

**Neuer Gestaltungsansatz bei aerostatisch geführten
Ein- und Mehrkoordinatenantrieben**

**New design approach to air-guided single- and
multi-coordinate drives**

F. Mochel, W. Schinköthe (IKFF)

Beitrag zur

**8. ETG/GMM-Fachtagung
Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik**

Würzburg

23. September 2010

Neuer Gestaltungsansatz bei aerostatisch geführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben

New design approach to air-guided single- and multi-coordinate drives

Dipl.-Ing. Frank Mochel, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik (IKFF), Stuttgart, Deutschland, ikff@ikff.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Ein neuer Gestaltungsansatz bei luftgeführten Ein- und Mehrkoordinatenantrieben sieht die vollständige Integration der aktiven Antriebs- und Luftführungskomponenten in den Stator vor. Mit dieser konstruktiven Umkehrung der sonst üblichen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen sollen die derzeit bei industriell verfügbaren Linearachsen und Planarmotoren bestehenden Nachteile wie begrenzte Verfahrswege und eingeschränkte Dynamik vermieden werden, die sich bauartbedingt infolge der sonst erforderlichen und permanent mitzuführenden Versorgungsleitungen für z. B. Strom, Druckluft, Steuer- und Messsignale ergeben. Während sich dieser Ansatz antriebsseitig mit vertretbarem Aufwand durch eine gestellfeste Antriebswicklung und einen passiven, magnetbehafteten Läufer realisieren lässt, entstehen bei der aerostatischen Führung auf Grund der ortsfesten Druckluftspeisung und des im Vergleich zum Läufer flächenmäßig größeren Luftaustrittsbereichs eine Reihe prinzipbedingter Probleme, die den Aufbau und den Betrieb derartiger Antriebssysteme grundlegend beeinflussen.

Abstract

In a new design approach to air-guided single- and multi-coordinate drives, the active drive and air bearing components are completely integrated in the stator. By changing the usual arrangement of active and passive parts it is possible to eliminate the present disadvantages of commercial linear and planar drives i.e. the limited track and restricted dynamic. Normally these disadvantages are caused by the required wiring used for current, compressed air, control and measurement signals. For this approach the drive components could be realised with acceptable effort by using stator fixed coils and a passive slider with integrated magnets. Opposed to this, the implementation of the air bearing is more challenging because of the stationary air exhausting nozzles and the much larger exhausting stator area compared to the slider. This fact has a fundamental influence on the structure and the operation of the guidance concept.

1 Einleitung

Luftgeführte Ein- und Mehrkoordinatenantriebe sind in vielen Bereichen der Industrie und Wissenschaft unverzichtbar. Hohe Genauigkeit, nahezu nicht vorhandene Reibung, keine verunreinigenden Schmiermittel sowie weitgehende Wartungsfreiheit stellen wichtige Eigenschaften dar, die heute von vielen Anwendungen in Mess-, Prüf- und Produktionseinrichtungen gefordert werden und für den einwandfreien Betrieb dieser Anlagen häufig unabdingbar sind. Nicht zuletzt deshalb haben sich aerostatisch geführte Antriebssysteme längst im Bereich der Fein- und Mikrobearbeitung sowie in der Medizintechnik, der Pharma- und der Lebensmittelindustrie, wo neben kleinsten Abmessungen und höchster Präzision insbesondere auch ein kontaminationsfreier Betrieb angesichts steriler oder emissionskritischer Umgebungen (Reinraumtauglichkeit) zu garantieren ist, etabliert.

Den derzeit verfügbaren aerostatisch geführten Linearachsen und Planarmotoren (**Bild 1**) ist gemein, dass sie läuferseitig integrierte Führungskomponenten zur Druckluftspeisung im Zusammenhang mit ebenfalls meist läuferseitig aktiven Antriebskomponenten nutzen. Diese Anordnung der Funktionselemente bedingt aber Versorgungs-

leitungen für z. B. Druckluft, Strom, Steuer- und Messsignale, die nicht nur aufwändig und sorgsam nachgeführt werden müssen, sondern zugleich die Dynamik, die Bewegungsfreiheit und den Arbeitsraum, insbesondere wenn mehrere Läufer auf einem Stator genutzt werden, erheblich einschränken. Antriebe dieser Bauart eignen sich daher lediglich für kleine Verfahrswege.

