

## **Aerostatisch gelagerter Impulsantrieb zur Präzisionsjustage in der Mikrotechnik**

R. Pröger-Mühleck, W. Schinköthe (IKFF, Stuttgart)  
V. Guyenot, A. Gebhardt, C. Siebenhaar (FhG-IOF, Jena)

Beitrag zur

**GMM-IMM-Fachtagung  
Innovative Klein- und Mikroantriebe  
Mainz 15./16. Mai 2001**

Veröffentlicht im GMM-Fachbericht 33:

**Innovative Klein- und Mikroantriebe 2001**  
Vorträge der GMM-IMM-Fachtagung  
vom 15. bis 16. Mai 2001 in Mainz

VDE Verlag, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin  
ISBN 3-8007-2612-2  
ISSN 1432-3419

© 2001 VDE/VDI GMM

# Aerostatisch gelagerter Impulsantrieb zur Präzisionsjustage in der Mikrotechnik

Dipl.-Ing. Rainer Pröger-Mühleck; Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schinköthe;  
(Institut für Feinwerktechnik an der Universität Stuttgart, Deutschland);

Dr.-Ing. habil. Dipl.-Phys. Volker Guyenot; Dipl.-Ing. Andreas Gebhardt; Dipl.-Ing. Christian Siebenhaar;  
(Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena, Deutschland).

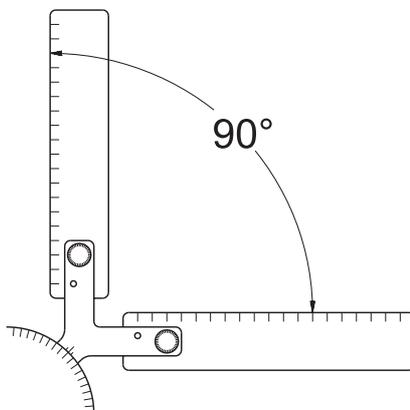
## Kurzfassung

Beim Aufbau hybrider Baugruppen ist eine exakte Justage der Komponenten mit Genauigkeiten im Submikrometerbereich erforderlich. Eine Alternative zur Verwendung direkt angekoppelter Stellantriebe stellt die Stoßjustierung dar, bei der durch gezielte Stöße bereits vormontierte Teile in die gewünschte Position gebracht werden. Nach der Vorstellung des Justageverfahrens wird die Entwicklung des Antriebes zur Generierung der dazu erforderlichen Stoßimpulse betrachtet. Zur Minimierung der Reibung wurde der verwendete Lineardirektantrieb mit einer aerostatischen Führung kombiniert.

## 1 Justierung

### 1.1 Definition

Was bedeutet Justieren? Dies soll zunächst an einem einfachen Beispiel erläutert werden. **Bild 1** zeigt die beiden Lineale einer Zeichenmaschine.

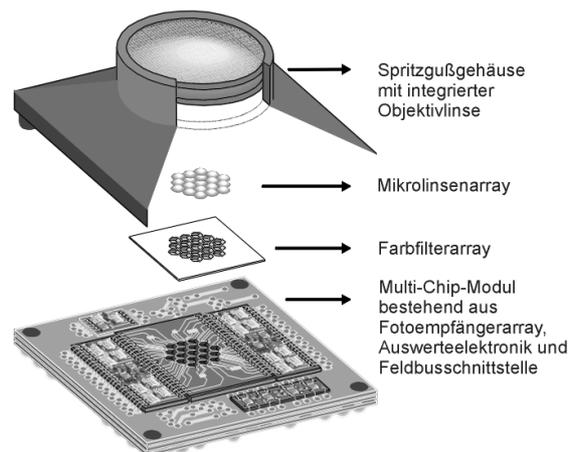


**Bild 1** Zeichenkopf mit Linealen

Die Zeichenkanten dieser Lineale sollen einen rechten Winkel bilden. Um dies zu erreichen, muss mindestens eines der Lineale eine einstellbare Aufnahme erhalten; so kann der Benutzer z. B. nach einem Austausch die Orthogonalität wieder herstellen. **Definition des Justierens** lässt sich für mechanische Probleme folgende ableiten [1]:

Justieren heißt, Bauelemente während oder nach der Montage so zu bewegen, dass sie die für die gewünschte Funktion des gesamten technischen Gebildes notwendige Lage bekommen.

### 1.2 Anwendungen



**Bild 2** Farb-/Formsensorarray [2]

Das hier vorgestellte Verfahren ist besonders geeignet für Präzisionsjustagen aus dem Bereich der Feinwerk- und Mikrotechnik. So ist beim Aufbau von Mikrosystemen die hybride Integration von Komponenten, die aus verschiedenen Materialien und mit verschiedenen Prozessen hergestellt wurden, weit verbreitet.

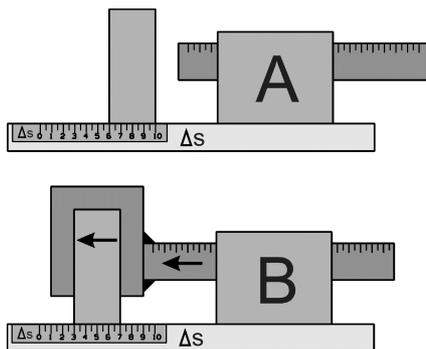
Als Beispiel sei hier die Montage von Sensoren für CCD-Kameras zur Farbstruktur- und Positionsanalyse genannt ([2]; siehe **Bild 2**). Die dazu benötigten Mikrolinsen und Farbfilter (Bildmitte) werden jeweils als Array im Waferverbund gefertigt. Bei der Montage des Gesamtsystems müssen die beiden Wafer mit den Mikrolinsen und den Farbfiltern mit einer Genauigkeit von unter 1  $\mu\text{m}$  zueinander positioniert

werden. Dazu tragen diese Wafer Justagemarken, so dass die Waferposition über ein Bilderfassungssystem ausgewertet werden kann.

