

Werkzeugmaschinen, Antriebstechnik, Mechatronik

Neuartige Vorschubantriebe für kleine Werkzeugmaschinen *

Modulare einphasige elektrodynamische Linearantriebe mit integrierter Regelung für kurze Verfahrswege

T. Bödrich, M. Süßenbecker, J. Lienig

Ein- und mehrachsige Vorschubeinheiten für kleine Werkzeugmaschinen mit Verfahrswegen von bis zu 30 mm je Achse lassen sich vorteilhaft mit einfachen einphasigen elektrodynamischen Lineardirektantrieben realisieren. Aufbau und Eigenschaften eines solchen einachsigen Vorschubmoduls mit integrierter Ansteuerung werden nachfolgend vorgestellt. Der aufgebaute Demonstrator weist eine hohe Kompaktheit, eine gute Dynamik und ein günstiges Verhältnis von Modulkosten zu erreichter Genauigkeit auf. Der abschließende Ausblick nennt geplante weiterführende Arbeiten.

Novel feed units for small machine tools

Uni- and multiaxial feed units for small machine tools with travel ranges up to 30 mm can advantageously be realised with simple single-phase electrodynamic direct drives. Design and achieved performance of such a uniaxial feed unit with embedded control will be presented. The built demonstrator features compactness, good dynamic behaviour and a favourable ratio between module cost and achieved accuracy. A short outlook on planned further work will be given at the end.

1 Einleitung

In vielen Branchen ist der Trend zur Miniaturisierung von Bauteilen und Funktionseinheiten ungebrochen, wie zum Beispiel die mobile Kommunikations- und Datentechnik eindrucksvoll zeigt. Heutige zur Fertigung miniaturisierter Komponenten eingesetzte Werkzeugmaschinen weisen zumeist ungünstig große Verhältnisse des Maschinen- beziehungsweise Arbeitsraumvolumens zum Werkstückvolumen auf. Die Entwicklung größenangepasster, das heißt kleiner Werkzeug-

maschinen ist deshalb Gegenstand aktueller Forschung. Seit 2010 werden im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramm 1476 „Kleine Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke“ Komponenten und Konzepte für miniaturisierte Werkzeugmaschinen entwickelt, die sich unter anderem durch Flexibilität, Kosteneffektivität und Kompaktheit auszeichnen [1]. Großer Wert wird dabei auf die Modularität der in der Entwicklung befindlichen Komponenten gelegt, um eine einfache Rekonfigurierbarkeit von Werkzeugmaschinen gewährleisten zu können. Die zu entwickelnden Komponenten sollen weiterhin nicht durch eine reine Skalierung von größeren Werkzeugmaschinen abgeleitet werden, sondern durch Unterschreiten einer kritischen Maschinengröße neuartige technische und konstruktive Lösungen ermöglichen [1, 2].

An der Technischen Universität Dresden werden derzeit im Rahmen des oben genannten Schwerpunktprogramms elektrodynamische Vorschubmodule für Verfahrswege bis etwa 30 mm entwickelt. Der begrenzte Verfahrsweg ermöglicht gegenüber mehrphasigen Lineardirektantrieben für größere Wege einphasige Magnetkreise und Ansteuerungen und damit besonders einfache Antriebslösungen. Daher – sowie aufgrund der hier genutzten verlustleistungsarmen Motoransteuerung mittels Pulsweitenmodulation (PWM) – kann die Ansteuerlektronik in den Antrieb integriert werden, sodass sich ausgesprochen kompakte Vorschubmodule ergeben. **Bild 1** zeigt ein erstes derart aufgebautes einachsiges Vorschubmodul, das im Anschluss an den folgenden kurzen Überblick über prinzipiell mögliche Linearantriebe für kleine Verfahrswege vorgestellt wird.

2 Prinzipiell mögliche Vorschubantriebe für kleine Verfahrswege

Vorschubachsen heutiger für die Mikrofertigung verfügbarer Werkzeugmaschinen weisen in aller Regel Verfahrswege von mehreren 100 mm auf. Dominierend sind dabei rotatorisch angetriebene Kugelgewindespindel-Mutter-Einheiten mit oder ohne zwischengeschaltetes Übersetzungsgetriebe sowie seltener dreiphasige Lineardirektantriebe [3]. Beschränkt man sich wie im Schwerpunktprogramm bei der Entwicklung kleiner Werkzeugmaschinen auf maximale Verfahrswege von einigen Zentimetern sowie maximale Lastkräfte von einigen 10 N je Achse, findet man in der Automatisierungs-, Handhabungs- und Labortechnik vielfältige Antriebslösungen, die prinzipiell auch für Vorschubachsen der Mikrofertigung nutzbar gemacht werden können.