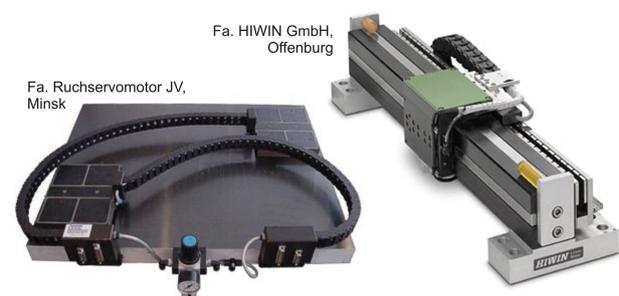


Bild 1 Aerostatisch geführte Direktantriebe

2 Neues Antriebskonzept

Die Realisierung großer Verfahrswege für räumlich unbegrenzte Transport- und Positionieraufgaben erfordert ein

hiervon abweichendes Gestaltungskonzept, das die vollständige Integration der aktiven Antriebs- und Luftführungsteile in den Stator vorsieht, folglich auf die sonst läuferseitig notwendigen Zuleitungen verzichtet und einen gänzlich ungebundenen, frei beweglichen Läufer ermöglicht.

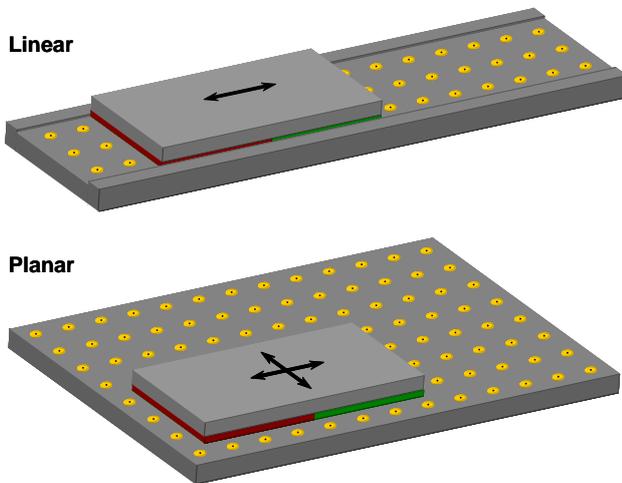


Bild 2 Neuer Konstruktionsansatz für Direktantriebe mit passiven Läufern

Dieser Ansatz setzt allerdings eine konstruktive Umkehrung der bisher üblichen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen voraus (**Bild 2**). Während sich dies antriebsseitig mit vertretbarem Aufwand durch eine gestellfeste Antriebswicklung und einen passiven, magnetbehafteten Läufer realisieren lässt, ergeben sich bei der aerostatischen Führung auf Grund der ortsfesten Druckluftein- speisung und des im Vergleich zum Läufer flächenmäßig größeren Luftaustrittsbereichs eine Reihe prinzipbedingter Probleme, die den Aufbau und den Betrieb der Führung grundlegend beeinflussen.

Am IKFF sind deshalb neben der grundsätzlichen Gestaltung und Auslegung der Führungselemente insbesondere die Realisierung einer verbrauchsoptimierten Druckluftversorgung sowie das positions- und bewegungsabhängige Führungsverhalten Inhalt aktueller Forschungsarbeiten. Zu den Untersuchungsschwerpunkten zählen hierbei eine zuverlässige und möglichst selbsttätige Kommutierung der Druckluftzufuhr, um den in Abhängigkeit von der Statorfläche enorm ansteigenden Luftverbrauch zu begrenzen, sowie die gezielte Analyse des Läuferverhaltens bzw. der komplexen Strömungsvorgänge beim Überfahren der beaufschlagten, flächig verteilten Lufteinlassdüsen, um ein instabiles Verhalten auf Grund von Schwingungen, Kippmomenten, Rückstößen oder Grundieren auch unter Berücksichtigung der zeitlich und örtlich veränderlichen Normalkräfte des elektrodynamischen Antriebs zu vermeiden.

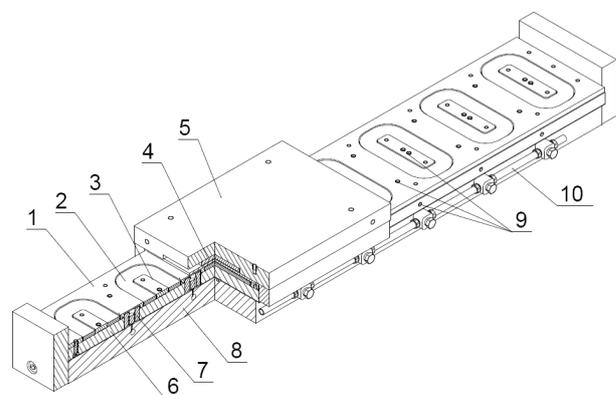
Aber auch die räumliche Anordnung der Antriebs- und Führungskomponenten zueinander und deren Integration in den Stator verursachen mitunter erhebliche Beeinträchtigungen, die im Betrieb u. a. schwankende Antriebs- und

störende Rastkräfte hervorrufen und folglich bei der Entwicklung des elektrischen Antriebssystems zu berücksichtigen sind. Umfangreiche Simulationen und Messungen an realisierten Prototypen zeigen, dass die bekannten bzw. etablierten Lösungen und Gestaltungsregeln der konventionellen Antriebstechnik oft nur eingeschränkt oder gar nicht auf diesen neuartigen Aufbau übertragen werden können, um die nachteiligen Auswirkungen eliminieren oder zumindest verringern zu können.