### 1.3 Grundlegende Positionierverfahren

#### 1.3.1 Direkte Kopplung

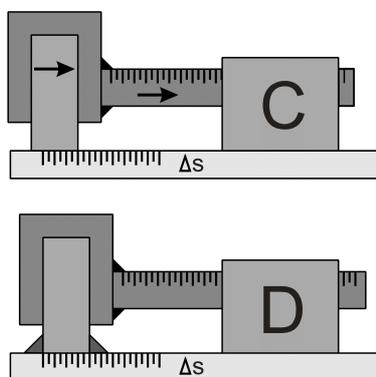
Die exakte Justierung eines Bauteils kann über eine direkte Kopplung mit einem Stellantrieb erfolgen.



**Bild 3** Direkte Kopplung (1)

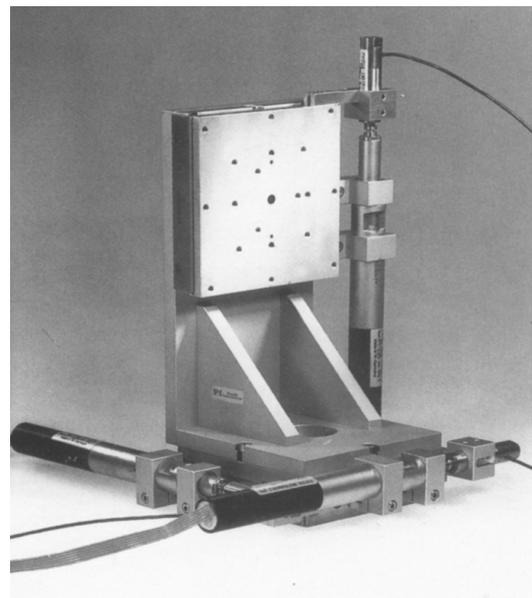
**Bild 3** zeigt schematisch den Ablauf der Justage. Links ist als Quader das zu positionierende Objekt dargestellt; seine Position weicht von der Zielposition um  $\Delta s = 6$  Skalenteile ab (Situation A). Es soll mit dem rechts dargestellten Präzisionsantrieb justiert werden. Dazu muss dieser zunächst mit dem Objekt verbunden werden. Diese Verbindung wird durch die topfförmige Struktur, die den Quader umklammert, angedeutet. Aufgrund dieser festen Kopplung führt das Objekt dann dieselbe Bewegung wie der Antrieb aus (B).

Die Kopplung muss spielfrei in beide Bewegungsrichtungen wirken, um ein eventuelles Überfahren der Zielposition korrigieren zu können (**Bild 4, C**).



**Bild 4** Direkte Kopplung (2)

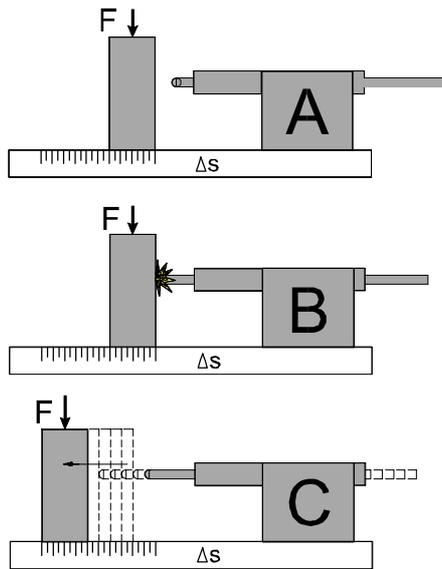
Hat das Objekt seine Zielposition erreicht, muss seine Lage gesichert werden; in Bild 4/D ist dazu eine Klebefuge angedeutet. Bis zur Aushärtung des Klebstoffes muss der im Eingriff befindliche Antrieb positionsgenau stehen bleiben. Schließlich ist die Kopplung zu öffnen, wobei die Gefahr besteht, die Objektposition wieder zu verändern. Dieses Vorgehen stellt sehr hohe Genauigkeitsforderungen an die verwendeten Antriebe, Führungen und Lageregelungen. Weiterhin ist der Zeitaufwand für die Justage sehr hoch. Als Beispiel für eine mehrachsige Justierung nach diesem Verfahren zeigt **Bild 5** ein kommerziell angebotenes Faser-Positioniersystem für Lichtwellenleiter [3]. Dabei sind DC-Getriebemotoren mit Piezotranslatoren zur Feinjustage kombiniert. Die Wiederholgenauigkeit wird mit 100 nm angegeben.



**Bild 5** Faser-Positioniersystem [3]

#### 1.3.2 Stoßjustierung

Bei der Stoßjustierung ist das Objekt schon montiert oder vorgespannt (Anpresskraft  $F$  in **Bild 6**), verändert also seine Lage ohne äußeres Zutun nicht mehr. Zur Korrektur der Positionsabweichung des Objektes wird hier ein Mikrohammer eingesetzt. Der Läufer dieses Antriebes wird auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt und prallt dann auf das Objekt. In Abhängigkeit von seiner kinetischen Energie wird dabei die Position des Objekts um eine kleine Wegstrecke verändert. Durch eine Vielzahl von Stößen wird so die Fehlposition des Objektes korrigiert (Bild 6/C). Auf nachfolgende zusätzliche Montageschritte zur Sicherung der Position kann verzichtet werden, da das Objekt bereits vor der Justierung montiert war.

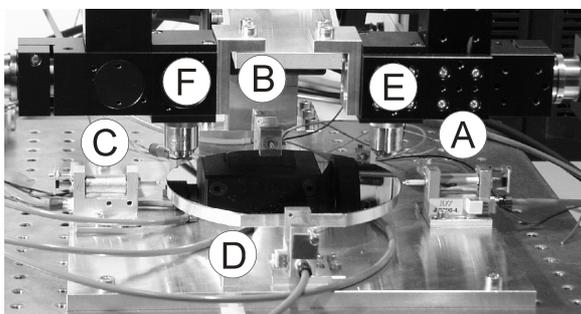


**Bild 6** Stoßjustierung

Besonders bei Anwendungen aus der Feinwerk- und Mikrotechnik kann dieses Verfahren vorteilhaft eingesetzt werden. Durch kurzzeitiges Überwinden der Haftreibung werden kleine Schrittweiten ermöglicht, die eine präzise Justage mit Auflösungen bis in den Bereich von 50 bis 100 nm erlauben.

