

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst ein kurzer Überblick über die üblichen Begriffe und den gegenwärtigen technologischen Stand im Bereich der Mikrotechnik sowie der damit verbundenen Mikroproduktionstechnik gegeben. Anschließend werden die Motivation und die Ziele des SPP 1476 dargestellt, in dessen Rahmen der fluiddynamische Antrieb entwickelt wird. Vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung ordnen die weiteren Abschnitte die planaren Mehrkoordinatenantriebe in den allgemeinen Kontext der Vorschubantriebe ein und erklären ihren grundlegenden Aufbau sowie ihre charakteristischen Eigenschaften. Abschließend wird der Demonstrator des fluiddynamischen Vorschubantriebs vorgestellt, der den planaren Mehrkoordinatenantrieben zuzuordnen ist. Der Aufbau und die Funktionsweise dieses Antriebs stellen die Grundlagen für die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit dar.

2.1 Mikrotechnik und Mikroproduktionstechnik

Miniaturisierung bei gleichzeitiger Funktionsintegration ist heute ein zentrales Thema in der Produktentwicklung und kann in den unterschiedlichsten Anwendungsfeldern beobachtet werden. Als typische Vertreter seien an dieser Stelle beispielsweise Festplattenköpfe, Instrumente der minimalinvasiven Chirurgie und Sensoren im Automobilbau oder der Mobilelektronik genannt. Derartige miniaturisierte Systeme vereinen Signalverarbeitung, Sensoren und Aktoren auf kleinstem Raum. Sie erreichen durch ihre hohe Integrationsdichte funktionale und/oder kostenmäßige Vorteile, stellen jedoch aufgrund ihrer extrem kleinen Struktur- und Bauteildimensionen auch hohe Forderungen an die zugrundeliegende Produktionstechnik [HESS02/1].

Im Folgenden werden ausgewählte grundlegende Begriffe aus der Mikrotechnik und ihrem Umfeld eingeführt und ein kurzer Überblick über die Verfahren und Möglichkeiten der Mikroproduktionstechnik gegeben.

2.1.1 Begriffe

2.1.1.1 Mikro-Produkte

Bauteile, bei denen die Maße funktionsbestimmender Geometrien oder Strukturen im μm -Bereich liegen, werden als Mikro-Bauteile oder Mikro-Produkte bezeichnet. Die Gesamtabmessungen der Bauteile spielen dabei keine Rolle [HESS02/8].

2.1.1.2 Mikrotechnik

Gegenstand der Mikrotechnik ist die Entwicklung und Herstellung von Mikro-Produkten. Sie ist der Oberbegriff, unter dem die Mikroelektronik, Mikrooptik, Mikro-mechanik sowie deren Entwicklungs-, Werkstoff- und Produktionstechnik zusammengefasst werden [HIER95].

2.1.1.3 Mikrosystem und Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik ist eine relativ junge ingenieurwissenschaftliche Disziplin, deren Gegenstand die funktionale Integration mechanischer, elektronischer, optischer und sonstiger Funktionselemente unter Anwendung spezieller Mikrostrukturierungstechniken ist [HESS02/8].

Als Mikrosystem bezeichnet man dabei ein intelligentes miniaturisiertes System mit Sensorik, Datenverarbeitung und/oder Aktorik, das wenigstens zwei elektrische, maschinelle, optische oder andere Eigenschaften verknüpft. Die Realisierung erfolgt auf einem einzelnen Chip oder als Multichip Hybrid [WULF14b].

Der Aspekt der Miniaturisierung allein erfasst demnach noch nicht das eigentliche Potential der Mikrosystemtechnik. Dieses kommt erst durch den Systemgedanken, also die Verknüpfung vieler mikrotechnischer Komponenten zu einem komplexen Mikrosystem, zum Tragen [VÖLK06/4–5].

2.1.1.4 Monolithischer und hybrider Aufbau von Mikrosystemen

In der Mikrosystemtechnik kann grundsätzlich zwischen zwei Architekturen unterschieden werden: Der monolithische Aufbau zeichnet sich dadurch aus, dass sämtliche Funktionselemente des Mikrosystems auf einem einzelnen Chip integriert sind. Dies resultiert in einem sehr geringen Platzbedarf und in einer hohen Zuverlässigkeit,

da die Verbindungswege zwischen den Komponenten kurz sind und keiner speziellen Kontaktierungstechnik bedürfen. In der Herstellung durchläuft das Substrat einen komplexen Prozess, in dem alle Komponenten gemeinsam gefertigt werden.