Die nachfolgenden Kapitel sollen deshalb die wesentlichen Probleme sowohl bei der Entwicklung und Auslegung der jeweiligen Teilsysteme (elektrodynamischer Direktantrieb, aerostatische Führung) als auch bei deren Zusammenführung zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem aufzeigen. Es werden konkrete Lösungsansätze und deren Umsetzung anhand erster Prototypen diskutiert.

3 Aufbau und Funktionsweise

Zum besseren Verständnis ist der detaillierten Betrachtung der einzelnen Komponenten eine allgemeine Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus und der Funktionsweise des Gesamtsystems vorangestellt. **Bild 3** und **Bild 4** veranschaulichen den neuartigen Gestaltungsansatz am Beispiel eines aerostatisch geführten Linearantriebs mit räumlich kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungselementen. Eine räumlich getrennte Anordnung (**Bild 5**) ist zwar mit geringerem Aufwand realisierbar, soll an dieser Stelle aber nicht näher erörtert werden, da sie lediglich bei Linearachsen genutzt und nicht auf Planarmotoren übertragen werden kann. Beide Konzepte basieren aber auf derselben Funktionsweise.



1 Führungsdeckplatte
2 Antriebsspule
3 Spulenkern
4 Permanentmagnet
5 Läuferrückschlussplatte
6 Statorrückschlussplatte
7 Ventilkörper
8 Grundplatte
9 Mikrodüseneinsatz
10 Druckluftanschluss

Bild 3 Prinzipieller Aufbau des linearen Antriebs

Zusammen mit den beiden weichmagnetischen Rückschlussplatten bilden die Permanentmagnete und die Spulen den elektrodynamischen Antrieb.

Die in der statorseitigen Führungsfläche eingelassenen, flächig verteilten Mikrodüseneinsätze fungieren als Drosseln und sind für den Aufbau eines tragfähigen Luftfilms

entscheidend. Die Druckluftversorgung erfolgt über einen zentralen Druckluftanschluss und intern angeordnete Verteilerkanäle, die im Ruhezustand von speziellen ferromagnetischen Ventilkörpern verschlossen und erst bei Überdeckung durch den Läufer geöffnet werden (s. Kapitel 4.2).

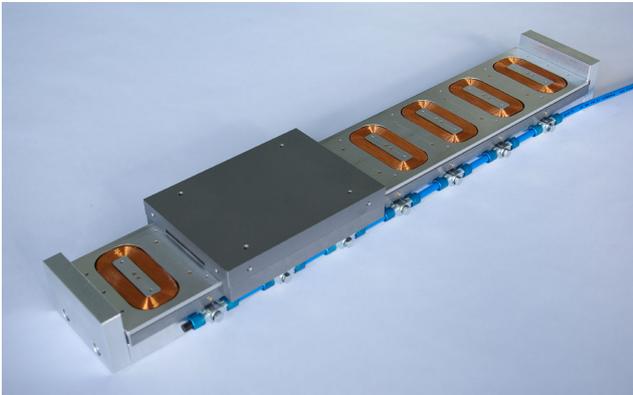


Bild 4 Linearantrieb mit räumlich kombiniert angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten

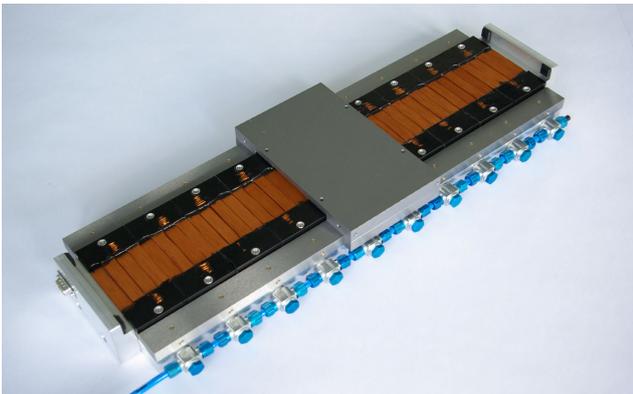


Bild 5 Linearantrieb mit räumlich getrennt angeordneten Antriebs- und Führungskomponenten

4 Großflächige aerostatische Führungen

Basierend auf dem experimentell ermittelten, realen Betriebsverhalten dieser Führungen und den zusätzlichen Anforderungen, die speziell an ebene Ein- und Mehrkoordinatenantriebe mit uneingeschränkten Bewegungsräumen zu stellen sind, konnte der in [1] detailliert beschriebene Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeleitet werden.

