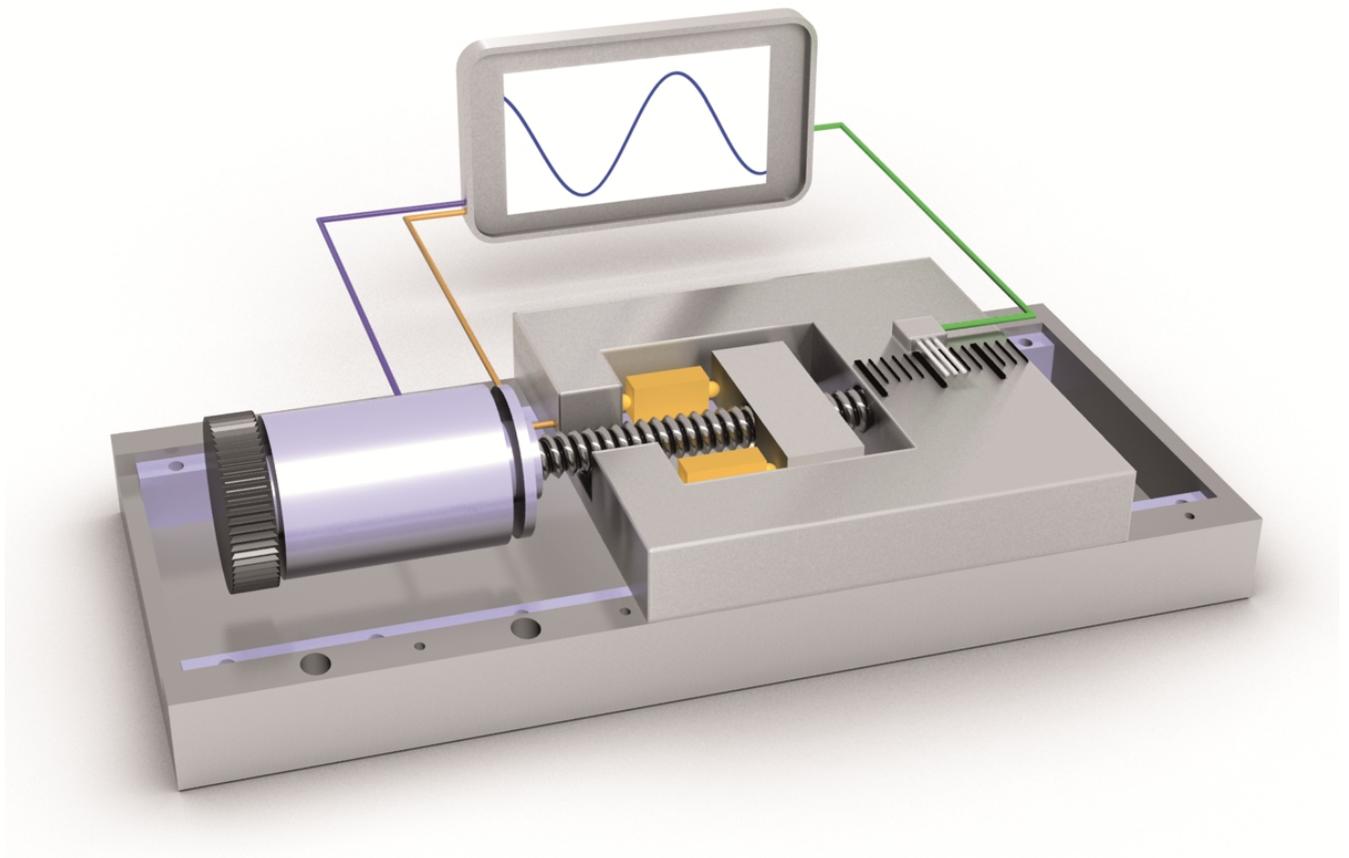


Hybride Nanopositioniersysteme mit Piezoaktoren

Große Verfahrswege, hohe Lasten und genaue Positionierung



1 Einleitung

Hybride Antriebe vereinen zwei verschiedene Antriebskonzepte zu einem leistungsstarken und präzisen Positioniersystem. Sie nutzen dabei die Vorzüge beider Einzelantriebe. Solche Lösungen sind immer dann gefragt, wenn ein Antrieb alleine nicht in der Lage ist, alle Anwendungsanforderungen zu erfüllen. Ein Beispiel dafür ist die präzise, nanometergenaue Positionierung hoher Lasten über lange Stellwege. Nanopositioniersysteme, die Piezoantriebe mit klassischen Spindelantrieben kombinieren, bieten hierfür einen praxisgerechten Lösungsansatz, doch auch andere Antriebskonzepte bieten sich an.

Die Anwendungsbereiche für hybride Antriebe reichen von der Halbleiterfertigung über Qualitätssicherung und optische Inspektion bis hin zur Biotechnologie.

2 Hybridkonzept aus Elektromotor mit VoiceCoil

Für hybride Positioniersysteme wurden schon unterschiedliche Konzepte entwickelt und umgesetzt. Eine Lösung ist beispielsweise die Kombination von Linearmotoren und Voice-Coil-Aktoren (s. Abb. 1).

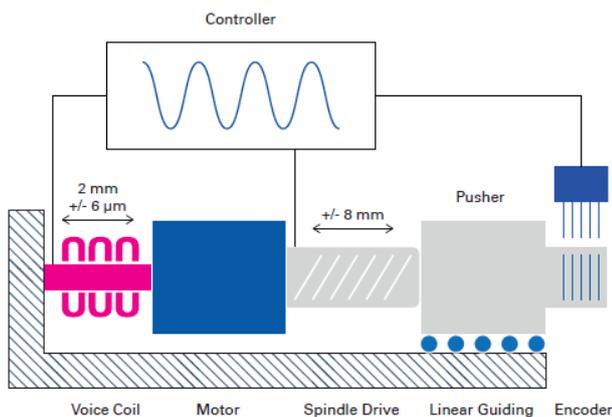


