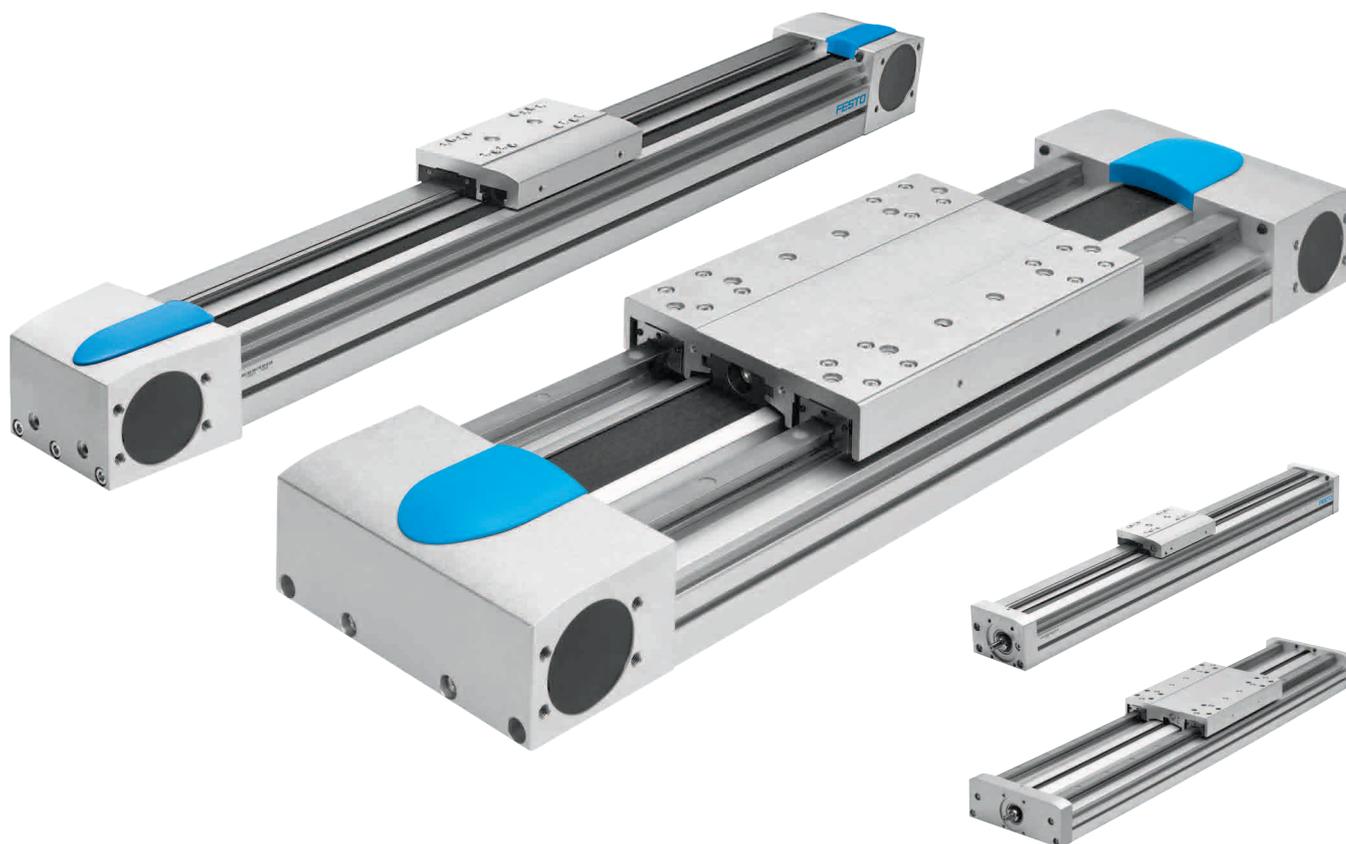
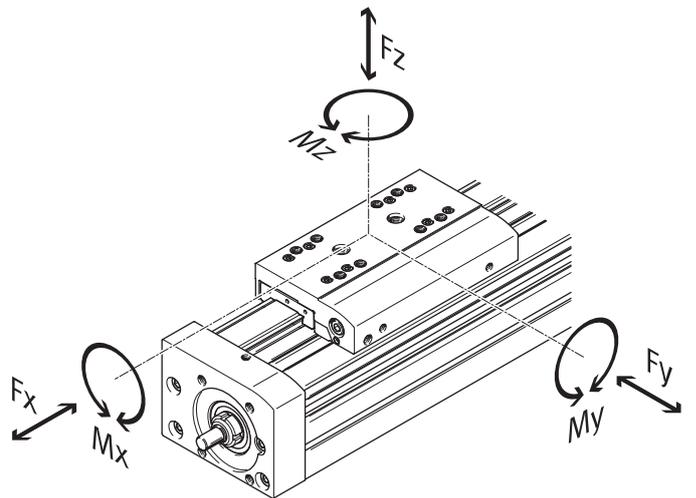


White Paper für Führungs- und Lagertechnologie

Wichtige Überlegungen für Konstrukteure,
die Führungssysteme mit linearen Achsen benötigen.