Zu den Untersuchungsschwerpunkten zählen:

- das Führungsverhalten (insbesondere beim Überfahren beaufschlagter Drosselstellen und unter Berücksichtigung der zeitlich und örtlich veränderlichen Antriebskräfte),
- die Realisierung einer verbrauchoptimierten Druckluftversorgung (Entwicklung einer zuverlässigen und möglichst selbsttätigen Kommutierung der Luftauslassbereiche),

- die Gestaltung der Drosselstellen (Mikrodüsen oder offenporöse Werkstoffe) und Bestimmung der Anforderungen an die Führungsflächen,
- die modulare Gestaltung des Stators,
- die Entwicklung geeigneter Berechnungs- und Simulationsverfahren.

4.1 Stabiles Führungsverhalten

Wie bereits erwähnt, ändern sich infolge der neuen Anordnung der aktiven und passiven Baugruppen die Führungseigenschaften grundlegend. Im Gegensatz zum statischen bzw. quasistatischen Betriebsverhalten bei läuferseitig integrierten Elementarlagern weisen statorseitig beaufschlagte Führungen nicht nur dynamisch äußerst komplexe, sondern bisweilen auch instabile Strömungsvorgänge auf. Insbesondere das Überfahren der Mikrodüsen bewirkt eine permanente Veränderung bzw. Störung des tragenden Luftfilms, was wiederum zu Schwingungen, Kippmomenten, Grundieren oder Rückstößen führen kann. Bei den konventionellen Luftlagern gibt es kein vergleichbares Verhalten. Bisherige Untersuchungen zeigen aber, dass die beschriebenen Auswirkungen bei Verwendung von Mikrodüsen als Drosselstellen stärker ausfallen als bei porösen Werkstoffen und insofern deren optimale Gestaltung und Anordnung mit entscheidend sind.

Zudem schwankt die Anzahl der Druckluft zuführenden Mikrodüsen unter dem Läufer je nach dessen Position erheblich. Mit entsprechend optimierten Bypassrillen auf der läufer- und / oder statorseitigen Führungsfläche kann die Tragfähigkeit jedoch verbessert und damit der Einfluss der variierenden Düsenanzahl reduziert werden. Dies setzt allerdings eine individuelle Auslegung und Anpassung der Bypassrillen an den jeweiligen Anwendungsfall voraus.

4.2 Verbrauchsoptimierte Druckluftversorgung

Unabhängig von der Statorgröße kann die Tragkraft der Führung nur über die kleinere Läuferfläche erzielt werden. Die den Läufer umgebenden Bereiche sind zwar beaufschlagt aber ohne Belastung, so dass nahezu die gesamte eingebrachte Druckluft ungenutzt entweicht. Zur Senkung des Luftverbrauchs ist folglich eine Begrenzung der Druckluftzufuhr auf die vom Läufer tatsächlich benötigte Statorzone unerlässlich.

Dazu ist eine Unterteilung der gesamten Statorfläche in geeignet kleine Ausströmbereiche vorzunehmen. Um eine ungestörte Läuferbewegung gewährleisten zu können, müssen diese einzelnen Segmente allerdings zeitlich und räumlich korrekt zueinander betrieben werden. Dies erfordert eine zuverlässige Steuerung oder Regelung der Luftzufuhr in Abhängigkeit von der aktuellen Position sowie dem vorgesehenen Fahrweg des Läufers, möglichst ohne großen Zusatzaufwand.

In Analogie zum elektrotechnischen Wortgebrauch wird dieser Vorgang der beabsichtigten Weiterschaltung bzw. der Zu- und Abschaltung der Druckluftversorgung zugeordneter Führungsbereiche ebenfalls als „Kommutierung“

bezeichnet. Realisierbar ist eine derartige Kommutierung zum Beispiel mittels extern gesteuerter Schaltventile. Jedoch wird hierfür mit zunehmender Statorgröße oder bei entsprechend kleiner Segmentierung der Fläche eine große Anzahl teurer Schaltventile benötigt, die ihrerseits einen enormen Montage- und Steuerungsaufwand verursachen. Aus wirtschaftlichen Gründen ist deshalb eine möglichst selbsttätige Kommutierung der Statorsegmente vorzusehen, die ggf. die vorhandenen Antriebs- und Führungskomponenten sinnvoll einbezieht und ohne äußeren Bedieneingriff auskommt, d. h. einzig durch die Läuferposition oder die Läuferbewegung gesteuert wird.