Abb. 1 Hybridkonzept aus Elektromotor mit Voice-Coil-Aktor (Bild: PI)

Linearmotoren bieten große Hublängen mit hoher Positionier- und Wiederholgenauigkeit, bringen allerdings den Nachteil einer hohen Reibung in den Linearführungen mit, die zur Lastaufnahme eingesetzt werden.

Voice-Coil-Aktoren bieten zwar eine präzise Positionierung sowie eine gute Kraftregelung und leichtgängige Bewegung. Ihr Verfahrweg ist jedoch auf etwa 100 mm begrenzt und sie können Lasten im Stillstand nur halten, wenn sie bestromt sind.

3 Hybridkonzept aus Piezoschreitantrieb mit Piezoaktor

In anderen Anwendungen wie z.B. für die Inspektion von Halbleitern hat PI bereits sehr erfolgreich ein weiteres hybrides Antriebskonzept entwickelt und etabliert.

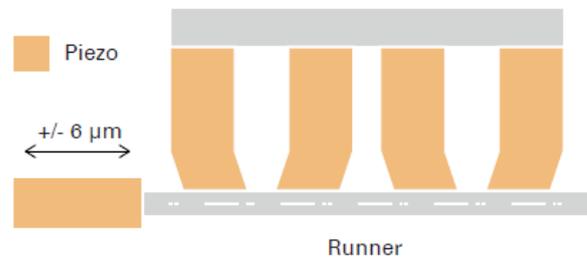


Abb. 2 Hybridkonzept aus Piezoschreitantrieb mit Piezoaktor (Bild: PI)

Ein PiezoWalk® Antrieb, der große Stellwege bei großer Steifigkeit bietet, wird kombiniert mit einem PICMA® Aktor für hoch dynamische Anwendungen (s. Abb. 2). Der Vorteil ist hierbei, dass je nach Auslegung des PiezoWalk® Antriebs hohe Haltekräfte realisiert werden können. Dabei ist die hohe Dynamik des PICMA® Antriebs wichtig für eine schnelle Fokussierung des zu scannenden Objektes.