Im Gegensatz dazu werden die Komponenten hybrider Mikrosysteme nach ihrer Herstellung auf einem Träger miteinander verbunden. Dies hat den Vorteil, dass die einzelnen Bauelemente aus verschiedenen Werkstoffen bestehen und unabhängig voneinander mit dem jeweils optimalen Verfahren produziert werden können [HILL06/5–7].

2.1.1.5 Feinwerktechnik

Die Feinwerktechnik ging im frühen 20. Jahrhundert aus der fachlichen Kombination von Feinmechanik, Optik und Elektrik hervor, um den speziellen Anforderungen der damaligen Gerätetechnik (z.B. Funk- und Fernsprechtechnik) gerecht zu werden und war von Beginn an eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft. Aufgrund der gewandelten Anforderungen und neuer Technologien wird die Feinwerktechnik heute jedoch auch zunehmend von der Optoelektronik, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie der Mikrosystemtechnik beeinflusst, weshalb eine genaue Definition und Abgrenzung des Begriffs schwierig ist [HIER95/348], [CZIC08/184].

2.1.1.6 Subfeinwerktechnik bzw. Mikromaschinenbau

Die Produkte des sogenannten Mikromaschinenbaus sind hybride mikrotechnische Systeme, bei denen es sich oftmals um eine Miniaturisierung feinwerktechnischer Systeme handelt. Da sie mit üblichen Bauteilgrößen zwischen 0,05 und 1mm hinsichtlich der Größenordnung zwischen der Feinwerktechnik und der Mikrosystemtechnik angesiedelt sind, spricht man auch von „subfeinwerktechnischen“ Systemen [WULF14a], [WULF14b].

2.1.2 Mikroproduktionstechnik

Hesselbach definiert die Mikroproduktionstechnik als „die Gesamtheit der zur Erzeugung von Mikroprodukten angewandten Techniken“. Bezüglich der Fertigungsverfahren sind heute im Wesentlichen zwei Entwicklungslinien erkennbar: Zum einen die (neueren) Verfahren der Mikrosystemtechnik und zum anderen die (klassischen) Fertigungsverfahren aus der Feinwerktechnik [HESS02/1,5].

2.1.2.1 Verfahren der Mikrosystemtechnik

Mit der Erfindung des Transistors (1948) und der Herstellung erster integrierter Schaltungen auf der Basis des Halbleitermaterials Silizium (1958) begann die Ära der Mikroelektronik, die bis heute die führende Position in Hinsicht auf die Miniaturisierung einnimmt und sich in allen Bereichen des Lebens auswirkt [LOTT12/444], [VÖLK06/1]. Ermöglicht wurde diese Entwicklung durch neuartige Herstellungsverfahren, die die Fertigung elektronischer Systeme grundlegend veränderten. So wurden die Bauelemente einer Schaltung von nun an durch fotolithographische Strukturierung und Schichttechnologien auf einem gemeinsamen Halbleiter-Substrat (Silizium-Wafer) erzeugt. Die Vervollkommenung dieser Techniken ermöglichte die Beherrschung immer kleinerer Strukturgrößen (heute unter 100nm), was zu den enormen Leistungssteigerungen im Bereich der Digitalelektronik führte. Durch das sogenannte Batch Processing, bei dem eine Vielzahl von Systemen gleichzeitig (parallel) auf einem Substrat den gleichen Prozessschritten unterworfen werden, konnten darüber hinaus trotz hoher Prozesskosten geringe Stückkosten der Einzelbauteile erzielt werden [LOTT12/444], [VÖLK06/1].