Am IKFF wurden deshalb bereits verschiedene Verfahren zur selbsttätigen Kommutierung der statorseitigen Luftversorgung entwickelt. Als besonders geeignet hat sich hierbei eine Lösung erwiesen, deren Funktionsweise auf der geschickten Ausnutzung des Antriebsmagnetfeldes durch integrierte ferromagnetische Ventilkörper basiert.

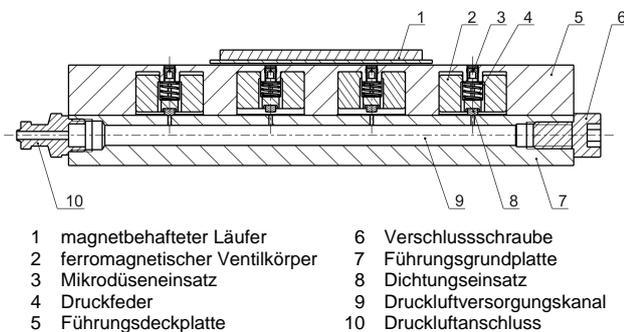


Bild 6 Aerostatische Führung mit selbsttätiger Kommutierung der statorseitigen Druckluftzufuhr (ohne Antrieb)

Wie in **Bild 6** am Modellschnitt zu erkennen ist, verschließen diese Ventilkörper im Ruhezustand durch Federkraft die Druckluftversorgungskanäle und werden erst bei entsprechender Überdeckung durch den Läufer auf Grund der dann wirkenden Anziehungskraft des Permanentmagnetfeldes entgegen der Federkraft soweit angezogen, dass sich die Zuleitungen der Versorgungskanäle öffnen. Die Druckluft kann nunmehr durch die axialen Durchgangsbohrungen der Ventilkörper in die Vorkammern und von dort über die flächig angeordneten Mikrodüsen in den Luftspalt der Führung einströmen.

Dieses Funktionsprinzip lässt sich gleichermaßen auf ein- oder mehrachsige Antriebe übertragen. Sowohl das Öffnen als auch das Schließen der Ventile erfolgt bei richtiger

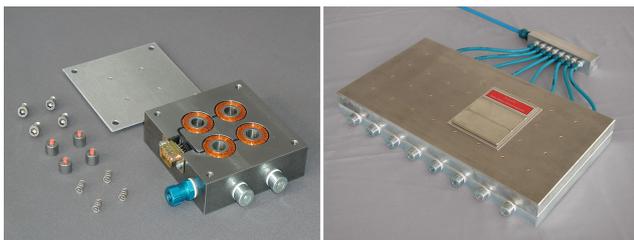


Bild 7 Planare Versuchsmodelle

Auslegung des Magnetkreises, der Federkraft und des anliegenden Speisefluidrucks selbsttätig, ohne externen Eingriff, ausschließlich in Abhängigkeit von der Läuferposition. **Bild 7** zeigt exemplarisch zwei realisierte Führungen mit integrierter Kommutierung der Druckluftversorgung, mit denen nicht nur die Funktionsfähigkeit, sondern auch die Zuverlässigkeit der selbsttätigen Kommutierung eindeutig belegt werden konnte.

4.3 Genauigkeitsanforderungen an die Führungsflächen

Die Luftspalthöhe konventionell gestalteter und in ihrem Auslegungspunkt betriebener aerostatischer Führungselemente mit Einlassdrosselung liegt üblicherweise im Bereich von 7 – 15 μm . Bewährte Gestaltungsempfehlungen (u. a. [2], [3]) fordern für einen störungsfreien Einsatz dieser Systeme eine Ebenheit der den Führungsspalt bildenden Flächen, die mindestens um den Faktor 3 bis 4 kleiner sein soll als der vorgewählte Luftspalt. Die Rautiefe der Führungsflächen hat im Vergleich zur Ebenheit einen geringeren Einfluss auf die Tragfähigkeit und das Betriebsverhalten. Es ist ausreichend, wenn sie in den gleichen Grenzen wie die Abweichung von der Ebenheit bleibt.