Bei der Mehrheit elektromechanischer Achsen kommt ein Aluminiumstrangpressprofil in verschiedenen Größen mit nur einer Führungsschiene und Lagereinheit am Schlitten zum Einsatz, die über einen Zahnriemen oder eine Kugelrollspindel von einem Elektromotor angetrieben wird. Im Hinblick auf die Kräfte, die ein solches System genau und zuverlässig führen kann, gibt es jedoch physische Einschränkungen. In dieser Arbeit werden einige alternative Bauweisen betrachtet, die sich für Anwendungen mit größeren Lasten eignen. Weiterhin werden konstruktive Überlegungen berücksichtigt, die bei Festo bei der Entwicklung eines Schwerlast-Doppelführungssystems aufgekommen sind.



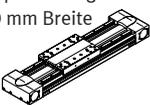
Typ	Max. Vorschubkraft F_x [N]	Max. Geschwindigkeit V [m/s]	Max. Moment M_x [Nm]	Max. Moment M_y [Nm]	Max. Moment M_z [Nm]	Max. Arbeitshub [mm]
Standard-Achse Einzelführung 70 mm Breite 	100	5	16	132	132	5000
Standard-Achse Einzelführung 120 mm Breite 	800	5	144	680	680	8500
Schwerlastachse Doppelführung 220 mm Breite 	1800	5	900	1450	1450	4750

Abb. 4 Tabelle mit typischen Abmessungen und Kräften für verschiedene Ausführungen elektromechanischer Achsen

Einführung

Festo stellt seit 2008 mit großem Erfolg elektromechanische Achsen her [Typ: EGC, Abb. 1]. Diese beinhalten eine Motoranbindung und einen mit einem Schlitten verbundenen Spindel- oder Zahnriemenantrieb, der auf einer Führungsschiene befestigt ist. Diese Elemente sind in einem stark versteiften Aluminiumprofil angebracht, das nach dem Kuppelbogen-Prinzip entworfen wurde [siehe Hinweis auf Seite 4]. Bei dem verwendeten Lagertyp handelt es sich um eine Kugelumlaufkette [EGC-KF], die als beste Wahl betrachtet wird.



Abb. 1 elektromechanische Achse mit einfacher Führungsschiene [EGC]

Auf dem Automatisierungsmarkt gibt eine Vielzahl von Schwerlast-Anwendungen, bei denen eine Einzelachse mit ausreichender Führung als zu groß und zu teuer angesehen werden würde. Daher bestand die Anforderung darin, eine kostengünstige, dynamische und leicht zu installierende Führungseinheit für hohe Lasten zu entwickeln. Diese Achsen kommen häufig als y-Achsen für die horizontale Bewegung in einem mehrachsigen Handlingsystem zum Einsatz [siehe Abb. 2].

Viele Konstrukteure erreichen die Schwerlastfähigkeit durch den Einsatz von zwei parallel installierten elektromechanischen Führungseinheiten. Je größer der Abstand zwischen den beiden Lagereinheiten ist, desto größer ist die Widerstandsfähigkeit des Systems für größere Drehmomente. Diese Lösung bietet Konstrukteuren zwar eine größere Flexibilität, sie ist allerdings doppelt so teuer und erschwert die Einschätzung der Lebensdauer des Systems deutlich. Der Konstrukteur ist für die Definition des optimalen Leistungslayouts sowie auch für die zusätzlichen Kosten verantwortlich, die für die Ausrichtung der



Abb. 2 mehrachsiges Y-Z-Handlingsystem mit zwei Achsen mit Einföhrung in Y-Richtung

Komponenten auf einem sehr starren Maschinengestell, für die Herstellung spezieller Verbindungsplatten, Antriebswellen etc. anfallen. Die ausgewählte Führungseinheit muss die Übertragung von Lasten in alle erforderlichen Richtungen zulassen und die notwendige Gesamtlebensdauer des Systems ohne oder mit vordefinierter Wartung bieten. Zwei separate elektromechanische Achsen können mithilfe von modularen Bausätzen verbunden werden, allerdings kann die daraus entstehende Leistung, Genauigkeit und Lebensdauer nur schwer ermittelt werden.

Festo hat die Gelegenheit erkannt und bietet Maschinenbauern nun eine kombinierte Einzelachslösung mit einem einzigen, breiteren Profil und zwei Führungsschienen, die sich für Schwerlastanwendungen eignet [Typ EGC „Schwerlast“ oder kurz: EGC-HD Abb. 3]. Diese Aufgabe schien zwar einfach zu sein, allerdings erwies sich die Entwicklung einer solchen Lösung in der Realität als größere Herausforderung und brachte den Konstrukteuren einige nützliche Erkenntnisse.

