

---

# Gelenkloser Hexapod – Kurzinformation

---

Ingenieurgesellschaft **igH**

Essen

Oktober 2007

Dieser Text<sup>1</sup> ist durch die **IGH** GmbH erstellt worden. Der Text ist zum internen Gebrauch bestimmt, die Ausführungen sind urheberrechtlich geschützt.

Ingenieurgesellschaft IGH GmbH  
Heinz-Bäcker-Str. 34  
D-45356 Essen  
Tel.: +49-201-36014-0  
Fax.: +49-201-36014-14  
E-mail: igh@igh-essen.com

---

<sup>1</sup>hex-info

# 1 Der gelenklose Hexapod – Einleitung

Ein Hexapod besteht aus einer Arbeitsplattform, die mit Hilfe von sechs Aktuatoren in allen sechs räumlichen Freiheitsgraden bewegt werden kann. Diese Aktuatoren werden je nach Anwendungsbereich hydraulisch, pneumatisch oder elektrisch betrieben.

Hexapoden kommen in unterschiedlichsten Anwendungen zum Einsatz. Sie werden z.B. in Flugsimulatoren, 5-Achsen-Bearbeitungsmaschinen, zur Ausrichtung von Weltraumteleskopen oder als Prüfmaschinen verwendet. Im Bereich der Feinstmechanik und Mikropositionierung werden zum Beispiel zur schwingungsfreien Lagerung von Bauelementen Piezo- und Elektromagnet-Aktuatoren verwendet (Abb. 1).

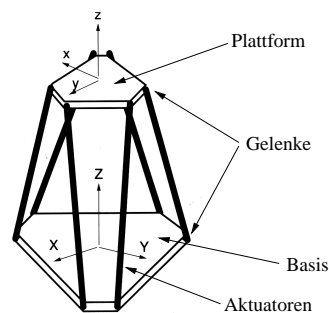


Abbildung 1: Schema eines Hexapoden

Für einen sehr kleinen Verfahrweg und eine sehr genaue Positionierung wurde von der IgH ein durch Elektromagnete angetriebener gelenkloser Hexapod entwickelt (Abb. 2). Die Arbeitsplattform kann mit Hilfe von sechs doppelwirkenden Elektromagnet-Aktuatoren in allen Freiheitsgraden des Raumes bewegt werden. Die Position der Elektromagnet-Anker wird mit Wirbelstrom-Abstandssensoren gemessen.

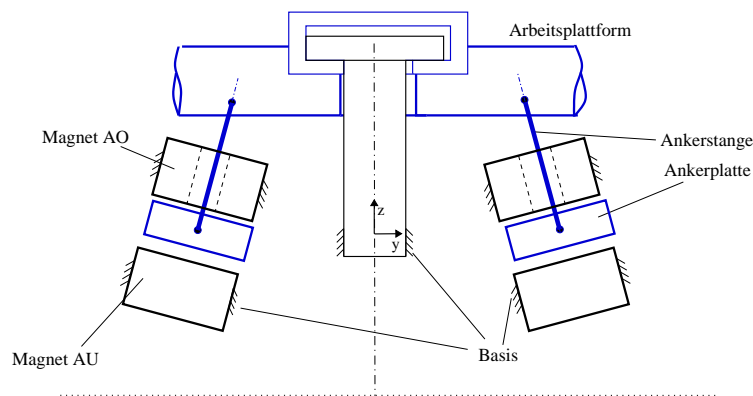


Abbildung 2: Messplattform des gelenklosen Hexapoden

Die folgenden Vorteile ergeben sich aus diesem Aufbau:

- einfacher mechanischer Aufbau, keine für die Messung relevanten beweglichen Bauteile;
- sehr genaue Messung der Lage im Raum bei kleinen Verfahrwegen (ca. 1 mm; Abweichung der Sensoren  $< 2\mu\text{m}$ );
- genaue Messung der Kräfte über die Spulenströme;

Bei dem Aufbau werden die Anker der Aktuatoren fest mit der Arbeitsplattform verbunden. Da somit keine mechanischen Gelenke existieren, kommen auch keine beweglichen und somit spielbehafteten Verbindungen am Aufbau vor.