Diese Vorgaben können unverändert auch auf die neuen Führungssysteme angewandt werden, sie sind allerdings nur bei entsprechender Stabilität der Führungselemente zu erreichen. Insbesondere bei den großflächigen Statorn mit ihren integrierten Antriebs- und Luftkommutierungsteilen verursacht dies zuweilen erhebliche konstruktive und fertigungstechnische Probleme. Gängige Bearbeitungsverfahren zur Erzeugung der notwendigen Oberflächengenauigkeit sind beispielsweise Feinschleifen mit anschließendem Läppen oder Polieren sowie bei nicht eisenhaltigen Werkstoffen die Diamantbearbeitung. Mit Diamantfräsen (Fly-cutting) können Ebenheiten $< 0,5 \mu\text{m} / 100 \text{mm}$ und Rauheiten $R_a < 5 \text{nm}$ (materialabhängig) hergestellt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Fertigungsschritte an den bereits endmontierten Führungselementen erfolgen müssen, um nachträglichen Verzug ausschließen zu können. Denn bereits kleine Spannungsänderungen in den Führungsdeckplatten, wie sie z. B. beim Verschrauben mit einer nicht ideal ebenen Gegenfläche oder in den Verschraubungspunkten durch falsche Anzugsmomente entstehen, führen schnell zu mikrometergroßen Unebenheiten in Form von Vertiefungen oder Wölbungen, die den Gebrauch der Führungen nachteilig beeinflussen oder sogar ganz unterbinden können.

4.4 Berechnungsgrundlagen für die Auslegung

Die Berechnung erfolgt mit dem Ziel, konkrete Daten für die Dimensionierung, Gestaltung und den Betrieb der druckluftgespeisten Führungen bereitzustellen. Neben den geometrischen Abmessungen der Führungsflächen, der Anzahl und Verteilung der Drosselstellen sowie dem Drosselquerschnitt sind vor allem die anwendungs- und betriebsabhängigen Größen wie beispielsweise die Tragkraft,

die Steifigkeit, die Luftspalthöhe, der Speise- und der Kammerluftdruck von großer Bedeutung.

Die genaue Analyse der Strömungsvorgänge und der Druckverteilung sowohl im Führungsspalt als auch in den Drosselstellen ist eine notwendige Voraussetzung hierfür. Die Berechnungsgrundlage bilden dabei die Bernoullische Druck- und Energiegleichung, die Navier-Stokesschen Bewegungsgleichungen sowie die Kontinuitätsbedingung. Je nach Art und Form des zu untersuchenden Führungselements sowie nach gewähltem Berechnungsansatz ergeben sich allerdings unterschiedliche Näherungsverfahren zur Auslegung aerostatischer Systeme. Die bekanntesten Berechnungsmethoden gehen auf Unterberger [4], Loch [5], Heinzl [6], Gerke [7] und Donat [2] zurück.

Allen diesen Verfahren ist gemein, dass sie lediglich den stationären Betriebszustand abbilden. Während dies für die Auslegung konventioneller Führungen mit läuferseitig mitbewegten Einströmöffnungen zur Druckluftzufuhr ausreichend ist, ergeben sich bei der statorseitigen Druckluftversorgung auf Grund der ständig variierenden Anzahl und veränderlichen Lage der Düsen unter dem Läufer dynamische Zustände, die bislang durch kein Berechnungsverfahren erfasst werden können. Es besteht zwar die Möglichkeit, mehrere ausgewählte Extremstellungen statisch zu untersuchen und auf Basis dieser Ergebnisse Rückschlüsse auf die Betriebsparameter und Eigenschaften der aerostatischen Führungen zu ziehen, eine präzise Auslegung und vollständige Erfassung des Führungsverhaltens ist auf diese Weise jedoch nicht zu erreichen.

Auch die modernen Verfahren zur Strömungssimulation scheitern an dieser Aufgabe. Obgleich mit ihrem Einsatz das genaue Druckprofil im Luftspalt statisch und transient simuliert und somit die Tragkraft und Steifigkeit exakt berechnet werden können, sind keine Aussagen zum vollständigen Betriebs- und Schwingungsverhalten möglich. Da aber insbesondere die selbsterregten Schwingungen zum Ausfall („Air-Hammer“) führen können, sind experimentelle Untersuchungen an Prototypen unter realitätsnahen Bedingungen auch weiterhin unerlässlich.

5 Elektrodynamischer Antrieb

5.1 Kommutierung

Der Betrieb des elektrodynamischen Antriebs kann sowohl gesteuert als auch positionsgeregelt erfolgen. Auf Grund der großen Verfahrenwege und des durch die aktiven Antriebs- und Führungskomponenten bereits stark eingeschränkten, für die statorseitige Integration eines Wegmesssystems zur Verfügung stehenden Bauraums wurde zunächst die einfachere Ansteuerung mit zeitabhängiger Kommutierung bevorzugt. Der Läufer wird dabei durch die individuelle Bestromung der einzelnen Spulen angetrieben und positioniert. Für Bereiche, die eine höhere Positioniergenauigkeit erfordern, kann ein geregelter Betrieb vorgesehen werden.