4 Hybridkonzept aus Elektromotor mit Piezoaktor

Gemeinsam mit den Ingenieuren und Astronomen des European Southern Observatory (ESO) arbeitet PI an einem Projekt für das derzeit größte erdgebundene Teleskop auf dem 3000 Meter hohen Cerro Amazonas in der Atacama-Wüste in Chile (s. Abb. 3).



Abb. 3 Das European Extremely Large Telescope (ELT) wird das größte bodengebundene Teleskop für die wissenschaftliche Auswertung elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren und nahen Infrarot-Wellenlängenbereich sein (Bild: ESO)

Das revolutionäre Design des Teleskops besteht aus einem Hauptspiegel (M1) mit einem Durchmesser von 39 Metern, der in 798 unabhängige Spiegelsegmente unterteilt ist. Jedes Spiegelsegment hat einen Durchmesser von 1,4 m und wird von drei unabhängigen Hybridantrieben mit einem nominalen Hub von ± 5 mm positioniert (s. Abb. 4).

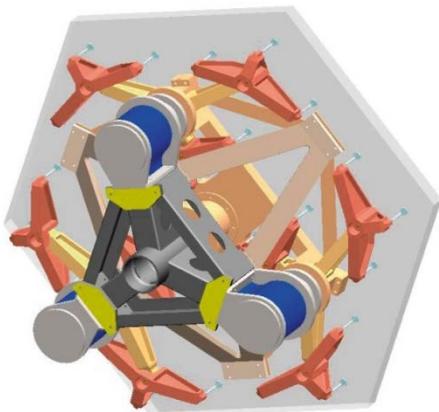


Abb. 4 Darstellung eines Hauptspiegelements, die drei Hybridantriebe sind hier in blau dargestellt (Bild: ESO)



Abb. 5 Konzeption eines M1 Segments (Bild:ESO)

Dabei müssen beachtliche Massen bewegt werden: Jedes Spiegelsegment einschließlich seiner Halterung wiegt etwa 250 kg. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtungen des Teleskops müssen die insgesamt 2.394 Aktuatoren Lasten zwischen 463 N Zug- und 1050 N Druckkraft bewegen oder halten (s. Abb. 5).

Eine der wichtigsten Aufgaben des Teleskops wird sein, möglichst scharfe Bilder des Universums zu liefern, anhand derer die Forscher Exo-Planeten, d. h. Planeten, die außerhalb des Sonnensystems liegen, suchen. Die größte technische Herausforderung besteht daher darin, die Spiegelsegmente über den gesamten Hub mit einer maximalen Positionsabweichung von 2 nm zu verfahren.

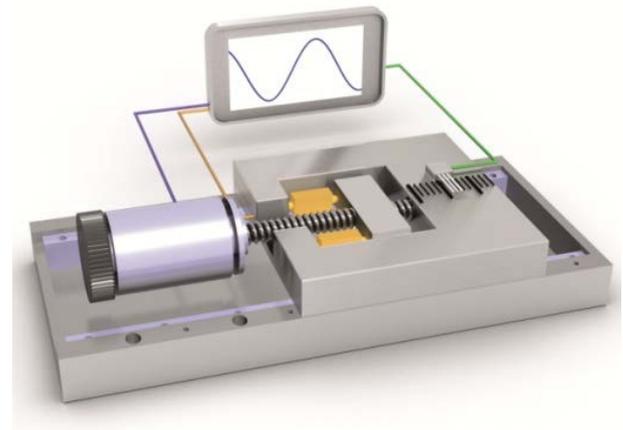


Abb. 6 Der Elektromotor eignet sich für hohe Lasten und lange Stellwege. Kombiniert mit einem Piezoantrieb bietet das hybride System zusätzlich Positioniergenauigkeiten im Sub-Nanometerbereich (Bild: PI)

Um diese hohe Bahngenauigkeit zu erreichen, hat PI ein Hybridkonzept entwickelt, in dem ein Motor-Spindel-Antrieb, der für hohe Lasten und große Verfahrswege geeignet ist, mit einem Piezoaktor zu kombiniert wird (s. Abb. 6). Die serielle Kombination der beiden sehr unterschiedlichen Antriebe ergibt ein leistungsstarkes und präzises Positioniersystem (s. Abb. 7).