Die benötigten Aktuatoren unterscheiden sich in einigen Punkten von herkömmlichen Magnetlagern. Ein herkömmliches Magnetlager hat die Aufgabe einen Körper, beispielsweise einen Rotor, eine Magnetschwebbahn oder irgendetwas anderes, berührungslos in einer bestimmten Lage zu positionieren. Dazu wird die nichtlineare Kraft-Weg-Kennlinie genau für den in dieser Lage bekannten Luftspalt linearisiert. Das Magnetlager vermag den zu tragenden Körper in dieser Lage zu halten und kann die aus einer Störkraft resultierende Auslenkung ausregeln. Aufgrund der starken Nichtlinearität der Kraft-Weg-Kennlinie weichen die auf den Arbeitspunkt abgestimmten Regelparameter sehr schnell vom Optimum ab. Der Bereich, in dem ein Magnetlager zufriedenstellend arbeitet, ist mit wenigen Zehntel Millimetern sehr klein.

Für den Antrieb des Hexapoden werden Aktuatoren benötigt, die über folgende Eigenschaften verfügen:

- Arbeitsbereich-Hub:  $\pm 1,5$  mm
- Arbeitsbereich-Kraft: 100 – 300 N
- Positioniergenauigkeit: 1  $\mu\text{m}$
- radiale Bewegungsfreiheit von circa 3 – 4 mm

Da elektromagnetische Aktuatoren mit diesen speziellen Eigenschaften nicht im Handel erhältlich sind, sind die Aktuatoren eine Eigenentwicklung.

## 2 Der elektromagnetische Aktuator

Es wurde ein Aktuator entwickelt, der den o.g. Anforderungen genügt. Bei diesem handelt es sich vom Aufbau her um ein einfaches Axialmagnetlager, welches durch eine spezielle Regelung in einem erweiterten Arbeitsbereich lagegeregelt werden kann. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Aktuators. Zwei Elektromagnete werden einander gegenübergestellt und bilden je einen offenen elektromagnetischen Kreis, der durch die Ankerplatte geschlossen wird. An den beiden Luftspalten treten sehr hohe magnetische Widerstände auf. Das magnetische System ist bestrebt, den magnetischen Widerstand zu minimieren, indem die auftretende Reluktanzkraft zwischen Magnet und Anker den Luftspalt zu schließen versucht. Daraus entsteht die Reluktanzkraft. Diese ist bestrebt, die Luftspalte und damit den magnetischen Widerstand zu minimieren. Über den Wegsensor wird die Position der Ankerplatte gemessen und an die Regelung weitergegeben. Diese erhält damit Informationen über die Größe des unteren Luftspaltes und berechnet den Oberen selbstständig. Durch eine Lageregelung werden die Elektromagneten so angesteuert, dass die Ankerplatte in der gewünschten Position gehalten wird.