Doch unabhängig von der Betriebsart ist die Realisierung eines solchen Antriebs technisch aufwändig, da für jede

Spule eine eigene Leistungsendstufe benötigt wird. Insbesondere bei den Planarmotoren mit ihren vielen, flächig angeordneten Antriebsspulen ist es deshalb sinnvoll, mittels zu Strängen zusammenschalteter Einzelspulen und spezieller Kommutierungsfunktionen eine Reduzierung der elektronischen Bauelemente und Vereinfachung der Ansteuerung zu bewirken, wie sie in [8] beschrieben wird. Bei entsprechender geometrischer Auslegung und günstiger Einbeziehung des Wickelsinns der Spulen ergeben sich so innovative Lösungen für die Ansteuerung von ein- und mehrachsigen Direktantrieben (**Bild 8**).



Bild 8 6-strängige Spulenverschaltung mit Wickelsinnanpassung für Bewegungen in x- und y-Richtung

5.2 Auslegung und Gestaltung

Sowohl die analytischen Berechnungsmethoden als auch die Simulationsverfahren zur Auslegung des elektrodynamischen Antriebs basieren auf den Maxwell'schen Gleichungen. Da diese in der Literatur ausführlich behandelt werden, soll an dieser Stelle der Einfluss des neuen Gestaltungsansatzes auf die Dimensionierung diskutiert werden. Der passive Läufer führt wegen der einseitigen Magnetanordnung beispielsweise zu einem unsymmetrischen Magnetkreis. Infolgedessen treten hohe Normalkräfte zwischen den bewegten und feststehenden Komponenten auf, die bis zum 15-fachen der Vorschubkräfte betragen können. Es handelt sich hierbei um Grenzflächenkräfte, die mit der Maxwell'schen Zugkraftformel berechnet werden können und von der aerostatischen Führung als Tragkräfte aufzunehmen sind.

Die Vorschubkräfte beruhen auf dem Wirkprinzip der Lorentzkraft, nach dem bewegte Ladungsträger in einem Magnetfeld eine Kraft erfahren. Da sich die felderzeugenden Permanentmagnete relativ zum ortsfesten Stator bewegen, kommt es im statorseitigen Eisenrückschluss zu Ummagnetisierungen und Wirbelstromeffekten, die eine dämpfende Wirkung auf das System haben. Der statorseitige Rückschluss ist außerdem in den feldführenden Bereichen möglichst homogen zu gestalten, d. h. ohne größere Fehlstellen wie Bohrungen oder überstehende Teile, da diese Störungen Reluktanzkräfte zwischen dem Stator und dem Läufer hervorrufen. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die bei konventionellen, mit bewegten Spulen ausgestatteten Antrieben erfolgreich einsetzbaren konstruktiven Abhilfen (z. B. Überhänge und Schrägen am läuferseitigen Rückschluss, Magnetschrägstellung etc.) zu

keinen nennenswerten Verbesserungen beim neuen Aufbau führen. Die einzige Möglichkeit besteht deshalb darin, mit Hilfe einer nahezu geschlossenen Statorrückschlussplatte die Rastkräfte zu minimieren.

Auf Grund des großen, durch die läufer- und statorseitige Führungsdeckplatte bedingten Arbeitsluftspalts des elektromagnetischen Kreises ergeben sich bei der Antriebsauslegung trotz der Verwendung von hochenergetischen Seltenerd magneten nur kleine Vorschubkräfte. Eine Steigerung der Kräfte ließe sich zwar mit dem Einsatz ferromagnetischer Spulenkern erzielen, allerdings verursacht diese Maßnahme, wie bereits dargestellt, zusätzliche Rastkräfte, weshalb auf deren Umsetzung verzichtet wird.

6 Gesamtsystem

Bisher wurden der Antrieb und die Führung getrennt voneinander betrachtet. Da diese Teilsysteme neben dem Bauraum auch mehrere Funktionselemente gemeinsam nutzen, ist bei der Auslegung und Gestaltung sowie beim Betrieb des Gesamtsystems auf deren gegenseitige Beeinflussung zu achten. Dies erfordert einen ganzheitlichen Lösungsansatz mit dem Ziel, ein voll funktionsfähiges Gesamtsystem zu entwickeln. Insbesondere die Gestaltung des Magnetkreises hat dabei so zu erfolgen, dass die resultierenden magnetischen Eigenschaften zugleich den Anforderungen des elektrodynamischen Antriebs, der statorseitigen Druckluftkommutierung und der Vorspannung der aerostatischen Führung genügen. Da die Ergebnisse des einen gleichzeitig die Grundlage für die Berechnung des anderen Teilsystems und umgekehrt darstellen, ist ein iterativer Auslegungs- und Optimierungsprozess zu durchlaufen.