Wird durch zu viele Stöße bzw. durch Ausreißer bei der Schrittweite der letzten Stöße die Zielposition überfahren, muss mit einem zweiten Hammer von der Gegenseite wieder korrigiert werden. Dazu ist es erforderlich, die aktuelle Position des Objektes zu erfassen, da sonst ein Vergleich mit der Sollposition nicht durchgeführt werden kann. Für einen Serienprozess gut geeignet ist eine optische Positionserfassung mit rechnergestützter Bildverarbeitung, die keine Ankopplung von Messeinrichtungen an das Objekt erforderlich macht.

**Bild 7** zeigt einen derartigen Aufbau zur Justierung flacher Scheiben. Es sind 4 Schlagantriebe zur Justierung in zwei Achsen angeordnet (A-D); Die Position wird optisch erfasst (E, F) und in Verbindung mit einer Bildverarbeitungssoftware auf dem PC ausge-



**Bild 7** Stoßjustieranordnung [4]

wertet. Mit dieser Anordnung wird innerhalb der kurzen Zeit von 10-30 s eine translatorische Positionsabweichung von 30–50  $\mu\text{m}$  auf Werte unter 0,4  $\mu\text{m}$  korrigiert. Bei größeren Dejustierungen der Scheibe sind mehrere Justierdurchgänge erforderlich, die zu einer entsprechenden Verlängerung der Justierdauer führen.

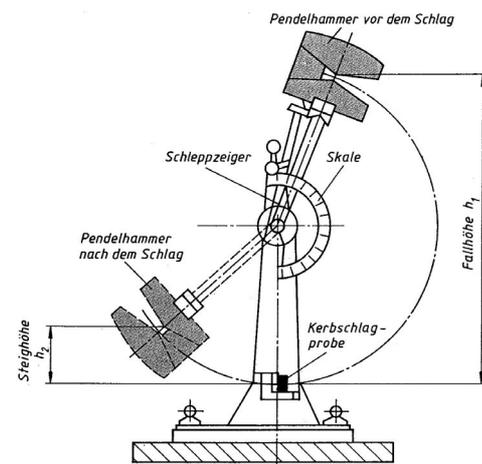
Bei günstiger Auslegung des Hubes der Stoßantriebe, evtl. in Verbindung mit einer schnellen, groben Vorpositionierung, erlaubt dieses Verfahren eine schnelle Justierung in einem Fließprozess. Es ist nicht notwendig, eine Kopplung mit dem zu positionierenden Objekt aufzubauen bzw. später wieder aufzulösen.

## 2 Justierantrieb

### 2.1 Form der Bewegung

Die Stoßjustierung beruht auf der Einleitung kinetischer Energie in das Objekt. Dazu können verschiedene Bewegungen genutzt werden.

#### 2.1.1 Rotierende Bewegung



**Bild 8** Pendelhammer [5]

Beim Kerbschlagbiegeversuch wird eine Probe durch einen Pendelhammer stoßartig belastet (**Bild 8**). In der Werkstoffprüfung wird mit dieser Anordnung die Kerbschlagzähigkeit bestimmt.

Die Energie wird dabei über die Fallhöhe des Hammers eingestellt. Kann dieses Verfahren auch für die Stoßjustierung genutzt werden?

Vorteilhaft ist die einfache Gestaltung der Lagerung in Form eines Drehlagers. Für die angestrebte automatisierte Justierung ist die Drehbewegung jedoch ungünstig: Der Hammer muss zunächst auf die erforderliche Höhe angehoben werden; für einen automatisierten Betrieb ist dazu die Erfassung der

tisierten Betrieb ist dazu die Erfassung der Lage des Hammers erforderlich. In der richtigen Höhe muss der Hammer dann festgehalten werden, wobei die Arretierung bei der Auslösung des Stoßes aufzuheben ist und den Hammer im Fallen nicht mehr beeinträchtigen darf.

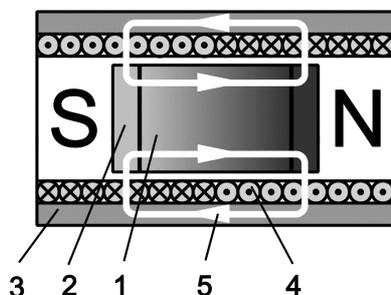
Beim Kerbschlagbiegeversuch wird die Energie des Hammers vorwiegend in die Deformation der Probe umgesetzt. Bei der Impulsjustierung darf der Stößel dagegen nur einmal auftreffen und muss dann sofort wieder vom Objekt wegbewegt werden; hier tritt das Trägheitsmoment der rotierenden Masse störend in Erscheinung. Auch die Realisierung einer hohen Schlagfrequenz ist damit in Frage gestellt.

Versuche mit einem Drehstoßhammer haben diese Nachteile bestätigt [12]. Zur Durchführung der Stoßbewegung wird deutlich mehr Zeit benötigt als bei Systemen mit geradliniger Bewegung; dadurch beträgt die maximale Stoßfrequenz beim Drehstoßhammer mit 1 bis 2 Hz auch nur etwa ein Zehntel des Wertes dieser Systeme. Vorteilhaft ist hingegen die Möglichkeit, mit einem Stoßhammer das Objekt aus zwei Richtungen anschlagen zu können. Dies geht jedoch einher mit einem entsprechend hohen Platzbedarf für die gesamte Anordnung.

### 2.1.2 Translatorische Bewegung

Demgegenüber erfolgt in vielen Bereichen der Technik die Übertragung kinetischer Energie durch geradlinige Bewegungen. Beispielhaft sind Werkzeuge zur Bearbeitung harter Materialien wie Bohr- oder Presslufthammer zu nennen. Diese Beispiele zeigen, dass bei Großserien-Anwendungen, die eine schnelle bis sehr schnelle Richtungsumkehr erfordern, geradlinige Bewegungen mit großem Erfolg eingesetzt werden.

Die kinetische Energie kann bei der Konstruktion des Antriebes grob durch die Masse des Stößels festgelegt werden; bei einem vorhandenen Antrieb erfolgt die Feineinstellung über die Geschwindigkeit. Als Hauptnachteil ist die Erfordernis einer Führung für die Längsbewegung anzusehen, deren Gestaltung deutlich aufwendiger als die eines Lagers für eine rotierende Bewegung ist.