Die Mikrosystemtechnik, die sich seit den 1970er Jahren entwickelte, begann das erfolgreiche Konzept der Mikroelektronik auch auf nichtelektronische Bereiche anzuwenden, um beispielsweise mechanische, optische oder fluidische Systeme durch Mikrostrukturierung herzustellen. Dabei übernahm man die planaren Verfahren der Mikroelektronik (Fotolithographie, Verfahren zur Abscheidung dünner Schichten, Ätztechnik, Batch-Processing) und entwickelte sie weiter. Es entstanden Fertigungsverfahren, die nun auch die Herstellung dreidimensionaler, beweglicher Mikrostrukturen gestatteten. Dazu gehören unter anderen:

- Tiefenlithographie
- Anisotropes Tiefenätzen von Silizium
- Opferschichttechniken
- Mikrogalvanik
- Abformtechniken
- Spritzgießen (MIM: Metal Injection Molding, CIM: Ceramic Injection Molding)
- Prägen
- Mehrebenen-Waferbondverfahren

[LOTT12/444], [VÖLK06/1–2], [HESS02/1]

2.1.2.2 Feinwerktechnische Verfahren

Mit den steigenden Bauteilanforderungen und dem Bedarf für den Einsatz neuer Werkstoffe wurden neben den bereits vorgestellten, meist siliziumbasierten Fertigungstechnologien für monolithisch aufgebaute Mikrosysteme, auch alternative Herstellungsverfahren untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die feinwerktechnischen Methoden zur Herstellung miniaturisierter Produkte ein hohes Potential für die Komponentenherstellung von hybriden Systemen bergen [HESS02/5–6], [LOTT12/445].

In der klassischen Feinwerktechnik werden konventionelle Fertigungsverfahren nach DIN8580 verwendet. Die minimale Größe der produzierten Einzelteile wird dabei durch die Möglichkeiten der formgebenden Verfahren sowie der vorhandene Montagetechnologie nach unten begrenzt. Da diese Grenze jedoch durch die Weiterentwicklung der Verfahren und die Nutzung neuer mikrotauglicher Materialien verschoben wird, ist eine Fertigung mittlerweile auch in mikrotechnischen Dimensionen möglich [WULF14b], [HESS02/1]. So ermöglichen die trennenden und abtragenden Verfahren wie die Mikrozerspanung, die Mikrofunkenerosion und die Mikrolaserbearbeitung zwar bei Weitem nicht die feinen Auflösungen wie die Verfahren der Mikrosystemtechnik, bieten dafür aber den größeren gestalterischen Spielraum bezogen auf die Werkstoffauswahl und die Komplexität der Geometrie. Aufgrund ihrer Flexibilität, der nicht erforderlichen Masken- bzw. Formentechnik und der kurzen Fertigungszeiten zeichnen sich außerdem große Vorteile bei der Produktion kleiner Stückzahlen ab [LOTT12/445], [HESS02/5–6], [LABO14a].

2.2 SPP 1476 „Kleine Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke“

Es ist zu erwarten, dass der vorherrschende Miniaturisierungstrend anhält und immer neue Anforderungen bezüglich Komplexität, Funktionalität und verwendbarer Werkstoffe mit sich bringt. Schon heute steigt der Bedarf an hybriden mikrotechnischen Systemen der Subfeinwerktechnik und macht weitere produktionstechnische Forschung erforderlich. Aufgrund ihrer Flexibilität und Eignung für kleine Stückzahlen liegt dabei ein Schwerpunkt auf den trennenden und abtragenden Verfahren [LABO14b], [WULF14a].

Während aktuelle Forschungsaktivitäten sich primär der Skalierung der Fertigungsverfahren und der Bildung von Prozessketten zur Herstellung der Mikrowerkstücke widmen, besteht darüber hinaus eine Notwendigkeit, die eingesetzten Werkzeugmaschinen selbst für die neuen Anforderungen zu qualifizieren [LABO14b]. Dies

wird deutlich, wenn man kommerziell verfügbare Werkzeugmaschinen zur Herstellung von Mikrobauteilen betrachtet (Bild 2.1). Es handelt sich dabei in der Regel um Konstruktionen, die von den Maschinen der Makrofertigung abgeleitet sind und diesen in ihren geometrischen Abmessungen, ihrer Kinematik und den verwendeten Elementen (Gestelle, Führungen, Antriebe) ähneln [LABO14a].