Weit verbreitet sind zum Beispiel miniaturisierte Spindel-Mutter-Lineartische mit DC- oder Schrittmotor und zwischengeschaltetem Übersetzungsgetriebe. Steigungen liegen zumeist im Bereich 0,4...1 mm, ein Umkehrspiel von einigen µm ist typisch. Die Drehzahluntersetzung und die kleine

Dr.-Ing. Thomas Bödrich
Dipl.-Ing. Michael Süßenbecker
Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig
Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design (IFTE)
Technische Universität Dresden
Helmholtzstr. 10, D-01062 Dresden
Tel. +49 (0)351 / 463-36296, Fax +49 (0)351 / 463-37183
E-Mail: thomas.boedrich@tu-dresden.de
Internet: www.ifte.de

Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der hier beschriebenen Arbeiten im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1476 „Kleine Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke“.

Info

* Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („Peer-Review“).

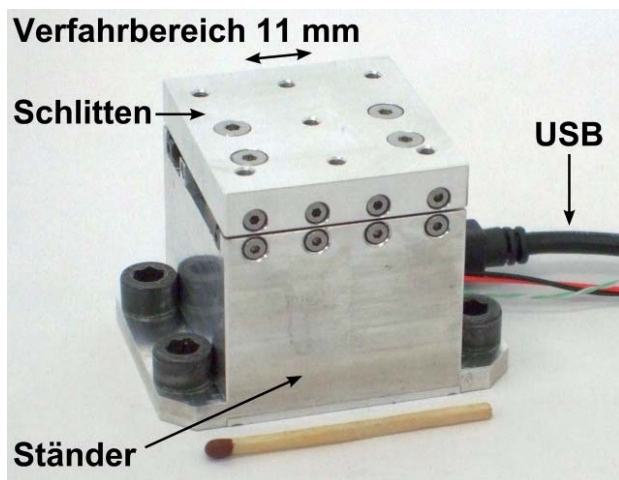


Bild 1. Demonstrator eines einphasigen elektrodynamischen Vorschubmoduls mit integrierter Ansteuerung für kleine Verfahrswege

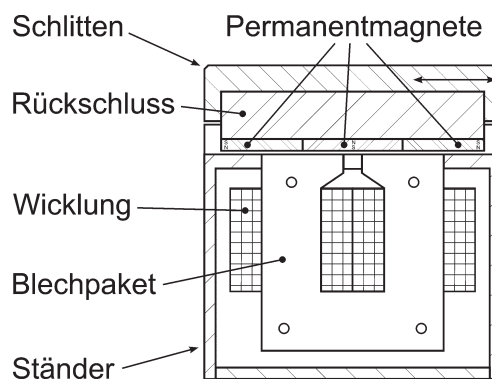


Bild 2. Schematische Schnittdarstellung der Vorschubeinheit

Spindelsteigung lassen oft nur maximale Verfahrgeschwindigkeiten von wenigen mm/s zu. Selbsthemmung im stromlosen Zustand und eine vergleichsweise hohe Steifigkeit sind jedoch für die meisten Anwendungen vorteilhaft.

Verfügbar sind weiterhin piezobasierte Lineartische, die aufgrund ihrer inkrementellen Arbeitsweise und abhängig vom Messsystem sehr hohe Positioniergenauigkeiten im nm-Bereich zulassen, jedoch nur relativ geringe Kräfte, eine geringe Dynamik und einen vergleichsweise hohen Preis aufweisen.