**Bild 9** Elektrodynamisches Antriebsprinzip

## 2.2 Antriebsprinzip

Zur Generierung der Stoßimpulse wird ein elektrodynamischer Lineardirektantrieb eingesetzt. **Bild 9** zeigt den rotationssymmetrisch aufgebauten Antrieb im Längsschnitt.

Der axial polarisierte Permanentmagnet 1 bildet zusammen mit den Polschuhen 2 und dem Rückschluss 3 den magnetischen Kreis. Im Luftspalt befindet sich die Antriebspule 4. Fließt durch diese vom magnetischen Fluss 5 in radialer Richtung durchsetzte Spule ein Strom in Umfangsrichtung, wirkt zwischen Spule und Magnetsystem eine Kraft in axialer Richtung. Damit sich die Kraftwirkungen über den Polschuhen nicht aufheben, ist es erforderlich, die Antriebspule in zwei Teilwicklungen mit gegenläufigem Umlaufsinn des Stromes aufzuteilen.

## 2.3 Dimensionierung

Zur Berechnung der Antriebe werden neben analytischen Berechnungen vor allem Simulationen nach der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Aus der Vielzahl der Motorparameter seien drei wichtige Optimierungskriterien herausgegriffen.

### 2.3.1 Kinetische Energie

Die kinetische Energie, die der Stößel beim Aufprall auf das Objekt besitzt, muss mindestens so groß sein, dass die auftretende Stoßkraft die Haftreibung zwischen Objekt und der Oberfläche, auf der es montiert ist, übersteigt. Kommt das Objekt ins Gleiten, ist die Schrittweite des Objekts von der Energie des Stößels abhängig.

Die Haftreibung wird unter anderem von der Vorspannkraft und der Werkstoffpaarung beeinflusst, so dass die erforderliche kinetische Energie jeweils an die Justieraufgabe anzupassen ist. Der Antrieb ist dabei so zu dimensionieren, dass er in kurzer Zeit und innerhalb des zur Verfügung stehenden Hubes diese Energie erreicht.

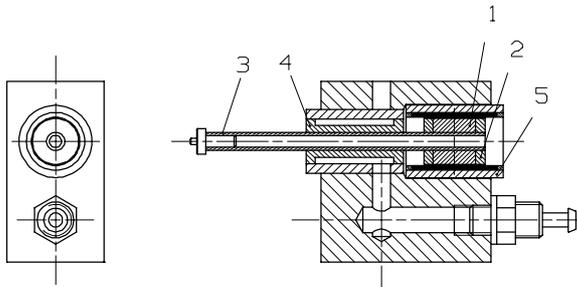
Steht eine ausreichende Beschleunigungsstrecke zur Verfügung, kann eine hohe Energie über eine entsprechend hohe Geschwindigkeit des Läufers eingestellt werden. Zur Abdeckung einer großen Breite von Justieraufgaben mit einer breiten Streuung der erforderlichen Stoßenergie ist jedoch eine Antriebsbaureihe erforderlich. Dadurch können die Masse des Läufers sowie die Kraftentfaltung bzw. das Beschleunigungsvermögen des Antriebes für die jeweilige Justieraufgabe optimiert werden.

Werden niedrige Impulsenergien benötigt, kann ein sehr kompakter Aufbau realisiert werden, wenn Teile des Magnetkreises in einen hohlen Läufer eingebaut

werden (siehe **Bild 11**). Bei größeren Energien erhalten Magnet und Polschuhe Bohrungen, so dass sie außen auf dem Läufer angebracht werden können (**Bild 10**).

### 2.3.2 Anordnung der Führung

Wie in Kapitel 3 näher ausgeführt wird, ist eine aerostatische Führung des Stößels erforderlich. Dabei können Lager und Antrieb unterschiedlich angeordnet werden.



**Bild 10** Antrieb mit separater Führung

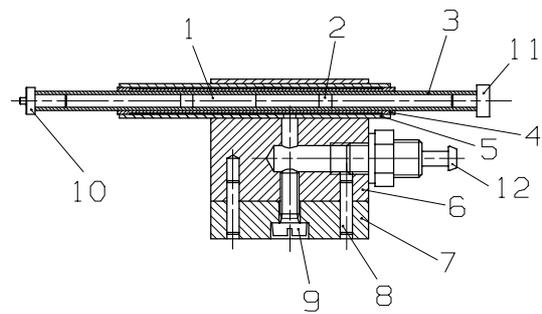
Bild 10 zeigt eine Variante, bei der Führung und Antrieb räumlich getrennt sind. Rechts ist der Antrieb dargestellt, dessen Magnetkreis aus Magnet (1), Polschuhen (2) und Rückschluss (5) gebildet wird. Die auf eine Messinghülse gewickelte Spule ist zwischen Magnet und Rückschluss angeordnet; sie ist sehr dünn ausgeführt und als schmaler schwarzer Streifen zu erkennen.

Die Luftführung ist links vom Antrieb angeordnet; die Buchse (4) wird über Kanäle im Gehäuse mit Druckluft versorgt. Als Kontaktfläche zum Objekt und zum Schutz des Keramikläufers ist eine Stoßspitze aus Messing (3) angebracht.

Dagegen befinden sich bei dem in Bild 11 gezeigten Antrieb Magnete (1) und Polschuhe (2) in einem hohlen Läufer. Die Antriebswicklung ist auf die Buchse (4) der Luftführung aufgebracht und tritt im Bild wieder nur als schmaler schwarzer Streifen in Erscheinung. Führungsbuchse und Spule sind vom Rückschluss (5) umgeben. Bedingt durch die konstruktiven Abhängigkeiten ist bei dieser Lösung ein funktionsfähiger Kompromiss zwischen der Optimierung des Antriebes und des Lagers zu finden.

