

### Einleitung

Das Erreichen von Unsicherheiten im Bereich weniger Nanometer in Verbindung mit einem Verfahrbereich von einigen 100 mm - das ist eine Zielstellung, die Forschergruppen weltweit beschäftigt.

Im Rahmen des SFB 622 untersucht das IMMS die Grundlagen für die Gestaltung von "Nanopositionier- und Nanomeßmaschinen"<sup>[1]</sup>. Der Grundgedanke hierbei ist die hochpräzise Positionierung eines Zerodur-Reflektors und die Messung der Bewegung in allen sechs Achsen mit Hilfe von Laserinterferometern, die auf einen thermisch stabilen Metrologierahmen montiert sind<sup>[2,3]</sup>. Eine große Herausforderung besteht in der lateralen Positionierung der Spiegelecke innerhalb eines großen Verfahrbereiches mit Reproduzierbarkeiten und sogar Unsicherheiten im Nanometerbereich. Lange kinematische Ketten, mechanische Resonanzen, Reibung, thermische Störungen wie auch positionsabhängige Änderungen des Übertragungsverhaltens sind hier die kritischen Faktoren und begrenzen die Einsatzfähigkeit konventionell strukturierter Systeme.

### Planarmotorkonzept

Vor diesem Hintergrund wurde ein Planarmotorkonzept für die laterale Positionierung des Reflektors in  $x$ ,  $y$  und  $\varphi_z$  entwickelt. Die Grundidee dabei ist, die Vorteile des Prinzips der integrierten Mehrkoordinatendirektantriebe für die Realisierung von Nanopositioniermaschinen (NPM) zu nutzen. Die einfache kinematische Struktur mit dem direkt angetriebenen Läufer als einzigem bewegten Teil ermöglicht die Verbindung von hoher Dynamik und hoher Präzision.

Für den Einsatz als NPM bestimmt jedoch nicht die Dynamik sondern die Maschinenmetrologie die Randbedingungen für die Konzeptentwicklung und die Dimensionierung der Komponenten. Hohe Positioniergeschwindigkeiten und hohe Beschleunigungen spielen eine untergeordnete Rolle, während die Reduzierung externer und interner Störungen gemeinsam mit der Optimierung des Systemübertragungsverhaltens in den Vordergrund rücken<sup>[4]</sup>.

Abb. 1 zeigt das Motorkonzept, bei dem durch die Kombination einer planaren aerostatischen Führung mit einem planaren Direktantrieb ein 3D-Positioniersystem ( $x$ ,  $y$ ,  $\varphi_z$ ) entsteht. Innerhalb eines Verfahrbereiches von  $\varnothing$  250 mm ist eine Positioniergeschwindigkeit von 5 mm/s, eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  und eine Regelabweichung von 0,5 nm angestrebt. Die Weg- und Winkelmessung erfolgt mit Hilfe eines 3D-Laserinterferometersystems. Die beiden Messköpfe werden an einem metrologischen Rahmen montiert und ermöglichen eine Messauflösung von 0,1 nm. Der Tragrahmen für die Führungselemente, der Kraftrahmen für die Antriebsspulen und der metrologische Rahmen für die

### Introduction

Positioning systems with uncertainties of just a few nanometers and travel ranges of 100 mm and higher - this is the ambition of many R&D institutes throughout the world. As a part of SFB 622, IMMS is researching the scientific foundations for "Nanopositioning- and Nanomeasuring Machines"<sup>[1]</sup>. The basic idea is to allow high-precision positioning of a Zerodur reflector and measure movement along all six axes using laser interferometers, which are mounted to a thermally stable metrology frame<sup>[2,3]</sup>. A major hurdle is to achieve lateral positioning of the reflector throughout a large traversing range with reproducibility and uncertainty values in the nanometer range. The critical factors are long kinematic chains, mechanical resonances, friction, thermal perturbations and position-dependent changes to the system transfer behaviour. These limit the utilizability of conventionally structured systems.

### Planar Motor Concept

With this background in mind, a planar motor concept was developed for lateral positioning of the reflector along the  $x$ ,  $y$  and  $\varphi_z$  axes. The basic idea is to utilize the advantages of integrated multi-coordinate direct drives to realize a Nanopositioning Machine (NPM). Since the directly driven slider is the sole moving part, the kinematic structure is simple. Thus, these drives allow for both high dynamics and high precision. However when used as an NPM, the general concept and dimensions are constrained by the machine metrology and not the dynamics. High positioning speeds and high accelerations are less important than reducing external and internal disturbances and optimizing the system transfer behaviour<sup>[4]</sup>.