Dabei sind folgende Zielkonflikte zu berücksichtigen:

- Änderungen an den Antriebskomponenten selbst, aber auch die Überlagerung des Permanentmagnetfeldes mit den elektromagnetischen Feldern der positionsabhängig bestromten Spulen bewirken ein zeitlich und örtlich veränderliches Gesamtmagnetfeld, das großen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der Ventilkörper- sowie der Normalkräfte hat. Die dynamischen Schwankungen der Normalkräfte müssen dabei von der Führung aufgenommen und kompensiert werden.
 - Stärkere Führungsdeckplatten auf Seiten des Stators und des Läufers erhöhen die Stabilität der Führungsflächen, bedingen aber gleichzeitig einen größeren Arbeitsluftspalt des elektromagnetischen Kreises, was zu geringeren Vorschub-, Normal- und Ventilkörperkräften führt.
 - Mit ferromagnetischen Spulenkernen, größeren oder über die Statorrückschlussplatte hinaus stehenden Ventilkörpern können zwar die Vorschub- bzw. Ventilkörperkräfte verbessert werden, allerdings verursachen diese Maßnahmen große Rastkräfte.
 - Ebenso führen Druckluftverteilerkanäle und Verschraubungspunkte im Rückschluss zu Störungen des magnetischen Feldverlaufs und somit zu nachteiligen Veränderungen der Kraftverläufe.
- Die prinzipielle Vergrößerung des Auslegungsluftspalts reduziert zwar die Anforderungen an die Form- und Oberflächengenauigkeit der Führungsflächen, allerdings senkt diese Maßnahme gleichzeitig die Steifigkeit und damit das Vermögen der aerostatischen Führung, auf Laständerungen reagieren zu können.
 - Bei Einfügen kleiner Magnetabstände erhöhen sich die Ventilkörper- und Rastkräfte auf Grund des stärker in den Statorrückschluss gedrängten Feldverlaufs. Die Vorschubkräfte nehmen jedoch nur geringfügig zu.

7 Zusammenfassung

Obgleich erste Ergebnisse bereits die Funktionsfähigkeit und das enorme Potenzial dieses neuen Gestaltungsansatzes aufzeigen, müssen noch eine Reihe offener Fragen gelöst werden, um einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Systeme auch unter industriellen Einsatzbedingungen gewährleisten zu können.

Letztlich eröffnen die Vorteile dieser aerostatisch geführten Direktantriebe mit statorseitiger Druckluftversorgung und passivem Läufer aber die Chance, mit innovativen Lösungen neue Anwendungsfelder zu erschließen oder bestehende zu optimieren. Dies gilt insbesondere für die Fein- und Mikrobearbeitung sowie die Medizintechnik, die Pharma- und die Lebensmittelindustrie, wo neben höchster Präzision auch ein kontaminationsfreier Betrieb angesichts steriler oder emissionskritischer Umgebungen zu garantieren ist und die bisher realisierbaren Verfahrenswege nicht mehr ausreichen.

8 Literatur

- [1] Mochel, F.: Aerostatische Führungen in Direktantrieben. In: Festschrift – 40 Jahre IKFF mit Jahresbericht 2007. Universität Stuttgart, IKFF, 2008
- [2] Donat, H.: Aerostatische Führungen und Luftlagerungen. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2006
- [3] Langenbeck, P.: Wirtschaftliche Mikrobearbeitung. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2009
- [4] Unterberger, R.: Vereinfachte Berechnung der Tragfähigkeit von aerostatischen Luft-Lagern und Führungen. In: Feinwerktechnik & Messtechnik 87 (1987), Heft 8, S. 372 - 380
- [5] Loch, E.: Aerostatische Lager - Teil 1 und 2. In: Konstruktion 19 (1967), Heft 3, S.92 - 97 und Heft 4, S. 134 - 139
- [6] Heinzl, J.: Auslegung und Berechnung aerostatischer Lager mit Einzeldüsen und mit flächig verteilten Mikrodüsen. In: Bartz, W. J.: Luftlagerungen. Ehningen: expert-Verlag, 1993
- [7] Gerke, M.: Auslegung von ebenen und zylindrischen Lagern bei stationärem Betrieb. Dissertation, Technische Universität München, 1991
- [8] Clauß, C.; Schinköthe, W.; Welk, C.: Elektrischer Antrieb. Offenlegungsschrift DE 10 2006 042 707 A1, 2008