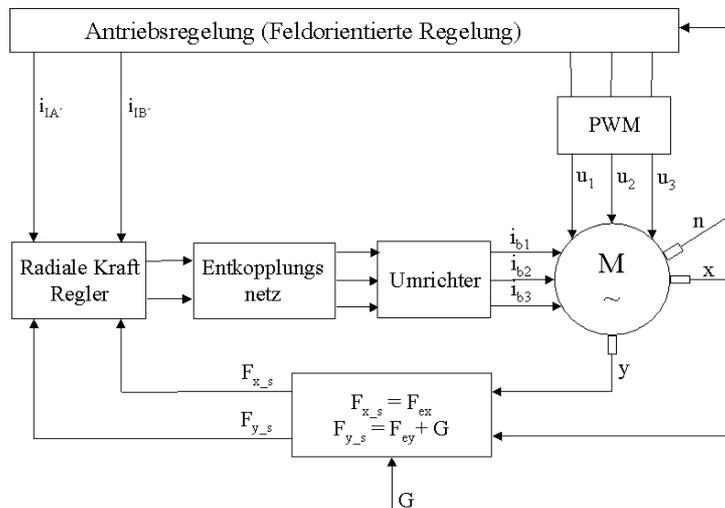


Abbildung 9: Regelungssystem

Wie in der Abbildung 7 dargestellt, ist die radiale Kraft proportional zu den Schwebeströmen, wenn der Läufer keine Exzentrizitäten in x- und y-Richtungen hat. Es ist möglich, daß eine geregelte radiale Kraft genau das Gewicht G der Antriebswelle kompensieren kann. Mit statischen Exzentrizitäten sind die Exzentrizitätskräfte F_{ex} und F_{ey} bei konstanter Belastung auch konstant [4]. Dann sind die radialen Kräfte in x- und y-Richtungen nur abhängig von den Schwebeströmen und den Exzentrizitäten. Durch radiale Kraftregler und ein Entkopplungsnetz werden die Schwebestrome so eingestellt, daß die radiale Kräfte in x und y Richtungen entkoppelt geregelt werden, um die Exzentrizitätskräfte und das Gewicht der Antriebswelle zu kompensieren.

Das Zusammenwirken der Felder bei verschiedenen Betriebszuständen wird in Fig. 10 dargestellt.

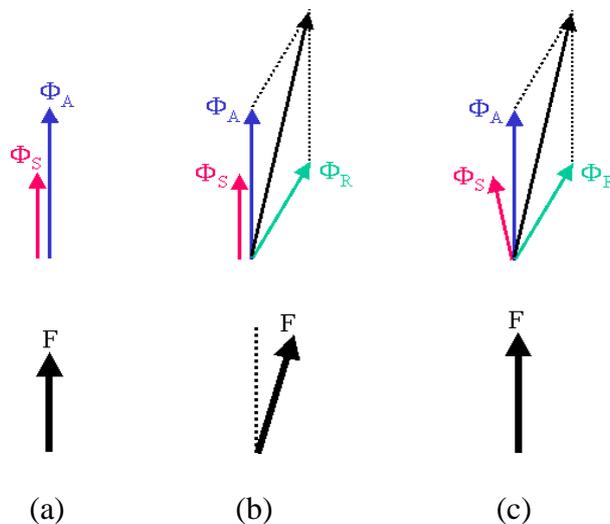


Fig. 10: Zusammenwirken der Felder
 (a) bei Leerlauf
 und (b), (c) bei konstanter Belastung

Im Leerlauf wird kein Läuferfeld induziert. Im Arbeitspunkt werden die Schwebestrome so gesteuert, daß die Überlagerung der beiden Felder eine radiale Kraft erzeugt, die genau dem Gewicht der Antriebswelle entgegenwirkt.

Bei konstanter Belastung wird das Läuferfeld induziert. Das Läuferfeld hat eine Phasenverzögerung gegenüber dem Antriebsfeld. Die Überlagerung dieser beiden Felder ergibt eine Phasenverzögerung gegenüber dem Antriebsfeld. Damit die radiale Kraft in Gegenrichtung zum Gewicht der Antriebswelle wirkt, werden die Schwebestrome so geregelt, daß das Schwebefeld einen Phasenvorlauf gegenüber dem Antriebsfeld hat.

5 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund der Analyse der elektromagnetischen Felder in lagerlosen Asynchronmaschinen die Rückwirkung von Schwebestromen auf das Drehmoment untersucht. Mit Finite-Elemente-Berechnungen wurde eine lagerlose Asynchronmaschine mit gewickeltem Läufer ausgelegt. Die Feldberechnungen bestätigen, daß diese Maschine die Entkopplung des Antriebssystems vom Schwebesystem ermöglicht. Schließlich wurde das Prinzip eines Regelungssystems vorgestellt.

REFERENCES

1. A. Chiba, M. A. Rahman and T. Fukao, "Radial Force in a Bearingless Reluctance Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 786-790, March 1991.
2. R. Schöb, "Beiträge zur lagerlosen Asynchronmaschine" ETH, Zürich, Schweiz, Dissertation, 1993.
3. Yohji Okada, Shigenobu Miyamoto and Tetsuo Ohishi, "Levitation and Torque Control of Internal Permanent Magnet Type Bearingless Motor", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 5, pp. 565-571, September 1996.
4. K. Ben Yahia, "Entwicklung von Magnetlagern am Beispiel einer linearen Magnetführung und einer lagerlosen Asynchronmaschine", RWTH Aachen, Deutschland, Dissertation, 2000.
5. K. Ben Yahia, G. Henneberger, "Development of a bearingless induction motor", Proceedings of the Fourth International Conference on Motion and Vibration Control, Zürich, Vol. 3, pp. 1083-1087, August 1998.