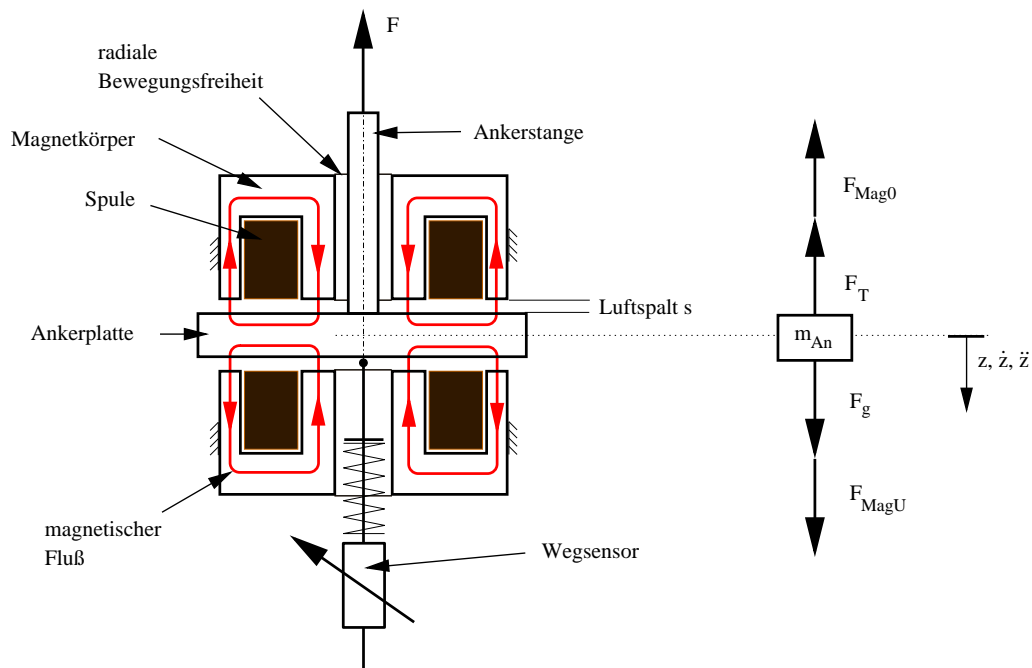


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Aktuators

### 2.1 Sensorik

Für die Lageregelung der Aktuatoren werden Wegsensoren benötigt. Um den Anforderungen an die Genauigkeit zu genügen, werden Sensoren benötigt, die mit einer Auflösung von  $1 \mu\text{m}$  arbeiten. Weiterhin muss das dynamische Verhalten der Sensoren schnell genug sein, um den Kontakt zu der Ankerplatte während der Bewegung aufrecht erhalten zu können. Versuche mit induktiven Abstandssensoren auf Basis

des Wirbelstromprinzips haben gezeigt, dass diese optimal für diese Aufgabe geeignet sind. Sie arbeiten hochpräzise und berührungslos und sind somit verschleißfrei. Allerdings ist zu beachten, dass die Sensoren kernlos ausgeführt sind, da das Ausgangssignal sonst durch das Magnetfeld der Aktuatoren beeinflusst wird.

## 2.2 Regelung

Für eine gute Regelbarkeit müssen alle zwölf Elektromagnete separat angesteuert werden. Hierfür wird je Magnet eine taktende Leistungsendstufe mit PWM-Vollbrücke eingesetzt. Die Rückführung der Ankerposition wird über Wirbelstromsensoren realisiert. Diese ermöglichen eine robuste und störungsempfindliche Abstandsmessung im Millimeterbereich bei einer Auflösung von wenigen  $\mu\text{m}$ .

In Abbildung 4 sind die einzelnen Komponenten des Regelkreises dargestellt. Zur Regelung wird ein echtzeitfähiger Linux MSR PC<sup>2</sup> eingesetzt. Als Schnittstelle zwischen PC und Leistungselektronik dient das Feldbussystem EtherCAT<sup>®</sup><sup>3</sup> der Firma Beckhoff. Dieses besteht aus einem Baukasten verschiedener IO-Klemmen, die über eine Ethernet Schnittstelle mit dem Linux PC verbunden sind. Analog Output Klemmen steuern über eine Gleichspannung die Leistungsverstärker an, diese regeln den Ausgangsstrom zur Bestromung der Elektromagnete.

Zwischen Elektromagneten und Ankerscheibe entstehen gegeneinander wirkende Kräfte. Befinden sich diese Kräfte nicht im Gleichgewicht, so reagiert die Ankerscheibe mit einer Bewegung in Richtung der größeren Kraft. Diese Bewegung wird von einem Wegsensor in ein Spannungssignal umgewandelt, und dieses mit Hilfe einer Analog Input Klemme des EtherCAT Systems dem MSR PC zugeführt. Der MSR PC regelt die Stellgrößen des Leistungsverstärkers so, dass die Ursprungslage der Arbeitsplattform wieder erreicht wird.