Fig. 1 displays the motor concept wherein a planar aerostatic guide is combined with a planar direct drive to create a 3D positioning system ( $x$ ,  $y$ ,  $\varphi_z$ ). The objective is to achieve positioning speeds of 5 mm/s, accelerations

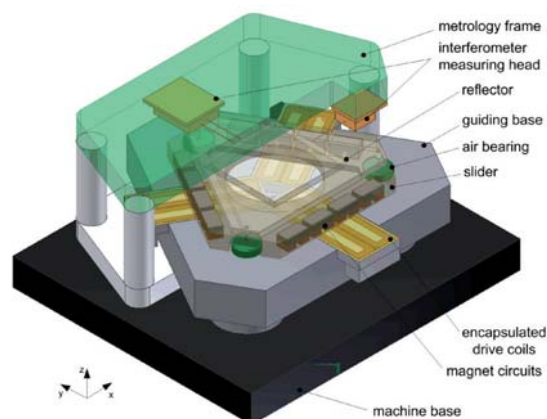


Abb. 1: Planarmotorkonzept  
Fig. 1: Planar motor concept

Laserinterferometer sind voneinander getrennt, um die gegenseitige Beeinflussung und vor allem thermische Störungen zu minimieren. Mit dem gleichen Ziel wird eine Einkapselung und Temperierung der Motorspulen vorgesehen.

Der integrierte 3D-Antrieb entsteht durch drei lineare Antriebseinheiten, die jeweils aus einem gestellfesten Flachspulenpaar und bewegten Dauermagnetkreisen am Läufer bestehen. Die drei Antriebskräfte wirken somit simultan und berührungsfrei auf den Läufer. Diese äußerst einfache Kinematik führt zu einem exzellenten Kraftübertragungsverhalten. Da die Vorteile dieses Antriebsprinzips erst mit einer reibungsfreien planaren Führung des bewegten Läufers voll zum Tragen kommen, wird der Läufer durch drei vakuumvorgespannte Luftlager gegenüber einer hochebenen Basisplatte abgestützt.

Grundsätzlich ist eine dreieckige oder eine viereckige Umsetzung des Planarmotorprinzips denkbar. Abb. 2 zeigt diese beiden Ausführungsvarianten im Grundriss. Die Konzeptentwicklung zeigte, dass für die beschriebenen Randbedingungen die Dreieckvariante deutliche Vorteile aufweist, da sie eine statisch bestimmte Läuferabstützung, einen kleineren Grundfläche, kleinere Läuferabmessungen und Massen und damit auch einen kleineren metrologischen Rahmen ermöglicht.

of  $1 \text{ m/s}^2$  and servo errors of  $0.5 \text{ nm}$  within a circular traversing range with a diameter of  $250 \text{ mm}$ . The path and angle measurements are performed using a 3D laser interferometer system. The two measuring probes are fastened to the metrology frame and offer a measurement resolution of  $0.1 \text{ nm}$ . The support frame for the guides, the force frame for the drive coils and the metrology frame for the laser interferometers are separated from each other to minimize reciprocal interference and, more importantly, thermal effects. With this same goal in mind, the motor coils are to be encapsulated and cooled.

The integrated 3D drive consists of three linear drive units, each containing one pair of flat coils affixed to the frame and moving permanent magnets on the slider. The three drive forces act simultaneously and without contacting the slider. This extremely simple kinematic design allows for excellent force transfer behaviour. Since the advantages of this drive principle are not fully realized until the moveable part is guided with frictionless planar bearings, the slider is supported above the highly planar base plate by three vacuum-pre-loaded air bearings.