Bild 2.1: Werkzeugmaschine zur Herstellung von Mikrobauteilen [KUGL14]

Bezieht man nun die technischen, ökonomischen und ökologischen Kenngrößen dieser Maschinen auf die Größe der damit hergestellten Bauteile, ergeben sich extreme Missverhältnisse. So übersteigt z. B. der Arbeitsraum die zu erzeugenden Mikrostrukturen um mehrere Größenordnungen. Aus dem großen Verhältnis von Arbeitsraum zu Werkstückabmessungen folgt auch das ungünstige Verhältnis von bewegter Maschinenmasse zu Werkstückmasse, was wiederum einen unnötig hohen Aufwand bei der Herstellung (Material) und im Betrieb (Energiebedarf, Aufstellfläche) der Maschine zur Folge hat [LABO14a]. Darüber hinaus limitieren die genannten Verhältnisse die fertigbare Bauteilkomplexität. So müssen in der Mehrachsbearbeitung aufgrund der großen Störkonturen der Maschinenkomponenten ungünstige Aufspannsituationen in Kauf genommen werden. Diese machen jedoch als Folge großer Pivot-Längen wiederum große Verfahrbewegungen und hohe Beschleunigungen der Maschine erforderlich [LABO14a]. Die dargestellten Zusammenhänge beschränken die Mikrofertigung auf heutigen Werkzeugmaschinen somit sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht als auch in Bezug auf die mögliche Bauteilkomplexität [LABO14a].

Vor diesem Hintergrund wurde im Mai 2009 das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte SPP 1476 „Kleine Werkzeugmaschinen für

kleine Werkstücke“ eingerichtet. Es hat zum Ziel, Konzepte für neuartige größenangepasste Werkzeugmaschinen zur Verfügung zu stellen, die eine wirtschaftliche Einzel-, Kleinserien- und Massenproduktion von komplexen Mikrowerkstücken ermöglichen [LABO14a], [WULF10].

Das Schwerpunktprogramm konzentriert sich ausschließlich auf Maschinen für abtragende Verfahren unter Nutzung mechanischer (Spanen), thermischer (Laser), elektrothermischer (Funkenerosion) und elektrochemischer Energie. Dazu wird vorausgesetzt, dass die gängigen Fertigungsprozesse sowie die zugehörigen Prozessgrößen zur Erzeugung von Mikrostrukturen beherrscht werden und unabhängig von der eingesetzten Werkzeugmaschine sind [LABO14b], [WULF10].

Die Maßnahmen zum Erreichen der Forschungsziele sollen sich nicht allein auf die Skalierung bestehender Maschinenkonzepte bzw. ihrer Kinematik, Struktur und Elemente beschränken [LABO14a]. Es wird vielmehr angestrebt, die vielfältigen Nachteile heutiger Werkzeugmaschinen durch ein systematisches Vorgehen und den Einsatz fachübergreifender, interdisziplinärer Problemlösungsansätze umfassend zu beseitigen. Im Zentrum des Interesses steht daher zunächst die Auflösung der herkömmlichen Maschinenstrukturen sowie die anschließende Neuordnung und Integration aller benötigten Funktionen in wenige Module. Durch die konsequente Miniaturisierung und die Verringerung der Anzahl notwendiger Maschinenkomponenten durch Funktionsintegration (z.B. Vereinigung von Antrieb und Gestell), wird die geforderte Anpassung der Baugröße und des Arbeitsraums der Maschine an die Werkstücke erreicht. Daraus folgt eine geringere bewegte Masse, die eine hohe Dynamik begünstigt sowie kürzere Kragarme und geringere thermische Dehnlängen, die die statische und thermische Steifigkeit positiv beeinflussen [WULF10], [LABO14a].

Weitere wichtige Forschungsgegenstände des SPP sind die Flexibilität und Veränderungsfähigkeit der modular aufgebauten Maschinen. Durch entsprechende Kombination sollen die Module stets optimal auf das zu fertigende Teilespektrum angepasst werden können und auch die Kombination verschiedener Fertigungstechnologien ermöglichen [WULF10].

2.3 Hochgenaue und dynamische Vorschubantriebe

Anspruchsvolle Positionier- und Bearbeitungsaufgaben werden heute in der Regel durch Maschinen realisiert, die aus mehrachsigen, seriellen kinematischen Ketten aufgebaut sind. In derartigen Ketten trägt jede Achse die darauffolgende, wodurch die ersten Achsen aufgrund der bewegten Massen am stärksten beansprucht werden. Sie sind daher stabiler auszulegen und erfordern größere Antriebsleistungen

zum Erreichen der gewünschten Dynamik. Darüber hinaus führt die Reihenschaltung der Achsen zu einer abnehmenden Gesamtsteifigkeit und Fehler der Einzelachsen pflanzen sich entlang der Kette fort und werden einander überlagert [DENK03]. Da in der Fertigungstechnik jedoch immer dynamischere und genauere Vorschubbewegungen gefordert werden, wird versucht diese Nachteile durch den Einsatz besser geeigneter Antriebskonzepte und Maschinenstrukturen zu vermeiden. Dabei wird im Bereich der Mikroproduktionstechnik zusätzlich eine möglichst kompakte Bauweise der gesamten Maschine angestrebt (vgl. Kap. 2.2).