### 2.3.3 Kennlinie

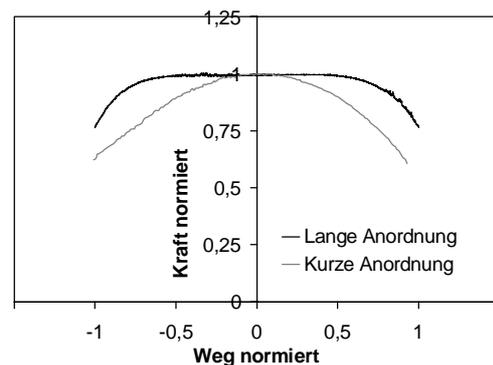
**Bild 12** zeigt die gemessenen Kraft-Weg-Kennlinien der im letzten Abschnitt gezeigten Linearantriebe. Dargestellt ist jeweils die (normierte) Kraft des Läufers in Abhängigkeit der Position im Gehäuse, wobei der Strom konstant gehalten wird. Während bei der langgestreckten Anordnung (siehe Bild 11) ein breiter Bereich konstanter Kraft vorhanden ist, zeigt die Kennlinie der kurzen Anordnung (Bild 10) kein



**Bild 11** Antrieb mit integrierter Führung

ausgeprägtes Plateau. Wird die Geschwindigkeit des Antriebes geregelt, kann eine derart ungünstige Kennlinie ausgeglichen werden, da die Geschwindigkeit ständig gemessen und an den Sollwert angeglichen wird.

Für einen vereinfachten, gesteuerten Betrieb ohne Erfassung und Regelung der Geschwindigkeit ist dagegen ein Kennlinienabschnitt mit konstanter Kraftentfaltung notwendig. Damit wird es möglich, ohne Kenntnis der Läuferposition allein über den Strom und die Dauer der Beschleunigung die gewünschte Geschwindigkeit zu erzielen.



**Bild 12** Kraft-Weg-Kennlinien

## 3 Führung

### 3.1 Anforderungen

Um die Stoßjustierung schnell und exakt durchführen zu können, ist eine hohe Reproduzierbarkeit der bei den Stößen erreichten Schrittweiten anzustreben. Dazu ist es notwendig, die Schwankungsbreite der kinetischen Energie und der Stoßkraft zu minimieren.

Für Justierungen aus dem Bereich der Mikrotechnik muss der Antrieb auch niedrigste Energien präzise bereitstellen können.

Beide Zielsetzungen erfordern eine möglichst reibungsarme Führung des Stößels, bei der keine Stick-Slip-Effekte auftreten. Die Führung muss dabei die

Radialkräfte aus dem magnetischen Kreis sowie aus dem Stoß aufnehmen.

### 3.2 Bauart

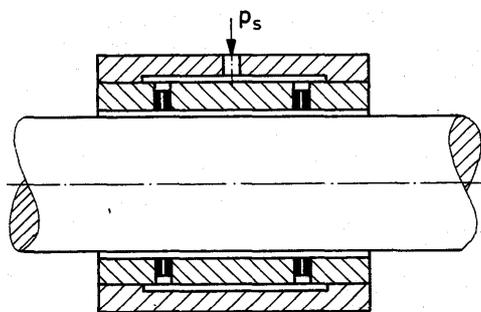
Gleitführungen scheiden wegen der auftretenden Losbrecheffekte sowie der insgesamt zu hohen Reibwerte aus. Bei Wälzführungen treten zusätzliche mitzubewegende Massen (z. B. bei Kugelbüchsen oder Kugelumlaufführungen) ebenfalls störend in Erscheinung und setzen die Dynamik des Antriebes herab. Eine Aufhängung durch Blattfedern ist wegen der Hübe von mehreren mm nicht in kleinem Bauraum zu realisieren.

Für die beschriebene Zielsetzung ist also eine Führung anzustreben, bei der keine Festkörperreibung auftritt und die insgesamt sehr niedrige Reibungswerte aufweist. Hierfür kommen Magnet- sowie Gasführungen in Betracht.

Für die Lagerung rotierender Wellen werden permanentmagnetische oder, mit erheblich höherem Aufwand, geregelte elektromagnetische Lager eingesetzt [6], [7]. Für die vorliegende Linearbewegung sind diese jedoch ungeeignet.

Statt dessen bietet sich die Verwendung einer Luftführung an. Bei aerodynamischen Lagerungen für Rotationsbewegungen wird mit Hilfe geometrischer Strukturen (z. B. Rillen) durch eine schnelle Relativbewegung zwischen Welle und Lagerhülse Luft in den Lagerspalt gepumpt. Bei dem hier zu lagernden Stoßantrieb treten nur geringe Relativgeschwindigkeiten auf; die höchste Lagerbelastung tritt außerdem im Moment des Stoßes auf, wobei die Geschwindigkeit auf Null absinkt und somit aerodynamisch keine Luft in den Lagerspalt gedrückt werden kann. Eine aerodynamische Führung kommt also nicht in Betracht.

Demgegenüber wird bei einer aerostatischen Führung die aufbereitete Druckluft von außen in den Lagerspalt gepresst, so dass der tragende Luftfilm auch bei Stillstand des Stößels vorhanden ist. Obwohl keine Rotation auftritt, bietet sich aus fertigungstechni-



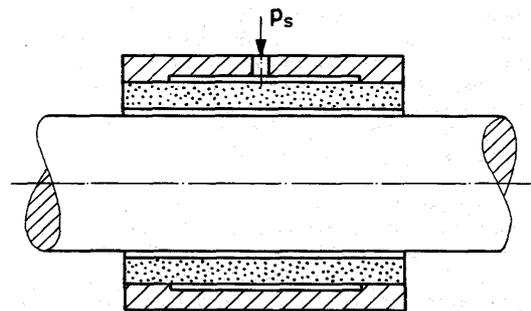
**Bild 13** Düsenlager [8]

schen Gründen dennoch eine rotationssymmetrische Gestaltung der Linearführung an.

### 3.3 Gestaltung der Führung

Aerostatische Lager und Führungen können durch einzelne Düsen in der Lagerhülse realisiert werden (**Bild 13**).

Wegen der hohen Anforderungen an die Geometrie (es handelt sich bei den Düsen nicht um einfache Bohrungen) ist die Herstellung jedoch sehr aufwendig. Statt dessen können die Lagerbuchsen auch aus porösem Material hergestellt werden (**Bild 14**).