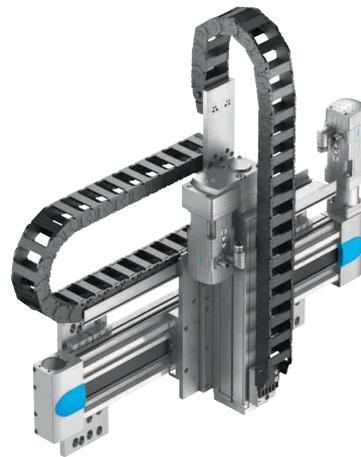


Abb. 3 mehrachsiges Y-Z-Handlingsystem mit einer integrierten Doppelföhrungsachse EGC-HD

In den ersten Entwürfen wurde ein Konzept gefordert, das auf demselben sehr starren und kuppelförmigen Aluminiumprofil, zwei möglichst weit voneinander entfernten, akkurat und starr befestigten Führungsschienen und den inzwischen bewährten Kugelumlaufkassetten beruht. Der Prozess erstreckte sich auf mehr als zwei Jahre, in denen verschiedene Lagersysteme verschiedener Hersteller getestet wurden.

Ausführung des Auflageprofils

Um die Lebensdauer des Lagers in der Doppelführungsachse zu gewährleisten, wurden die Toleranzen für die Kontaktflächen zwischen Profil und der linearen Führungsschiene genau definiert. Dabei wurde festgestellt, dass das Aluminium-Auflageprofil selbst extrem stabil, starr und präzise gefertigt werden muss, damit ein Hochleistungs-Führungssystem hergestellt werden kann. Um eine lange Lebensdauer des gesamten Handlingsystems zu gewährleisten, muss die einzelne Achse bis zu einer Länge von 9 Metern verfügbar sein sowie eine Parallelität von $\pm 0,05$ mm und eine Toleranz der Ebenheit von maximal 0,2 mm aufweisen.

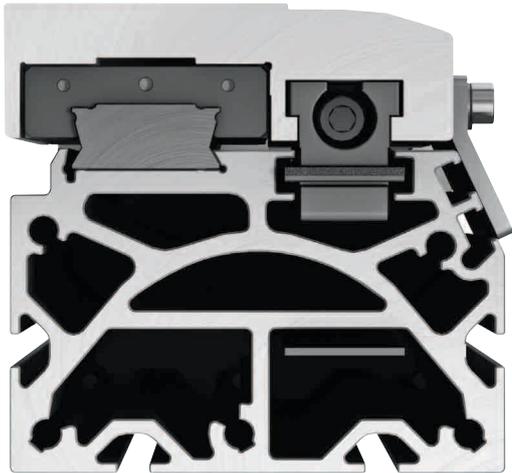


Abb. 5 Querschnitt einer elektromechanischen Achse mit **einfacher** Führung und Zahnriemenantrieb (inneres Bogenprofil mittig erkennbar)

Im Rahmen einer intensiven Zusammenarbeit mit verschiedenen Extrusionsunternehmen wurde erneut festgestellt, dass durch Anwendung des Innenbogenprinzips ein Profil hergestellt werden kann, das die notwendigen Steifigkeitsanforderungen der Achse erfüllt. Allerdings konnte die erforderliche flache Befestigungsfläche für das Lager nicht hergestellt werden. Stattdessen musste eine spezielle Werkzeugmaschine entwickelt werden, die die Oberfläche nach dem Extrudieren am Berührungspunkt mit der Führungsschiene abrät – bei

einer Profillänge von standardmäßig 5,5 m oder in längeren Sonderausfertigungen bei 9 m. Untersuchungen haben ergeben, dass mit diesen Profilgrößen die Mehrheit der Kundenanwendungen abgedeckt werden kann. Obwohl die zusätzliche Bearbeitung zum Anstieg der gesamten Produktionskosten führt, stellt die zehnfache Verbesserung der Genauigkeit einen entscheidenden Vorteil dar. Die Entwicklung einer solchen Maschine stellte eine große Herausforderung dar, da die Profile ein Gewicht von bis zu 125 kg haben können. Daher wurde auch an dieser Stelle eine spezielle Entwicklung erforderlich, die die Anforderungen dieses Produktes erfüllen kann.