Eine Möglichkeit den genannten Forderungen zu begegnen, ist der Einsatz von parallelen kinematischen Ketten. Diese lösen zwar die Probleme der großen bewegten Massen und der Fehlerfortpflanzung, jedoch begrenzen die Koppelstellen der einzelnen rotatorischen oder translatorischen Antriebe weiterhin die erreichbare Steifigkeit und Positioniergenauigkeit. Darüber hinaus ist das Verhältnis von Bauraum zu nutzbarem Arbeitsraum bei parallelkinematischen Maschinen in der Regel ungünstig [KAHL02]. Der Ansatz, der im Rahmen dieses Forschungsprojekts verfolgt wird, beruht dagegen auf der Integration mehrerer Koordinatenbewegungen in nur einem sogenannten Mehrkoordinatenantrieb. Dieses Konzept löst sich vollständig von der Verkopplung einachsiger Antriebe zu kinematischen Ketten und scheint geeignet die damit verbundenen Nachteile zu eliminieren.

Nach der Konkretisierung des Begriffs „Antrieb“ bzw. „Antriebssystem“ werden im Folgenden die allgemeinen Merkmale der Direktantriebe und darauf aufbauend die der Mehrkoordinatenantriebe vorgestellt. Anschließend wird genauer auf Planarmotoren, ihren Aufbau und ihre Vorteile gegenüber anderen ebenen Antriebskonzepten eingegangen.

2.3.1 Antriebssysteme

„Antreiben bedeutet im technischen Sinne das zeitlich und räumlich definierte Bewegen eines Körpers unter Überwindung von Bewegungswiderständen – also grundsätzlich das Verrichten mechanischer Arbeit.“ [KALL91/11]

Die dazu erforderliche Energie muss einer Energiequelle entnommen, in Bewegungsenergie umgewandelt und in geeigneter Weise auf den zu bewegenden Körper übertragen werden. Die Gesamtheit der Elemente zur Bewegungserzeugung, also zur Wandlung, Steuerung und Übertragung der Energie, bilden das Antriebssystem bzw. kurz den Antrieb. Antriebssysteme haben grundsätzlich den in Bild 2.2 dargestellten Aufbau [SCHÄ96].

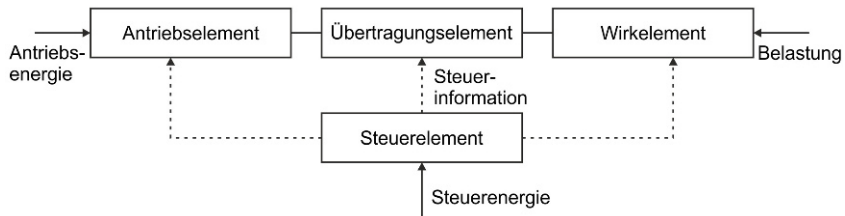


Bild 2.2: Grundaufbau eines Antriebssystems vgl. [SCHÄ96]

Die vom Antriebselement durch Energiewandlung bereitgestellte Bewegungsenergie wird dem Wirkerelement über Übertragungselemente (Wellen, Getriebe, Mechanismen usw.) zugeführt. Diese werden benötigt, um die mechanische Leistung an die Wirkstelle zu leiten oder um Bewegungsform und Bewegungsmaß anzupassen. Die geforderte Bewegung kann durch gezielte Beeinflussung der zugeführten Energie, des Leistungsflusses am Übertragungselement oder durch die Veränderung des Bewegungswiderstandes am Wirkerelement gesteuert werden [SCHÄ96].

Ein anschauliches Beispiel für diese abstrakte Betrachtungsweise ist die in Bild 2.3 dargestellte lineare Vorschubachse. Hier wird die zugeführte elektrische Energie vom Motor (Antriebselement) in Bewegungsenergie gewandelt. Die rotatorische Bewegung der Motorwelle wird durch den Gewindetrieb (Übertragungselement) in eine Linearbewegung des Schlittens (Wirkerelement) umgesetzt.