In theory, both triangular and quadrangular implementations of the planar motor principle are conceivable. Fig. 2 displays an outline of these two possible variants. During

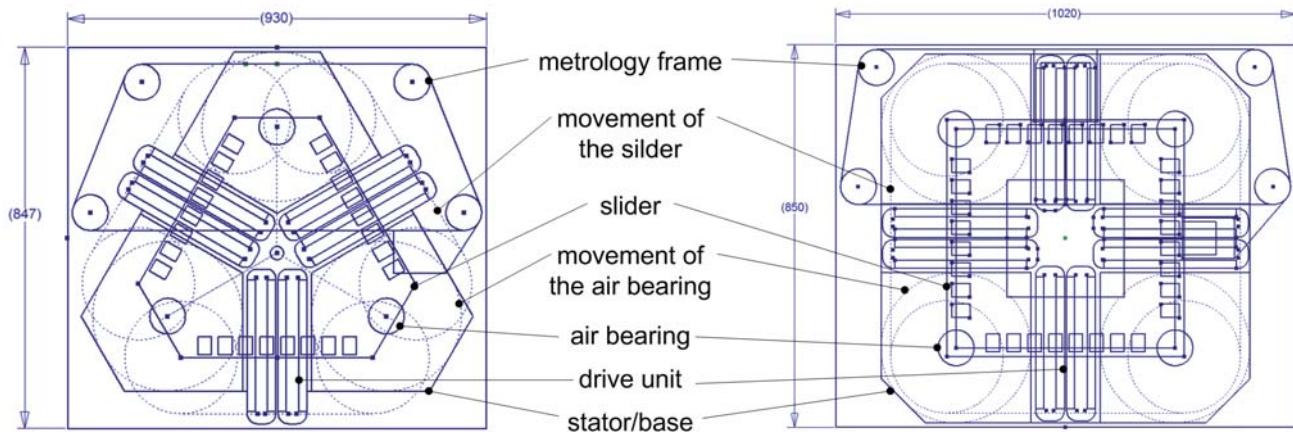


Abb. 2: Skizze der Dreieck- (links) und der Viereck-Konfiguration (rechts)  
Fig. 2: Sketch of triangular (left) and quadrangular configurations (right)

### Dimensionierung und Anordnung der Antriebseinheiten

Die Antriebseinheiten stellen das kritische Funktionselement dar, da ihre Auslegung und Anordnung auf der einen Seite die Antriebskräfte bestimmt, auf der anderen Seite aber auch die Abmessungen und Massen anderer Komponenten, z.B. des Läufers beeinflusst. Die Antriebskraft entsteht als Lorentzkraft bei einem Stromfluss durch die Spulenstränge, während eine Kommutierung der Spulenströme für eine positionsunabhängige Antriebskraft sorgt. Um Ummagnetisierungsverluste, Hysterese und eine vertikale Anziehung

the conceptualization phase, it was shown that with the boundary conditions as described above, the triangular version offers significant advantages, since it allows for a statically determined slider support as well as it offers smaller surface areas, smaller slider dimensions and masses. It is thus possible to use a smaller metrology frame.

### Dimensioning and Arrangement of Drive Units

The drive units are a key functional component of the system. This is due to the fact that their design and arrangement determine the drive forces as well as dimen-

zwischen Läufer und Stator zu verhindern, wird auf einen ferromagnetischen Rückschluss unterhalb der Spulen verzichtet. Für die optimale Auslegung der Antriebseinheiten stehen die Abmessungen (Höhe, Breite, Länge, Teilungsperiode) von Spulen und Magneten als Designparameter zur Verfügung, während eine Reihe zum Teil gegensätzlicher Designziele definiert wird:

- benötigte Beschleunigung  $1 \text{ m/s}^2$ ,
- Verfahrbereich  $\varnothing 250 \text{ mm}$
- Minimierung der Verlustleistung der Antriebsspulen
- Minimierung der Erwärmung der Antriebsspulen
- Minimierung der Läuferabmessungen und der bewegten Masse
- Einhaltung des verfügbaren Bauraumes.

Um das optimale Design zu finden, wird jeweils ein Designparameter durchgespielt und für jede Konfiguration die Antriebskraft mit Hilfe eines FEM-Modells berechnet. Weiterhin werden mit Hilfe physikalischer Modelle, die bewegte Masse, die benötigte Stromdichte, die Verlustleistung und die Spulenerwärmung für die jeweilige Konfiguration ermittelt. In einem iterativen Prozess werden so die optimalen Abmessungen für die Antriebseinheiten bestimmt. Abb. 3 zeigt die berechnete Verlustleistung in Abhängigkeit der Parameter Spulenhöhe und Magnetlänge. Es ist erkennbar, dass für eine bestimmte Magnetlänge eine optimale Spulenhöhe existiert, die die Verlustleistung minimiert. Außerdem wird deutlich, dass größere Magnetlängen zu geringeren Verlustleistungen führen, obwohl sie gleichzeitig auch die Läuferdimensionen und vor allem die bewegte Masse erhöhen. Im Ergebnis der Optimierung wurde ein Design ausgewählt, welches zu einer bewegten Masse von ca. 30 kg und einer Verlustleistung von ca. 125 W bei einer Nennbeschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  führt.