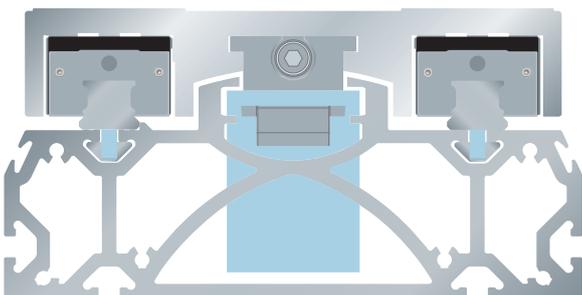


Abb. 6 Querschnitt einer elektromechanischen Achse mit **doppelter** Führung und Zahnriemenantrieb (inneres Bogenprofil mittig erkennbar)

Kuppelbogen – Verwendung in der Architektur und jetzt auch für elektromechanische Achsen

Hersteller mechanischer Achsen setzen häufig qualitativ hochwertige Schienen ein, verbinden diese dann aber mit einem Profil, das keine besonders hohe Steifigkeit aufweist, was dazu führt, dass sich die gesamte Struktur verbiegt. Dies ist vergleichbar mit einem leistungsstarken Fahrzeugmotor, der auf einem flexiblen Chassis angebracht wird, das sich in Kurvenfahrten verbiegt, wodurch die Gesamtleistung des Fahrzeugs gemindert wird.

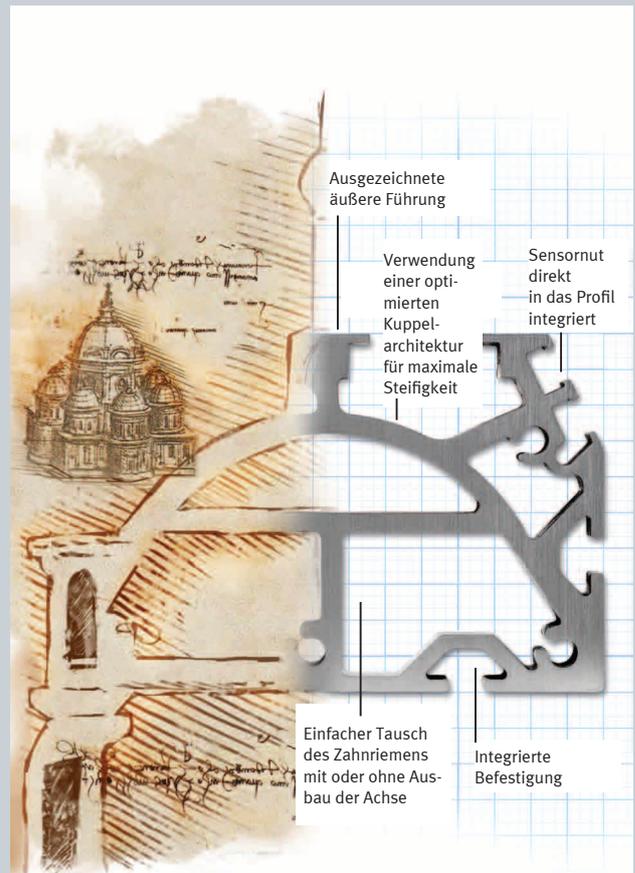


Abb. 7 Darstellung der Entwicklung und Anwendung eines sehr starken und starren Kuppelbogens

Für die ursprüngliche Standardachse mit einer Führung und bei der Entwicklung des Handlingsystems mit Duo-Achse wurde an einem sehr steifen Profil gearbeitet, das auf dem Kuppelbogenprinzip basiert, welches wiederum erstmalig von Leonardo Da Vinci entwickelt wurde. Auf diesem außerordentlich starren Profil konnte eine Führung angebracht werden, ohne dass bei Belastung eine Durchbiegung festgestellt wurde. Die Achsen selber stellen in einem Handlingsystem das elementare Grundelement des Systems dar. Anstatt eine mechanische Achse auf einem anderen mechanischen Bauelement des Systems zu befestigen, wird die mechanische Achse mit innerem Bogenprofil selbst zu einem Bauelement, was zu erheblichen Einsparungen bei Gewicht, Montagezeit und damit verbundenen Kosten führt.

Erste Testphase

Aufbauend auf den Erfahrungen mit der Linearführung, die für die Standard EGC-Achse verwendet wurde, bezog sich der nächste Schritt auf Haltbarkeitsprüfungen. Es wurden Muster an ein Labor für Dauerversuche gesendet, die dort mit der vorgegebenen maximalen Vorschubkraft der Muster belastet wurden. Für diese ersten Tests wurden drei Muster für jede Größe mit einer Zielhaltbarkeit von mindestens 5 Millionen Zyklen betrachtet, was ungefähr 5.000 km entspricht. Allerdings kam es entgegen aller Erwartungen nach einem Testlauf von nur 500 km bereits zu ersten Schäden an den Achsen. Die Kugeln traten an der Lagerkassette aus dem Gehäuse aus.