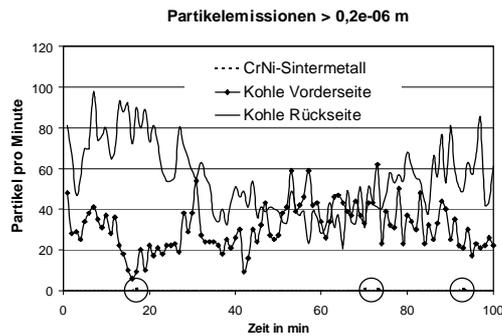
**Bild 14** Lager aus porösem Material [8]

Geeignet zur Herstellung der Buchsen sind offenporöse Materialien wie Kunstkohle oder Sintermetalle. Neben der Bearbeitbarkeit ist bei der Materialauswahl auch dem Einsatzzweck Beachtung zu schenken.

Viele Justieraufgaben aus der Mikrotechnik werden in Reinräumen durchgeführt; alle beteiligten Komponenten, also auch der Justierantrieb, haben dabei Einfluss auf die Partikelkonzentration.

Um die Eignung verschiedener Lagerwerkstoffe für den Einsatz im Reinraum zu prüfen, wurden die Partikelemissionen der Luftlager im Reinraum ermittelt. In **Bild 15** sind die Ergebnisse für Kohle- und Metalllager gegenübergestellt. Dazu wurde ein Antrieb mit einer Sinterkohle-Führung sowie einer mit einer Führung aus CrNi-Sintermetall aufgebaut. Während der Stößel zwischen zwei Anschlägen hin- und herlief, wurden die Partikelemissionen an der vorderen und hinteren Stirnseite der Führung erfasst. Beim Kohlelager sind über die gesamte Messzeit kontinuierlich Emissionen festzustellen. Dagegen werden beim metallischen Lager nahezu keine Partikel freigesetzt (einzelne Partikel nach ca. 15, 70, 74 und 93 min., durch Kreise hervorgehoben).

Bei Anwendungen, die besonders kritisch hinsichtlich der Emission von Partikeln sind, sollten also metallische Lager zum Einsatz kommen.



**Bild 15** Partikelmessungen an Luftlagern [9]; kontinuierliche Emission bei Kohlebuchse, lediglich einzelne Partikel bei CrNi-Sintermetall-

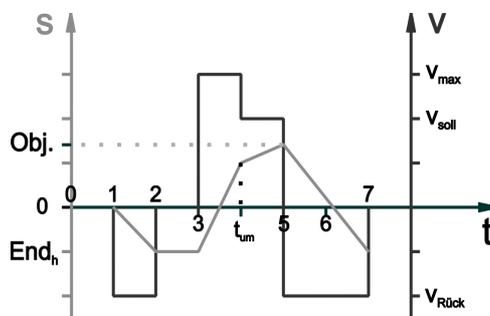
Allerdings ist die Bearbeitung der porösen Metalle aufwendig. Bei der Lagerbohrung sind niedrige Maßtoleranzen und eine hohe Oberflächengüte erforderlich; dazu sind entweder spanende Bearbeitungsverfahren wie Bohren, Reiben und Honen oder aber abtragende Verfahren wie Funkenerosion anzuwenden. In jedem Fall werden dabei jedoch die Durchflusseigenschaften des Materials verschlechtert, meist in nicht vorhersagbarer Weise. Grosses Augenmerk war deshalb auf die Entwicklung geeigneter Verfahren zur Bearbeitung zu legen.

Als Läufermaterial wurden geschliffene bzw. polierte Keramikstäbe ausgewählt. Die niedrige Dichte hat eine geringe Masse zur Folge; durch den im Vergleich zur Buchse niedrigeren Temperaturexpansionskoeffizient wird ein Verklemmen der Führung durch zu starke Ausdehnung des Läufers gegenüber der Buchse vermieden.

## 4 Regelung

Es wurde bereits angesprochen, dass der Stoßantrieb geregelt oder, bei geeigneter Kennlinienform, gesteuert betrieben werden kann. Hier soll der geregelte Betrieb dargestellt werden.

**Bild 16** zeigt den Bewegungsablauf des Stößels:



**Bild 16** Prinzipieller Bewegungsablauf

Zunächst ist dessen Position unbekannt. Um eine definierte Ausgangsposition für den Stoß zu schaffen, wird der Stößel deshalb vor dem Beginn der Justage (Zeitpunkt 1) in die hintere Endlage  $End_h$  bewegt, die zum Zeitpunkt 2 erreicht ist. Dort verbleibt er bis zur Anforderung des Impulses (3).

Wird ein Stoß angefordert (3), bewegt sich der Antrieb mit maximaler Geschwindigkeit  $v_{max}$  zum Objekt hin. Ausreichend weit vor dem Aufprall (Umschaltzeitpunkt  $t_{um}$ ) wird der Läufer auf die erforderliche Geschwindigkeit  $v_{soll}$  abgebremst, die der gewünschten kinetischen Energie beim Auftreffen (Zeitpunkt 5) entspricht. Zur Vermeidung von Prellwirkungen, die das Justierergebnis verfälschen würden, muss der Läufer unmittelbar nach dem Stoß in die Ausgangslage bewegt werden (Rückholgeschwindigkeit  $v_{Rück}$ ). Zum Zeitpunkt 7 befindet sich der Stößel wieder in der hinteren Endlage und ist bereit für einen weiteren Impuls.

Im Folgenden wird die Realisierung zweier Teilaufgaben der Regelung dargestellt.

### 4.1 Einstellen der Geschwindigkeit

Das Justageprinzip basiert auf der Einleitung von Impulsen mit definierter kinetischer Energie; wegen des quadratischen Einflusses auf die Energie ist die Geschwindigkeit des Stoßkörpers beim Auftreffen sehr exakt einzustellen. Der zugehörige Geschwindigkeitsregelkreis benötigt eine Information über die Ist-Geschwindigkeit.