Abb. 7 Hochsteifer hybrider Linearaktor mit einem Durchmesser von ca. 200 mm bei einer Gesamtlänge von ca. 285 mm (Bild: PI)

4.1 Piezoaktoren positionieren mit Sub-Nanometer-Genauigkeit

Für die Nanopositionierung von großer Bedeutung ist die präzise Bewegung, die entsteht, wenn eine elektrische Spannung an ein piezoelektrisches Material angelegt wird. Die elektrische Energie wird direkt im kristallinen Festkörper in mechanische umgewandelt, es gibt also keine rotierenden oder reibenden Teile.

Piezoaktoren arbeiten dadurch nicht nur sehr präzise, sondern auch wartungs- und verschleißfrei. Dabei können sie große Lasten bis zu mehreren Tonnen bewegen. Sie wirken elektrisch wie kapazitive Lasten und benötigen im statischen Betrieb praktisch keine Leistung. Das Verhalten im Stromkreis ist etwa mit dem eines elektrischen Kondensators vergleichbar. Im statischen Zustand erzeugen sie genau wie diese keine Abwärme.

Auch in punkto Lebensdauer überzeugen Piezoaktoren: Bei den PICMA® Multilayeraktoren (s. Abb. 8) bestehen die aktiven Schichten aus dünnen keramischen Folien und sind von einer vollständig keramischen Isolierschicht umgeben, die die Aktoren vor Luftfeuchtigkeit und gegen Ausfälle durch erhöhten Leckstrom schützt. Der monolithische Piezokeramikblock eines solchen Aktors erreicht selbst unter extremen Umgebungsbedingungen mit hohen Temperaturunterschieden eine besonders hohe Zuverlässigkeit.

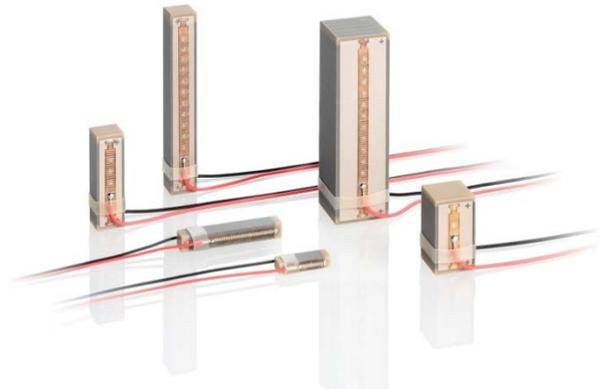


Abb. 8 Keramisch isolierte Hochleistungs-Piezoaktoren: langlebig auch unter erschwerten Einsatzbedingungen in Industrie, Life Science und Mikroskopie ebenso wie in Medizintechnik und Forschung (Bild: PI)

Die im Hybridantrieb für die Teleskopsegmente eingesetzten Piezoaktoren sind zudem in einem verschlossenen, mit Stickstoff gefüllten Metallbalg gekapselt (s. Abb. 9), um auch unter widrigen Umgebungsbedingungen am Standort in der Atacama-Wüste in 3.000 m Höhe die geforderte Lebensdauer der Positionierlösung von 30 Jahren zu erreichen.

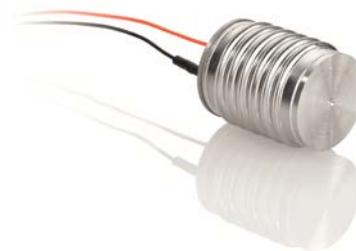


Abb. 9 Ein gekapselter PICMA® Linearaktor ist Teil des hybriden Antriebskonzepts (Bild: PI)

4.2 Ein hochauflösender Sensor für beide Antriebssysteme

Eine weitere Besonderheit der Hybridantriebe ist der gemeinsame hochauflösende Sensor, mit dessen Hilfe beide Antriebe gleichzeitig kontinuierlich geregelt werden. Nur so lässt sich die hohe Auflösung der Piezoaktoren auch über den gesamten Verfahrsweg nutzen.