Elektrodynamische Lineardirektantriebe für Hübe ab einigen Zentimetern sind wie auch bei größeren Ausführungen mehrphasig. Unter der Bezeichnung LinMot sind beispielsweise für die Automatisierungstechnik zweiphasige zylindrische Solenoidmotoren mit gleitgeführtem Permanentmagnetläufer verfügbar [4]. In den mehrphasigen Lineardirektantrieben der Firma Aerotech für Verfahrswege ab 25 mm ist der Läufer zumeist wälzgeführt [5]. An der TU Ilmenau und in deren industriellem Umfeld wurden elektrodynamische Mehrkoordinatenantriebe (zumeist $xy\Delta\phi$) mit zwei Phasen je Achse und aerostatischer Führung des Permanentmagnetläufers entwickelt. Abhängig vom Positionsmesssystem sind Auflösungen derartiger Systeme im Sub- μm -Bereich möglich [6].

Besonders einfache elektrodynamische Direktantriebslösungen ergeben sich, wenn die begrenzten Verfahrswege den Verzicht auf eine Kommutierung des Stroms und damit den Aufbau einphasiger Antriebe zulassen. Tauchspulantriebe (moving coil) mit statorfest angeordneter permanentmagnetischer Erregung und einer in einem Luftspalt angeordneten Läuferwicklung ähnlich wie in Lautsprechern sind ein bekanntes Beispiel solcher einphasigen elektrodynamischen Antriebe [7]. Höhere Kraftdichten lassen sich demgegenüber in der Regel erzielen, wenn die Wicklung statorfest angeordnet ist und einer oder mehrere Permanentmagnete Bestandteil des Läufers sind und mit diesem bewegt werden (moving magnet). Ursachen für die höhere Kraftdichte sind vor allem kleinere Luftspaltbreiten durch Wegfall einer bewegten Spule sowie größere mit statorfesten Wicklungen einprägbare Durchflutungen aufgrund größerer im Stator möglicher Wickelfensterquerschnitte [8, 9]. Einphasige elektrodyna-

mische Linearantriebe mit bewegten Magneten werden bereits seit Jahrzehnten als Direktantrieb für translatorisch oszillierende Wirkelemente genutzt, beispielsweise als Antrieb für den Hubkolben sogenannter Schwingankerverdichter der Kälte- und Kryotechnik [9, 10]. Zum stetigen Positionieren wie in dem nachfolgend beschriebenen Vorschubmodul kommen einphasige Moving-Magnet-Antriebe hingegen bisher kaum zum Einsatz. Sie bieten sich hierfür aufgrund ihres einfachen Aufbaus und ihrer im Vergleich zu Moving-Coil-Antrieben größeren Kraftdichte und Robustheit jedoch an.

3 Demonstrator eines einphasigen elektrodynamischen Vorschubmoduls

3.1 Aufbau

Bild 1, 2 und 3 zeigen den Aufbau des Demonstrators eines einphasigen elektrodynamischen Vorschubmoduls mit bewegten Magneten. Entwicklungsziele waren unter anderem eine hohe Kompaktheit sowie die Integration eines Positionssensors und der Regelungshard- und -software in das Modul. Dabei sollte eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit bei gleichzeitig kostengünstigem Aufbau, das heißt bei Integration eines Low-Cost-Wegsensors erreicht werden.

Der Ständer des Demonstrators enthält ein U-förmiges Statorblechpaket, dessen Schenkel mit zwei in Reihe geschalteten Teilwicklungen versehen sind. Weiterhin ist eine applikationsspezifisch entwickelte mikrokontrollerbasierte Ansteuerlektronik in Form einer miniaturisierten vierlagigen Leiterplatte in den Ständer integriert (Bild 3). Auf dieser Leiterplatte ist ein magnetischer Low-Cost-Positionssensor (Einzelpreis etwa 11,50 US-Dollar) mit einer Auflösung von $0,488\ \mu\text{m}$ angeordnet, dem ein in den Läufer integrierter magnetischer Maßstab mit abwechselnder Nord-Süd-Polfolge gegenüber steht. Der schlittenförmige Läufer dient in späteren Anwendungen als Werkzeug- beziehungsweise Werkstückträger. Er enthält auf einem ferromagnetischen Läuferückschluss drei alternierend polarisierte Permanentmagnete, die sich mit dem Läufer relativ zu den Statorpolen translatorisch bewegen.

Die meisten kleinen Lineartische weisen eine geschlossene vorgespannte Wälzkörperführung auf, deren Fertigung beziehungsweise Montage aufgrund der grundsätzlichen Überbestimmtheit solcher Führungen relativ aufwendig ist [11]. Abweichend von diesem üblichen Aufbau hat der vor-