Um Aufwand und Kosten niedrig zu halten, sollte diese Geschwindigkeit ohne die Verwendung zusätzlicher, externer Meßsysteme erfasst werden. Es bietet sich an, die bei der Bewegung des permanentmagnetischen Läufers im Spulensystem des Stators induzierte Spannung heranzuziehen:

$$u_{ind} = B \cdot l \cdot v$$

Die Induktionsspannung  $u_{ind}$  ist proportional zur senkrechten Komponente der magnetischen Flussdichte  $B$ , zur Leiterlänge  $l$  sowie zur Geschwindigkeit  $v$  des Läufers. Die Optimierung der Flussdichte sowie der Leiterlänge führt sowohl zu einem hohen Betrag der Induktionsspannung, als auch zu einer hohen Kraftentfaltung des Antriebes:

$$F = B \cdot l \cdot I$$

(Mit  $F$ : Kraft,  $I$ : Strom). Allerdings sind relevante Parameter wie die Größe des Wicklungsfensters oder die Anzahl der Windungen nicht beliebig zu wählen. Eine zu große Leiterlänge hat einen entsprechenden ohmschen Widerstand zur Folge, der eine hohe Versorgungsspannung bedingt; außerdem ist wegen des

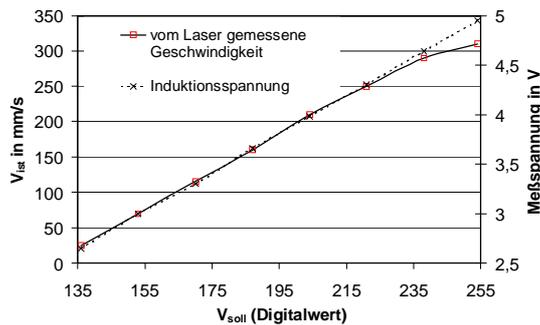
Zusammenhangs mit der Stromanstiegszeit die Induktivität der Spule zu beachten.

Bei einer in diesem Sinne sinnvollen Auslegung des Motors bewegt sich die Induktionsspannung im Bereich einiger Millivolt, während die Betriebsspannung des Antriebes um etwa den Faktor 400 höher liegt. Deshalb müssen einige Anstrengungen unternommen werden, um dieses Spannungssignal nutzen zu können.

So wird das Signal nach einer Verstärkerstufe geglättet; nach Anhebung der Mittelspannung erfolgt die Analog-Digital-Wandlung, so dass die weitere Verarbeitung in einem Mikroprozessor durchgeführt werden kann. Dort erfolgt der Vergleich zwischen Soll- und Istgeschwindigkeit. Das vom Prozessor erzeugte Signal für die Endstufe wird über einen nachgeschalteten Digital-Analog-Wandler in eine Analogspannung umgesetzt. Schließlich liefert ein Leistungs-Operationsverstärker die zum Betrieb des Motors erforderliche Leistung.

Zur Überprüfung und Kalibrierung der Geschwindigkeitsregelung wurde die Position des Läufers zusätzlich extern mit einem Triangulationslaser erfasst; durch Differenzierung kann aus dem Wegsignal die Geschwindigkeit ermittelt werden.

**Bild 17** zeigt neben der Induktionsspannung (punktiert) das differenzierte Wegsignal des Lasers. Auf der Abszisse ist dabei der digitale Geschwindigkeits-Sollwert des Prozessors aufgetragen; der dargestellte Bereich gibt die Bandbreite zwischen Minimal- und Maximalgeschwindigkeit des verwendeten Antriebes wieder. Die gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufes zeigt die Eignung der internen Geschwindigkeitsmessung. Erst im Bereich hoher Geschwindigkeiten (rechts) ist eine immer deutlicher werdende Abweichung festzustellen, deren Ursache jedoch im Laser zu suchen ist. Tiefpässe in der Laserbeschaltung haben zur Folge, dass der Laser eine zu niedrige Geschwindigkeit suggeriert.



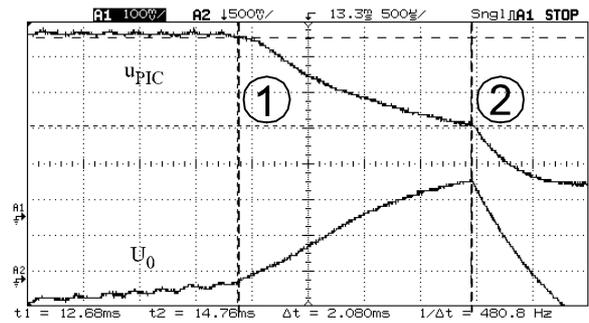
**Bild 17** Geschwindigkeitsmessungen

Neben der Istwert-Bestimmung für die Regelung kann die Geschwindigkeitsmessung auch zur Kontrolle der Schrittweite des Objekts herangezogen werden. Dazu wird die Geschwindigkeit des Stößels

vor und nach dem Stoß erfasst. Aus dem Verhältnis dieser beiden Werte kann auf die Schrittweite geschlossen werden [12].

## 4.2 Erkennen des Auftreffens

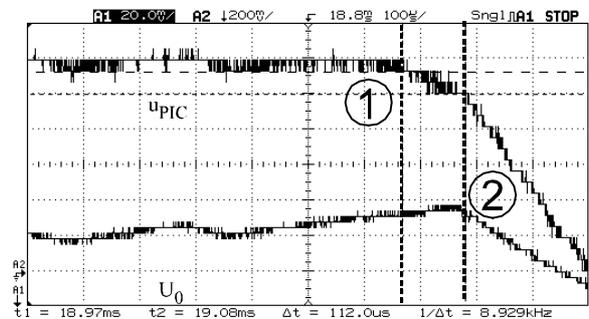
Nach erfolgtem Stoß muss der Stößel sofort vom Objekt wegbewegt werden, um ein erneutes Anschlagen während des Gleitens des Objekts (Prellen) zu verhindern. Dazu muss jedoch zunächst das Auftreffen auf dem Objekt erkannt werden.