Abb. 8 Einsatz eines Elektronenmikroskops für die genaue Analyse beschädigter Lager

Die Untersuchungen des Teams konzentrierten sich zunächst auf die lineare Führung selbst. Es wurde beschlossen, den Test zu wiederholen, und zwar mit denselben linearen Führungen aus einem anderen Produktionsdurchlauf. Ein neuer Haltbarkeitstest wurde aufgenommen und auch hier wurden nach sehr kurzer Zeit die gleichen schlechten Ergebnisse beobachtet.

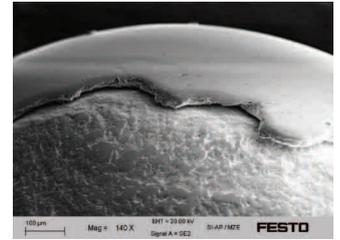
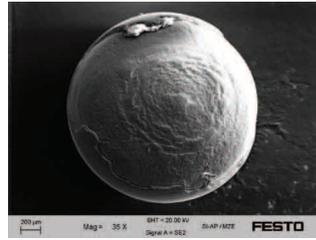


Abb. 9 und 10 mit dem Elektronenmikroskop aufgenommene Bilder beschädigter Kugellager, auf denen eine Ablösung der äußeren gehärteten Schicht zu erkennen ist – mit 20- und 35-facher Vergrößerung

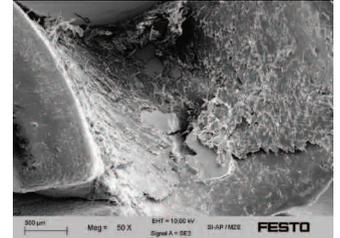
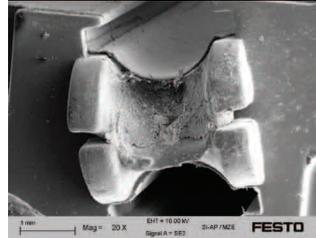


Abb. 11 und 12 mit dem Elektronenmikroskop aufgenommene Bilder einer beschädigten Kugelumlaufkassette – mit 20- und 35-facher Vergrößerung

Jetzt konzentrierten sich die Untersuchungen auf das Lagersystem. Es war bekannt, dass in einem Doppelführungssystem beide Achsen niemals vollständig parallel verlaufen, dass immer eine gewisse Fluchtungstoleranz auftritt. In herkömmlichen Systemen mit zwei separaten, aber ausgerichteten elektromechanischen Achsen gleicht die Verbindungsplatte, die beide Achsen verbindet, einen Teil des Fluchtungsfehlers durch eine teilweise Deformation aus. Das Problem mit dem neuen Profilsystem mit innerem Bogenprofil bestand darin, dass hier nahezu keine Nachgiebigkeit auftrat. Die Struktur war zu steif und die Lager beeinträchtigten einander, was zu einem frühzeitigen Verschleiß und zu Ausfällen führte. Daraus wurde abgeleitet, dass es sich hierbei um die Ursache der früheren schlechten Testergebnisse handelte.

Lagersystem

In der Entwicklungsphase lag das Hauptaugenmerk auf der Steifigkeit des Lagersystems. In ersten Versuchen wurde das bewährte Kugellagerelement aus dem bestehenden Einzelführungssystem der Standard EGC verwendet. Wie bereits angemerkt, kam es hier jedoch bereits nach 500 km zu ersten Ausfällen, sondern auch in Wiederholungstests.

Die ursprünglich ausgewählte lineare Führung entsprach der bewährten Bauweise, die in Achsen mit einfacher Führung zur Anwendung kommt, einer leistungsstarken Lösung mit hervorragender Steifigkeit. In diesem Fall waren die Kugeln und die Führung im Lager jedoch nicht für eine Durchbiegung ausgelegt und konnten daher die Fluchtungsfehler im Doppelführungssystem nicht aufnehmen. Somit kam es zum Ausfall.

Eine Vielzahl verschiedener Kugellager sind im Markt verfügbar und die Lagerhersteller können viele verschiedene Variablen, zur Optimierung ihrer Lösungen, anpassen. Dazu gehören die Anzahl und die Größe der sich berührenden Kugeln, die Berührungswinkel und wie die Kugeln eingefasst werden.

Jeder Hersteller von Lagern fertigt verschiedene Lagerformen. Ein Lager mit O-Anordnung und Kugellager von einem Hersteller muss nicht zwangsläufig dieselben Eigenschaften und Leistungsmerkmale wie ein ähnliches Lager eines anderen Herstellers aufweisen. Dies kann auf Unterschiede in der Ausführung zurückgeführt werden, d. h. die Lager sind ggf. größer oder breiter oder die Größe der Kugeln kann abweichen. Kurzum: Die verschiedenen Kombinationen von Lagersystemen auf dem Markt sind sehr verschieden, und die Auswahl eines optimalen Systems kann sich als sehr komplexe Aufgabe gestalten. Daher ist eine gute Zusammenarbeit mit einem Lagerhersteller während der Entwicklung von großer Bedeutung.