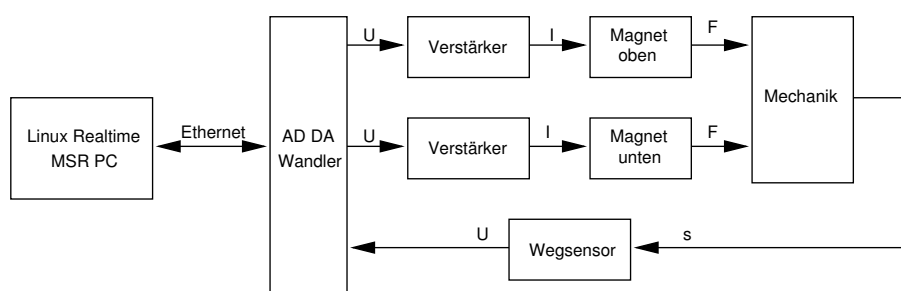


Abbildung 4: Blockschaltbild des Regelkreises

Zur Regelung des Aktuators wird eine kombinierte Kraft-/Lageregelung eingesetzt. Dieser Regelung untergeordnet erfolgt im Leistungsverstärker die Stromregelung des Magnetstromes. Die Stromregelung ermöglicht eine Übererregung der Magnete, sofern die Spannungsversorgung des Leistungsverstärkers über der Nennspannung der Magnete liegt.

<sup>2</sup>Linux Mess Steuer Regel PC

<sup>3</sup>EtherCAT ist ein eingetragenes Warenzeichen

Das Steuer- und Regelprogramm, welches auf dem PC abläuft wird mit Hilfe der EtherLab®<sup>4</sup> Technik erstellt. Dazu wird ein Modell des Reglers in Simulink aufgebaut. Die EtherLab Technik enthält ein Simulink Blockset, in dem Blöcke zur Einbindung der EtherCAT Klemmen vorhanden sind. Nach der Erstellung des Modells, lässt sich daraus das Steuer- und Regelprogramm kompilieren.

---

<sup>4</sup>EtherLab ist ein eingetragenes Warenzeichen

### 3 Konstruktion

Das 3D-CAD-Modell des Prototypen ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Abbildung 6 zeigt den fertig montierten Hexapoden bei der Inbetriebnahme.

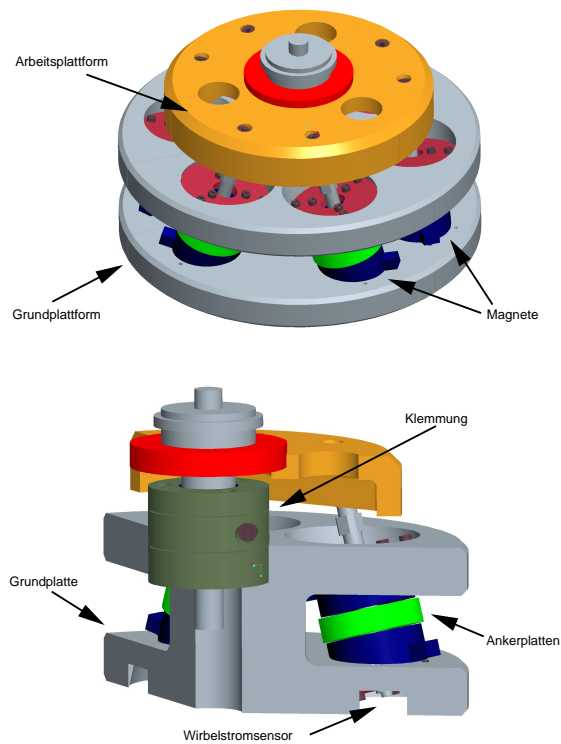


Abbildung 5: Prototyp des Hexapoden (Schema)

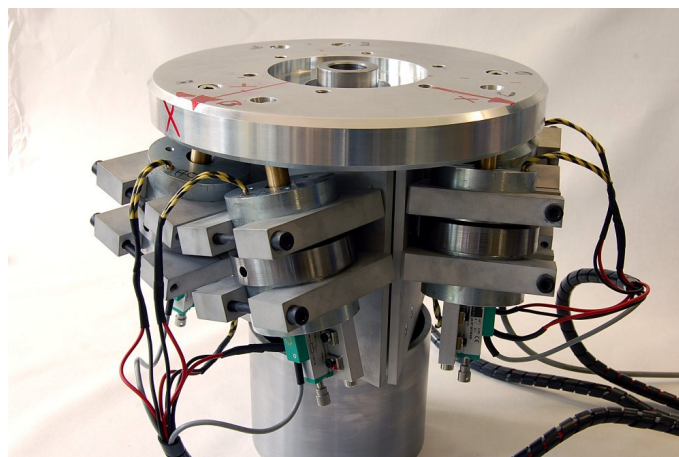


Abbildung 6: Prototyp des Hexapoden