**Bild 18** Verzögerte Objekterkennung [10]

Es liegt nahe, hierzu die Vorzeichenumkehr der Induktionsspannung zu nutzen. **Bild 18** zeigt oben die aufbereitete Induktionsspannung ( $u_{PIC}$ ). Am Punkt 1 trifft der Stößel auf dem Objekt auf. Die analoge Signalaufbereitung führt jedoch dazu, dass die Flankensteilheit des Spannungssignales deutlich herabgesetzt wird, so dass die Induktionsspannung zunächst nur langsam abfällt. Bis sie ihren Nulldurchgang erreicht (Punkt 2) vergehen 2 ms. Bis zu diesem Zeitpunkt erkennt die Regelung eine Unterschreitung der Sollgeschwindigkeit und versucht deshalb weiterhin, den Antrieb in Richtung Objekt zu beschleunigen (untere Kurve: Ausgangsspannung  $U_0$ ). Wie bereits ausgeführt ist dies jedoch unbedingt zu vermeiden.

Zur Verbesserung der Stoßererkennung wurde deshalb als zusätzliches Kriterium der Betrag der Istge-



**Bild 19** Verbesserte Objekterkennung [10]

schwindigkeit des Stößels herangezogen. Im Regelbetrieb schwankt die Geschwindigkeit nur geringfügig; eine Unterschreitung der Sollgeschwindigkeit um 2 % tritt dabei nicht auf. Die Regelung wurde deshalb dahingehend ergänzt, dass eine Geschwindigkeitsabweichung in diesem Masse als Aufprall interpretiert wird und zum Start der Rückholbewegung führt.

**Bild 19** zeigt das Verhalten der Regelung bei Berücksichtigung des Geschwindigkeitskriteriums. Bereits nach einer Zeit von nur 0,1 ms wird das Auftreffen erkannt und der Läufer vom Objekt weg beschleunigt.

## 5 Ergebnisse und Ausblick

Die beschriebenen Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert [11]. Das Forschungsthema wurde als Gemeinschaftsprojekt vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena (Justierprinzip [12]) sowie vom Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik an der Universität Stuttgart (Stoßantrieb mit aerostatischer Führung [13]) bearbeitet. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass mit der Stoßjustierung ein geeignetes Verfahren zur Präzisionsjustage in der Feinwerk- und Mikrotechnik zur Verfügung steht.

Durch entsprechende Dimensionierung der Stoßantriebe kann ein breiter Anwendungsbereich abgedeckt werden. Die Verwendung einer aerostatischen Führung eliminiert störende Stick-Slip-Effekte in der Lagerung. Damit ist die Erzeugung reproduzierbarer Stoßimpulse auch niedriger Intensität sichergestellt. Für den Einsatz im Reinraum wurden geeignete Lagerwerkstoffe ermittelt, die sich durch niedrige Partikelemissionen im Betrieb auszeichnen.

Bei Anwendungen, die eine sehr exakte Dosierung der Energie erfordern, kann die Geschwindigkeit geregelt werden, wobei ein Messverfahren ohne äußere Hilfsmittel zur Verfügung steht.

Die Stoßjustierung kann damit zur kostengünstigeren Durchführung von bisher auf andere Art und Weise realisierten Justageaufgaben herangezogen werden. Zusätzlich können jedoch auch neue Anwendungen abgedeckt werden, für die bisher kein adäquates Verfahren zur Verfügung stand.

## 6 Literatur

- [1] Friedrich Hansen: Justierung. Berlin: VEB Verlag Technik, 1967.
- [2] Ramona Eberhardt, Ulrich Gengenbach: Montagelösungen für hybride Mikrosysteme. F&M 3-2000, S. 40ff.
- [3] Katalog: CAT 110-D-07/93.13, S. 6.13. Waldbronn: Physik Instrumente, 1993.
- [4] Thaut, M.: Untersuchungen zur automatisierten Justage mittels Impulsantrieben für die Feinwerk- und Mikrotechnik; Studienarbeit Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena: 2001.
- [5] Seidel, Wolfgang: Werkstofftechnik. München: Hanser 1990.
- [6] Fremerey, J. K.: Berührungslose permanentmagnetische Lager; in: Bartz, J. et al: Luftlagerungen. 2. Auflage, Ehningen: Expert-Verlag, 1993; ISBN 3-8169-0992-2.
- [7] Traxler, A.: Aktive Magnetlager und ihre Anwendung; Lehrgang Luftlagerungen – Grundlagen und Anwendungen. Ostfildern, Technische Akademie Esslingen: 16.-18. Februar 2000.
- [8] Schmidt, J.: Grundlagen und Stand der Technik der Luftlagerungen; in: Bartz, J. et al: Luftlagerungen. 2. Auflage, Ehningen: Expert-Verlag, 1993; ISBN 3-8169-0992-2.
- [9] Gommel, U.: Untersuchung der Reinraumtauglichkeit an Luftlagerkomponenten; Messbericht Fraunhofer-Institut Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart: 2000.
- [10] Bührlé, R.: Geschwindigkeitsmessung und –regelung eines Lineardirektantriebs; Studienarbeit Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart: 1999.
- [11] Abschlußbericht zur Sachbeihilfe „Automatisierte Justage mit aerostatisch gelagertem Impulsantrieb für die Feinwerk- und Mikrotechnik“; Deutsche Forschungsgemeinschaft, Bonn, Jena und Stuttgart: 1998-2001.
- [12] Siebenhaar, C.: Präzisionsjustierungen durch Einleitung von mechanischen Impulsen; Dissertation TU Ilmenau: 2000; für 2001 Veröffentlichung in den Fortschritt-Berichten des VDI vorgesehen.
- [13] Pröger-Mühleck, R.: Entwicklung eines geschwindigkeitsgeregelten luftgelagerten Lineardirektantriebs zum Einsatz als Impulsantrieb bei der Stoßjustierung; geplante Dissertation, Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik, Stuttgart: voraussichtlicher Abschluss 2001.

**Neue Telefon- und Telefaxnummer:**

**Telefon: +49 (0)711 685 – 6 6402**

**Telefax: +49 (0)711 685 – 6 6356**

**Neue E-Mail-Adressen:**

**ikff@ikff.uni-stuttgart.de**

**linearantriebe@ikff.uni-stuttgart.de**

**piezoantriebe@ikff.uni-stuttgart.de**

**spritzguss@ikff.uni-stuttgart.de**

**zuverlaessigkeit@ikff.uni-stuttgart.de**