Der hochauflösende Sensor ist ein inkrementeller optischer Encoder, der nahe der Antriebsachse platziert ist (Abb. 10). Er arbeitet mit einer Auflösung von 0,1 Nanometern und ist ebenfalls unempfindlich gegenüber wechselnden Umgebungsbedingungen, wie sie am Einsatzort des Teleskops in der Atacama-Wüste herrschen.

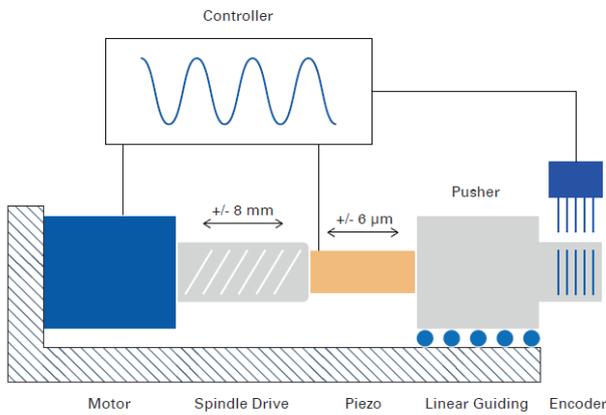


Abb. 10 Schematische Darstellung des Hybrid-Antriebs. Die gemeinsame Regelung mit einem einzigen hochoflösenden Linearencoder ermöglicht die extrem konstante Geschwindigkeit und hohe Positioniergenauigkeit (Bild: PI)

Der Motor-Spindel-Antrieb ist für hohe Lasten und Verfahrswege von wenigen Millimetern bis zu einem Meter geeignet. Der Piezoaktor bietet lediglich eine Nominalauslenkung von etwa 0,1 bis 0,15 % der Aktorlänge, erreicht jedoch mit einem hochoflösenden Sensor Positioniergenauigkeiten im Sub-Nanometer-Bereich und kann damit die Ungenauigkeiten des Motor-Spindel-Antriebs ausgleichen.

Die Spindel wird über ein hochuntersetztes Getriebe von einem bürstenlosen, drehmomentstarken Torque-Motor angetrieben.

Das Getriebe sorgt für einen spielfreien Betrieb und garantiert ein konstantes Übersetzungsverhältnis. Dadurch kann der Motor klein dimensioniert werden, obwohl große Massen bewegt werden. Die hohe Untersetzung unterstützt zudem bei Stillstand die Selbsthemmung des Motors.

Ein spezieller Controller steuert beide Antriebe simultan an und regelt über das hochoflösende Positionsmesssystem. Die Regelalgorithmen betrachten Motor- und Piezosystem als eine Antriebseinheit und gleichen die tatsächliche Bewegung mit einer berechneten Trajektorie ab.

Das Steuerungsprinzip des Hybridantriebs ist im Prinzip einfach zu verstehen (Abb. 11): Die Motorspannung wird von der Steuerspannung des Piezos abgeleitet. Je größer diese Spannung wird, umso schneller läuft der Motor. Während sich der Piezo also ausdehnt, treibt der Motor die Spindel in die gleiche Richtung. So wird die Grobpositionierung der Spindel durch die Feinpositionierung des Piezos ergänzt. Gleichzeitig wird der Piezo von der Spindel automatisch immer in die Nähe seiner Null-Stellung gefahren. Hier hat er die größte Möglichkeit zur Positionskorrektur in beide Richtungen. Auf diese Weise lassen sich die relativ großen Verfahrswege mit einer extrem hohen Positioniergenauigkeit kombinieren.