Für die Schwerlastachse EGC-HD wurde schließlich ein alternatives lineares Führungslagersystem in Betracht gezogen, in dem Lager mit größeren Kugeln eingesetzt wurden.

Kleinere Kugeln verfügen über mehr Kontaktpunkte für die Aufnahme der Last und bieten eine gute Steifigkeit.

Kommen größere Kugeln zum Einsatz, finden weniger Kugeln in der Lagerkassette Platz. Dementsprechend gibt es weniger Kontaktpunkte. Bei größeren Kugeln kann es jedoch zu einer leichten Kompression der Kugel kommen, wodurch sich geringe aber wichtige Fluchtungsfehler ausgleichen lassen. Stellen Sie sich einen Fußball vor, der mit einem Druck von 1 bar gefüllt wird. Dieser lässt sich leichter eindrücken oder verbiegen als ein Tennisball mit demselben Druck. Es wurde daher festgelegt, dass größere Kugeln eine geringe Verbiegung erlauben und sich aus technischer Sicht besser für dieses System mit einer hohen inhärenten Steifigkeit eignen, wobei Toleranzen immer noch berücksichtigt werden müssen.

An diesem Doppelführungssystem treten schwere Lasten auf, daher ist die Größe der Kugeln von hoher Bedeutung und muss mit großer Sorgfalt bestimmt werden. Das Führungsprofil ist sehr steif, d. h. es tritt nur eine sehr geringe Durchbiegung auf. Die gesamte Bewegung muss von den Kugeln selbst aufgenommen werden. Die für das Doppelführungssystem ausgewählten Kugeln waren also leicht größer als die Kugeln in der Achse mit einfacher Führung. Es wurden verschiedene Lagersysteme verschiedener Hersteller bewertet. Die Konstrukteure entscheiden sich natürlich zuerst für eine bewährte Lösung, die seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz ist. In diesem Fall hat sich jedoch gezeigt, dass das Rad manchmal eben doch neu erfunden werden muss, wenn man die richtige Lösung sucht. Was in einer Konfiguration gut funktioniert, kann nicht einfach in eine andere Lösung kopiert werden.

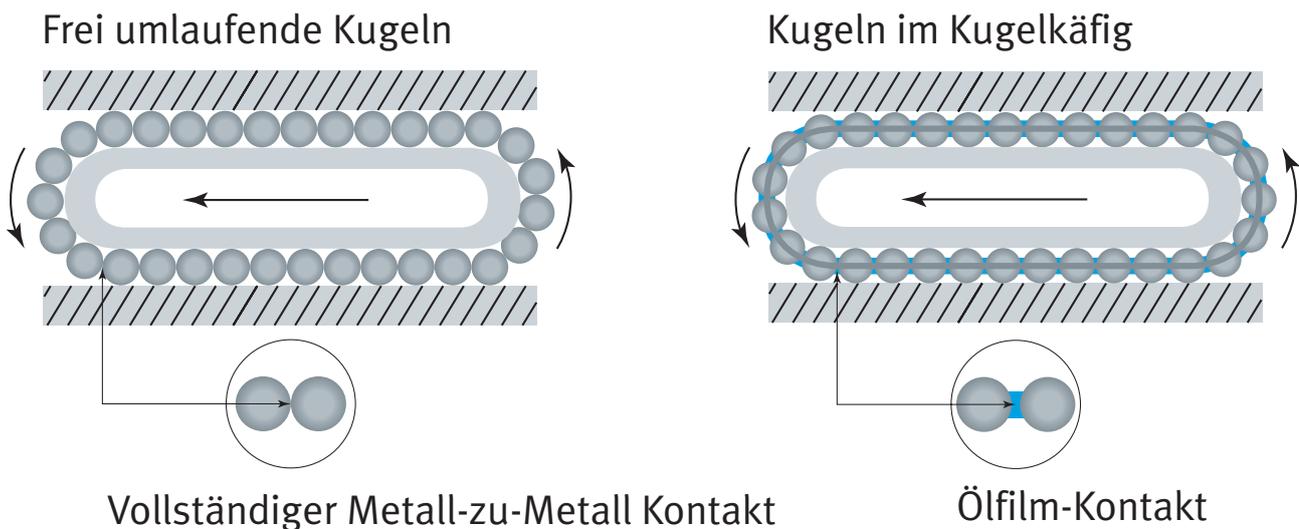


Abb. 13 Darstellung des Unterschieds zwischen Lagersystemen ohne Kugelkäfig und mit Kugellager

Grundlegende Unterschiede zwischen der X- und O-Anordnung

Die Ausrichtung der Kugeln im Lagergehäuse hat einen großen Einfluss auf die Durchbiegungsbeständigkeit der Linearführung. Hierfür gibt es zwei Ausführungsformen: die gegenüberliegende (X) and fortlaufende (O) Anordnung.