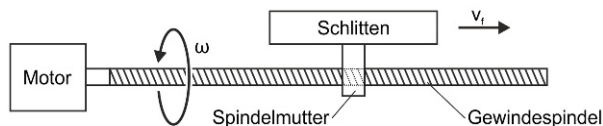


Bild 2.3: Linearachse mit Gewindetrieb

2.3.2 Direktantriebe

Antriebe, bei denen die vom Antriebselement erzeugte Bewegung mit der des Wirkelements identisch ist, und bei denen auf jegliche Übertragungselemente verzichtet wird, bezeichnet man als Direktantriebe. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass mit den mechanischen Übertragungselementen auch deren negative Eigenschaften wie Elastizität, Spiel, Umkehrspanne, zusätzliche Trägheitsmasse und Reibung entfallen. Da die genannten Aspekte häufig begrenzende Faktoren im Hinblick auf Geschwindigkeit, Laststeifigkeit, Verfahrenweg und Dynamik des Antriebssystems darstellen, bie-

ten Direktantriebe ein großes Potential besonders für hochdynamische Antriebe mit hoher Positioniergenauigkeit [SCHÄ96], [WECK06/30].

Unter dem Begriff Linear-Direktantrieb versteht man heute in der Regel elektromechanische Wandler, die als Schritt-, Synchron-, Asynchron- oder Gleichstrommotor ausgeführt sein können. Ihr Aufbau lässt sich aus den entsprechenden rotatorischen Motoren durch die lineare Abwicklung von Stator und Rotor ableiten. Dabei entstehen die beiden gegeneinander beweglichen Teilsysteme, die als Primär- und Sekundärteil bezeichnet werden [WECK06/30]. Bild 2.4 stellt beispielhaft und stark vereinfacht den prinzipiellen Aufbau eines permanentenerregten Synchronlinearmotors dar. In Bild 2.4 (a) - (c) wird zunächst die Vorstellung des „Abwickelns“ von Rotor und Stator verdeutlicht. Bild 2.4 (d) zeigt schließlich den typischen Aufbau mit bewegtem Primärteil und stationärem Sekundärteil.

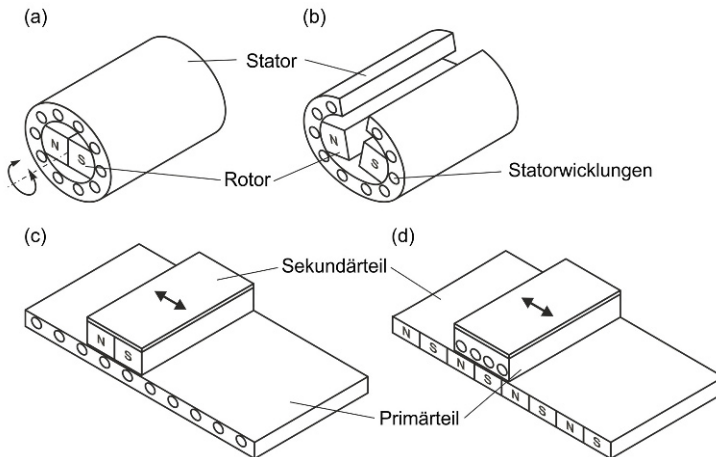


Bild 2.4: Synchronlinearmotor als abgewickelter Synchronmotor vgl. [SEW 14]

Für große Antriebsleistungen (z. B. in Werkzeugmaschinen) werden üblicherweise lineare Synchron-, Asynchron- und Schrittmotoren eingesetzt. Im Bereich geringer Antriebsleistungen und bei kleinen Verfahrwegen werden dagegen hauptsächlich Gleichstromlinearmotoren verwendet [STÖL11/200–201].

Während rotatorische Direktantriebe im Werkzeugmaschinenbau als Motorspindeln oder in Drehtischen weit verbreitet sind, werden lineare Vorschubbewegungen in diesem Bereich aktuell noch überwiegend durch die Kombination von rotatorischen Elektromotoren mit Umwandlungsgetrieben (Kugelgewindetrieb, Zahnstangengetriebe) erzeugt. Der Grund dafür liegt in den Kostenvorteilen von problemneut-

Fluiddynamischer Planarantrieb für drei Freiheitsgrade
Erweiterung eines xy -Antriebs um einen
unbeschränkten Drehfreiheitsgrad

Schumacher, T.

2015, XX, 103 S. 56 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-12017-7