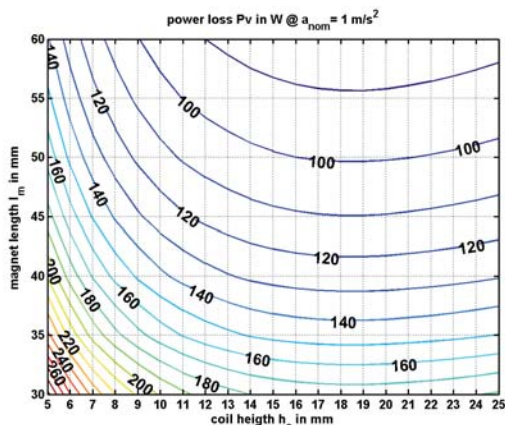


Abb. 3: Verlustleistung vs. Spulenhöhe, Magnetlänge  
Fig. 3: Power dissipation vs. coil height, magnet length

In der ausgewählten Dreieckskonfiguration des Planarmotors werden die drei Antriebseinheiten um  $120^\circ$  versetzt angeordnet, so dass sich die Einzelfahrbereiche der drei linearen

antriebsmassen anderer Komponenten wie der Armatur. Die Drive wird durch eine Lorentz-Kraft erzeugt, die durch den Stromfluss in der Spule entsteht. Diese Kraft bleibt unabhängig von der Position durch das Kommutieren der Spulenströme. Um Re-Magnetisierungsverluste, Hysterese und vertikale Anziehung zwischen der Armatur und dem Stator zu vermeiden, ist kein Rückblech unter den Spulen installiert. Die Drive-Einheiten können durch Modifizieren der Abmessungen (Höhe, Breite, Länge, Pitch) der Spulen und Magneten optimiert werden. Außerdem haben sich manchmal widersprüchliche Designziele ergeben:

- Required acceleration  $1 \text{ m/s}^2$ ,
- traversing range  $250 \text{ mm}$  diameter
- Minimization of power dissipation in drive coils
- Minimization of heating in drive coils
- Minimization of slider dimensions and moving mass
- Compliance with available installation space

Um das optimale Design zu finden, wird jeweils ein Designparameter über die Zeit variiert. Die Drive-Kraft wird auf Basis eines FEM-Modells für jede Konfiguration berechnet. Weiterhin werden physikalische Modelle verwendet, um die bewegte Masse, die benötigte Stromdichte, die Verlustleistung und die Spulenerwärmung für jede Konfiguration zu berechnen. Ein iterativer Prozess wird verwendet, um die optimalen Abmessungen für die Drive-Einheiten zu ermitteln. Abb. 3 zeigt die berechnete Verlustleistung als Funktion der Spulenhöhe und der Magnetlänge. Wie man sieht, gibt es für jede spezifische Magnetlänge eine optimale Spulenhöhe, die die Verlustleistung minimiert. Es ist auch ersichtlich, dass zunehmend längere Magneten zu einer Verringerung der Verlustleistung führen, obwohl dies zu einer Vergrößerung der Armatur führt und insbesondere die bewegte Masse erhöht. Am Ende der Optimierungsphase wurde ein Design ausgewählt, das zu einer bewegten Masse von ca. 30 kg und einer Verlustleistung von ca. 125 W bei einer Nennbeschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  führt.