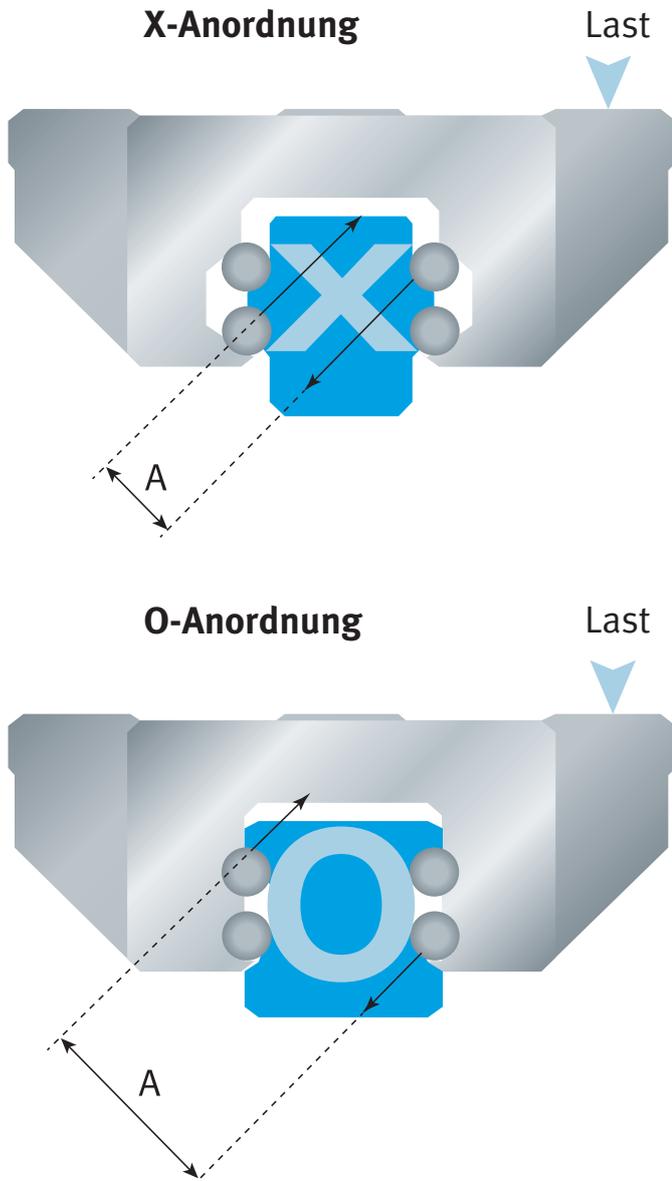


Abb. 14 Darstellung des Unterschieds zwischen X- und O-Anordnungen

In der X-Anordnung (siehe Abb.14, oben) berühren die Kugeln die Schiene auf der Innenseite, wodurch ein X-Muster innerhalb der Schiene entsteht. Diese geringen Berührungsflächen zwischen den Mittelachsen der Kugeln sorgen für die Steifigkeit der Führung. Die Schiene kann dadurch nur schwer Momente, Biegungen oder Lasten aufnehmen.

In der O-Anordnung (siehe Zeichnung in Abb. 14, unten) sind die Kugeln nach außen ausgerichtet, wodurch die Berührungsfläche zwischen den Kugeln deutlich größer wird. Dies bietet eine erheblich größere Widerstandsfähigkeit gegenüber momentbasierten Kräften als in der X-Anordnung, wodurch die Linearführung der Einzelachse eine bessere Steifigkeit erhält. Die insgesamt breitere O-Anordnung sorgt also für eine gleichmäßigere Verteilung der Kräfte im Führungssystem. In der ursprünglich verwendeten Linearführung der Einzelachse mussten keine inhärenten Momentlasten aufgenommen werden. Daher stellt die X-Anordnung eine deutliche bessere Lösung dar. In den Doppelführungsachsen sind diese Kräfte jedoch in der Testphase aufgetreten. Bei der X-Anordnung kam es zu einer Verstärkung der Kontaktspannungen in der Führungsschiene und in den Lagerblöcken, was eine Ausfallursache darstellt.

Die meisten Ingenieure gehen davon aus, dass Kugelketten freien Kugelführungen überlegen sind, allerdings wurde diese Ansicht in Frage gestellt, wenn es um die Bewältigung sehr hoher Lasten geht. Der meiste Raum innerhalb einer Kugelkettenkassette wird von dem Käfig selbst aufgebraucht, wodurch der verfügbare Raum für die Kugeln reduziert wird. Kugelführungen mit freien Kugeln bieten mehr Platz für die Kugeln und damit eine größere Kontaktfläche der Kugeln als in Ausführungen mit Kugelkette (siehe Abb. 13). Diese größere Lastaufnahmefähigkeit ist somit ideal für Schwerlastanwendungen geeignet. Wenn Lager mit freien Kugeln zum Einsatz kommen, ist die maximal zulässige Geschwindigkeit des Systems geringer, als die, die mit Kugelketten erzielt werden könnte. Bei einer Achse, die 1.000 kg tragen kann, steht aber nicht die Geschwindigkeit an erster Stelle!