Solche Hybridantriebe können ihre Eigenschaften aber nicht nur in Teleskopen ausspielen, sondern sind immer dann eine praxisgerechte Lösung, wenn bei großen Verfahrswegen die Position hochgenau erfasst und wieder angefahren werden oder eine Zielposition nanometergenau erreicht werden muss. Typische Anwendungsbereiche finden sich deshalb z.B. auch in der Messtechnik beispielsweise bei der Oberflächeninspektion, der Halbleiterfertigung, der Mikroskopie und der Lasertechnologie.

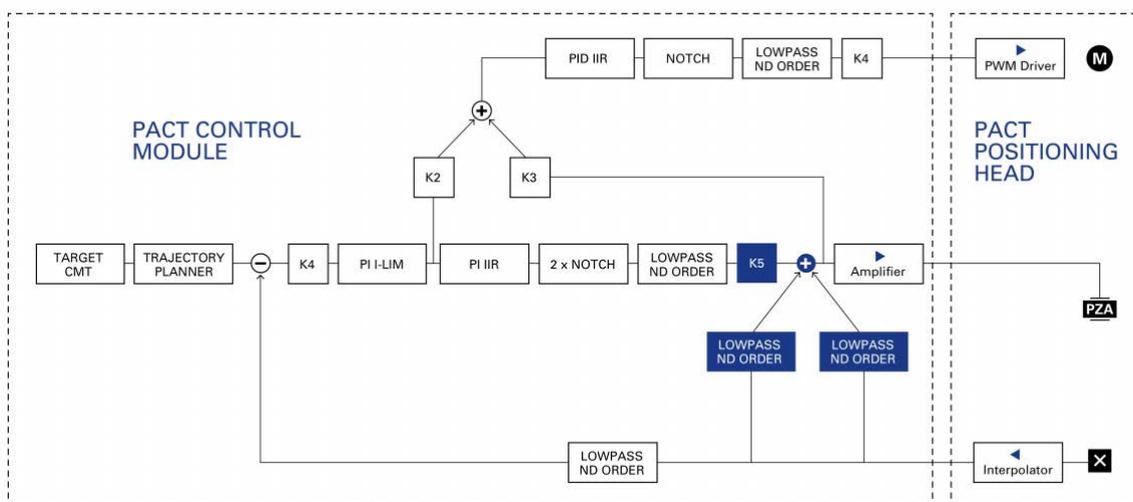


Abb. 11 Die Reglerstruktur (Bild: PI)

5 Autor



Oliver Dietzel, Teamleiter Projektmanagement Zentrale Plattform – Entwicklung bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG

6 Über PI

Das Unternehmen Physik Instrumente (PI) ist für die hohe Qualität seiner Produkte bekannt und nimmt seit vielen Jahren eine Spitzenstellung auf dem Weltmarkt für präzise Positioniertechnik ein. Seit über 40 Jahren entwickelt und fertigt PI Standard- und OEM-Produkte mit Piezo- oder Motorantrieben.

Eine kontinuierliche Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte, Produkte und Systemlösungen und über 200 Technologiepatente kennzeichnen heute die Unternehmensgeschichte. Dabei entwickelt, fertigt und qualifiziert PI alle Kerntechnologien selbst: Von Piezokomponenten, -aktoren und -motoren und magnetischen Direktantrieben über Luftlager, Magnet- und Festkörperführungen bis hin zu Nanometrologie-Sensoren, Regeltechnik und Software. PI ist dadurch von den am Markt verfügbaren Komponenten unabhängig, um seinen Kunden die fortschrittlichsten Lösungen anzubieten. Die hohe Fertigungstiefe ermöglicht dabei eine vollständige Prozesskontrolle, um flexibel auf die Marktentwicklungen und neue Anforderungen zu reagieren.

Durch die Übernahme der Mehrheitsanteile an ACS Motion Control, einem weltweit führenden Entwickler und Hersteller modularer Motion Controller für mehrachsige Antriebssysteme, kann PI außerdem maßgeschneiderte Komplettsysteme für industrielle Anwendungen liefern, die höchste Präzision und Dynamik fordern. Mit vier Standorten in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und Servicenederlassungen ist die PI Gruppe international vertreten.