In der gewählten Dreieckskonfiguration für den Planarmotor sind die drei Drive-Einheiten um  $120^\circ$  gegeneinander gedreht. Die überlappenden Verfahrbereiche der drei linearen Drive-Einheiten ergeben einen kreisförmigen Verfahrbereich mit einem Durchmesser von 250 mm (siehe Abb. 4 links). In dieser Konfiguration können die drei Drive-Kräfte zu einer resultierenden horizontalen Drive-Kraft in beliebiger Richtung kombiniert werden und können auch ein Drehmoment zur Kontrolle der z-Rotation des Sliders erzeugen. Abb. 4 (rechts) zeigt, wie die maximale erreichbare Drive-Kraft eine Funktion der Drive-Richtung ist. Wie man sieht, ist 1,5-fache Nennkraft für jede Drive-Einheit in jede Richtung verfügbar.

### Cooling the Drive Coils

Um die thermischen Auswirkungen der Drive-Spulen auf die Führungen und, noch wichtiger, auf die Metrologie

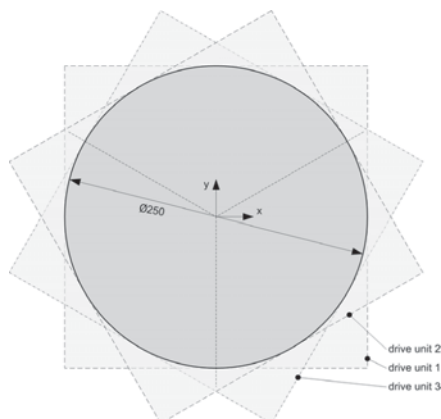


Abb. 4: Resultierender Verfahrbereich (links)  
Fig. 2: Resulting traversing range (left)

Antriebseinheiten zu einem resultierenden Verfahrbereich von  $\varnothing 250$  mm überlappen (s. Abb.4, links). In dieser Anordnung ermöglicht die Kombination der drei Antriebskräfte eine resultierende horizontale Antriebskraft in beliebiger Richtung, wie auch die Erzeugung eines Drehmomentes zur Kontrolle der z-Rotation des Läufers. Abb. 4 (rechts) zeigt, wie die dabei maximal erzielbare Antriebskraft von der Antriebsrichtung abhängt. Es ist ersichtlich, dass unabhängig von der Richtung das 1,5-fache der Nennkraft einer einzelnen Antriebseinheit zur Verfügung steht.

#### Temperierung der Antriebsspulen

Um den thermischen Einfluss der Antriebsspulen auf die Führungsbasis und - noch wichtiger - auf den Metrologierahmen zu reduzieren, ist eine hochgenaue Temperierung der Spulenbaugruppe nötig. Hierzu werden die Spulen eingekapselt und über Kanäle mit einem Wasserkreislauf temperiert. Da die erwarteten Verlustleistungen relativ gering sind, steht bei der Auslegung des Temperiersystems nicht die Kühlung der Spulen sondern die sichere und direkte Temperierung der gesamten Baugruppe im Fokus. Deshalb sieht das Konzept Kühlkanäle auf der Spulenober- und Unterseite vor. Auf der Oberseite erhöht sich durch die Temperierung der Arbeitsluftspalt, was den Wirkungsgrad verschlechtert, dennoch ist auf diese Weise eine geringere Übertemperatur der Baugruppe zu erzielen. Die Geometrie

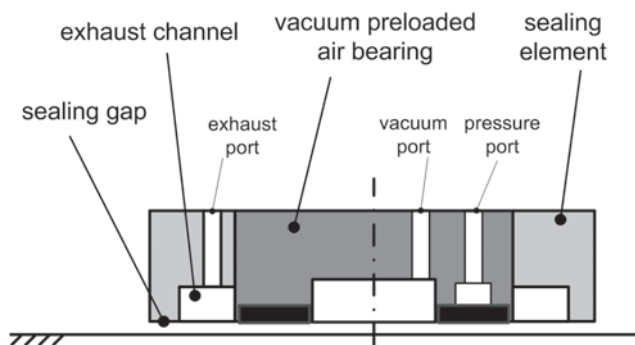
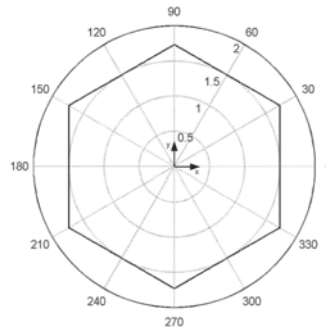