Es wurde festgestellt, dass die Anordnung der vier Kugelketten auf der linearen Führung ein wichtiger Faktor war. Die in der ursprünglichen Achsvariante mit Einzelführung verwendete X-Anordnung hat sich in der Testphase als zu steif für die Doppelführung erwiesen. Es wurde stattdessen eine O-Anordnung eingesetzt. Die Auswahl einer Konfiguration ohne Käfig hat den Einsatz größerer Kugeln teilweise wettgemacht, da mehr Kugeln (größere Kontaktfläche) in der gleichen Kassettengröße zum Einsatz kommen konnten.

Abschluss tests

Nachdem der Entwurf abgeschlossen und das neue Lagersystem integriert wurde, wurden die Haltbarkeitstests über einen Zeitraum von 6 Monaten aufgenommen. In diesem Fall gab es keine Ausfälle. Nach 5.000 km wurden noch keine Anzeichen für Verschleiß festgestellt, daher wurden die Tests ausgedehnt. Auch nach 10.000 km traten keine Probleme auf.

Es wird geschätzt, dass die durchschnittliche Nutzungsdauer einer Achse dieses Typs in einer Maschine bei ca. 3.600 km liegt. Daher konnten die Anforderungen hinsichtlich der Betriebssicherheit durch die neue Bauform leicht erfüllt werden.

Laufleistung [km]

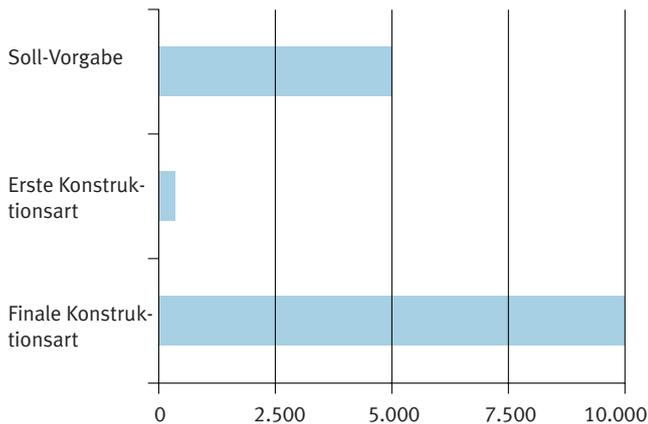


Abb. 15: Ergebnisdarstellung der Lebensdauer tests

Schlussfolgerungen

In hoch präzisen Anwendungen sind zwar extrem starre und genaue Profile (Rahmen) erforderlich, allerdings muss auch eine mangelnde Nachgiebigkeit sorgfältig berücksichtigt werden.

Einfache lineare Führungssysteme können genau ausgelegt und ihre Leistung kann vorausgesagt werden. Führungssysteme können sich aber auch schnell als kompliziert erweisen und bestehende Computermodelle können weder alle Variablen berücksichtigen noch die Nutzungsdauer genau vorhersagen.

Es ist nicht möglich, einfach nur das „beste“ Lager auszuwählen: Ob mit Kugellager oder ohne, mit X- oder O-Anordnung, passende Kugelgrößen etc. – all dies muss definiert und auf die Anwendung abgestimmt werden.

Ingenieure sollten die Art des Führungssystems betrachten, die in ihrem Gesamtsystem zur Anwendung kommt. Dies gilt vor allem für Systeme, die große Lasten tragen und typischerweise mit einer starren Struktur verbunden sind.

Fazit

Für Konstrukteure einmalig verwendeter Maschinenlösungen oder für Sondermaschinenbauer ist es nicht praktikabel, die Vielzahl der Optionen derart umfangreich zu bewerten [Zeit oder Kosten]. Es besteht das Risiko eines überhöhten Konstruktionsaufwands für die Entwicklung der Lösung oder eines vorzeitigen Ausfalls der Maschine.

Autor:

Nigel Dawson
Produktmanagement
Festo Grossbritannien

Jörg Tertünte
Marketing Electric Automation
Festo Deutschland

Ihr lokaler Ansprechpartner: Festo AG & Co. KG

Postfach
73726 Esslingen
Ruiter Straße 82
73734 Esslingen
Tel. +49 (0)711 347 0
Fax +49 (0)711 347 26 28
E-mail: info_de@festo.com