Abb. 4: Abdichtungskonzept für vakuum-vorgespannte Luftlager (links)  
Fig. 2: Sealing concept for vacuum-pre-stressed air bearing (left)

motor force (normalized to nominal force) depending on the direction

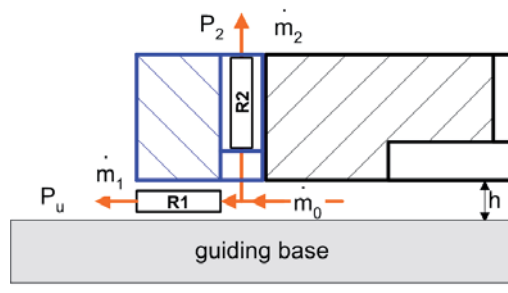


Richtungsabhängigkeit der Motorkraft (rechts)  
directional dependency of motor force (right)

frame, the temperature of the coil assembly must be precisely controlled. To do this, the coils are encapsulated and cooled by water flowing through channels on the coils. Since the expected power dissipation is relatively small, it is more important for the cooling system to safely and reliably control the temperature of the entire assembly and not just cool the coils. Therefore, this concept includes cooling channels along the top and bottom sides of the coils. On the top side, controlling the temperature increases the operating air gap. Although this lowers the efficiency, it also causes a slightly higher temperature in the assembly. Together with the flow rate of the heat transfer medium, the geometry of the coils and channels determines the heat transmission resistance to the heat transfer medium. The coil dimensions must be taken into consideration during the design and optimization phase.

#### Air Bearing and Laser Interferometer

The air flow from conventional air bearings affects the temperatures throughout the entire system and also directly disturbs the homogeneity (i.e., varying pressures, temperature) along the light path of the interferometer. The resulting measuring errors are not systematic. To minimize the effects of the air bearing on length and angle measurements, a seal was installed as an additional element on the air bearing (see figure 5). This seal consists



Strömungsmechanisches Widerstandsmodell (rechts)  
mechanical flow resistance model (right)

der Spulen und der Kanäle bestimmen zusammen mit dem Volumenstrom des Temperiermediums den Wärmeübergangswiderstand zum Temperiermedium. Dies ist bei der Auslegung- und Optimierung der Spulenabmessungen zu berücksichtigen.

### **Luftlager und Laserinterferometer**

Konventionelle Luftlager verursachen einen Luftstrom in ihrer Umgebung, der einerseits als thermische Störung auf das gesamte System wirkt und andererseits auch direkt im Messstrahlengang der Interferometer zu Inhomogenitäten (Druck, Temperatur) führt. Die dadurch entstehenden Messfehler sind nicht systematisch. Um die Beeinflussung der Weg- und Winkelmessung durch die Luftlager zu minimieren, kommt eine Abdichtung zum Einsatz, die als zusätzliches Element am Luftlager montiert wird (s. Abb. 5). Sie besteht aus einem Auslasskanal und dem eigentlichen Dichtspalt. Beides wurde mit Hilfe eines strömungsmechanischen Widerstandsmodells dimensioniert. Experimentelle Untersuchungen an ersten Prototypen bestätigen, dass sich auf diese Weise der Einfluss der Luftlager auf die laserinterferometrische Wegmessung bis auf ein nicht mehr nachweisbares Maß reduzieren lässt.

Ansprechpartner / *contact*:

Dipl.-Ing. Steffen Hesse  
Tel. +49 (3677) 69-5567  
E-Mail: [steffen.hesse@imms.de](mailto:steffen.hesse@imms.de)

*of an outlet channel and the actual sealing gap. Both of these have been dimensioned using a mechanical flow resistance model. Experimental investigations of the first prototypes have revealed that the air bearing no longer has a detectable effect on the laser interferometer in length measurements.*

- [1] SFB 622, Nanopositionier- und Nanomessmaschinen  
<http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/sfb622/index.htm>
- [2] T. Hausotte: „Nanopositionier – und Nanomessmaschine“  
Dissertation, TU Ilmenau 2002
- [3] T. Ruijl: „Ultra Precision Coordinate Measuring Machine; Design, Calibration and error Compensation“, 2nd edition, 2002, ISBN: 90-6464287-7
- [4] S. Hesse, C. Schäffel: „Reducing the positioning uncertainty of a linear direct drive system with 200 mm travel range“, Proceedings of the 7<sup>th</sup> euspen International conference 2007, Bremen, Vol 1, p.204-207