



**SPP 1476**  
Kleine Werkzeugmaschinen

Kleine Werkzeugmaschinen  
für kleine Werkstücke



Schwerpunktprogramm gefördert durch die  
Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG)

Herausgeber und inhaltlich verantwortlich:



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg  
Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik (LaFT)  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg



+49 40 6541-2271



+49 40 6541-2839



spp1476@hsu-hh.de



www.spp1476.de

# Inhaltsverzeichnis

## Projektinformationen

Projektpartner.....	4
Zusammenfassung.....	5
Beteiligte Universitäten/Forschungsinstitute.....	5
Idee des DFG-Schwerpunktprogramms SPP1476.....	6
Vorgehen.....	8
Konfigurationsprozess.....	9

## Werkzeugmaschinen-Beispielkonfigurationen

Konfiguration Ia.....	12
Konfiguration Ib.....	13
Konfiguration Ic.....	14
Konfiguration II.....	15
Konfiguration III.....	16

## Werkzeuge

Werkzeugspindel.....		18
Dry-EDM Modul.....		20
DMD-Jet.....		22
GrindBall.....		24

## Aktoren

Hybridaktor.....		28
Hochpräzises hydraulisches Vorschubmodul.....		30
FGL-Antrieb und Spanneinheit.....		32
Fluidantrieb.....		34
Kleine kompakte Linear- und Planardirektantriebe.....		36
Vorschubeinheiten auf Basis von nachgiebigen Mechanismen ...		38

## Zusatzmodule

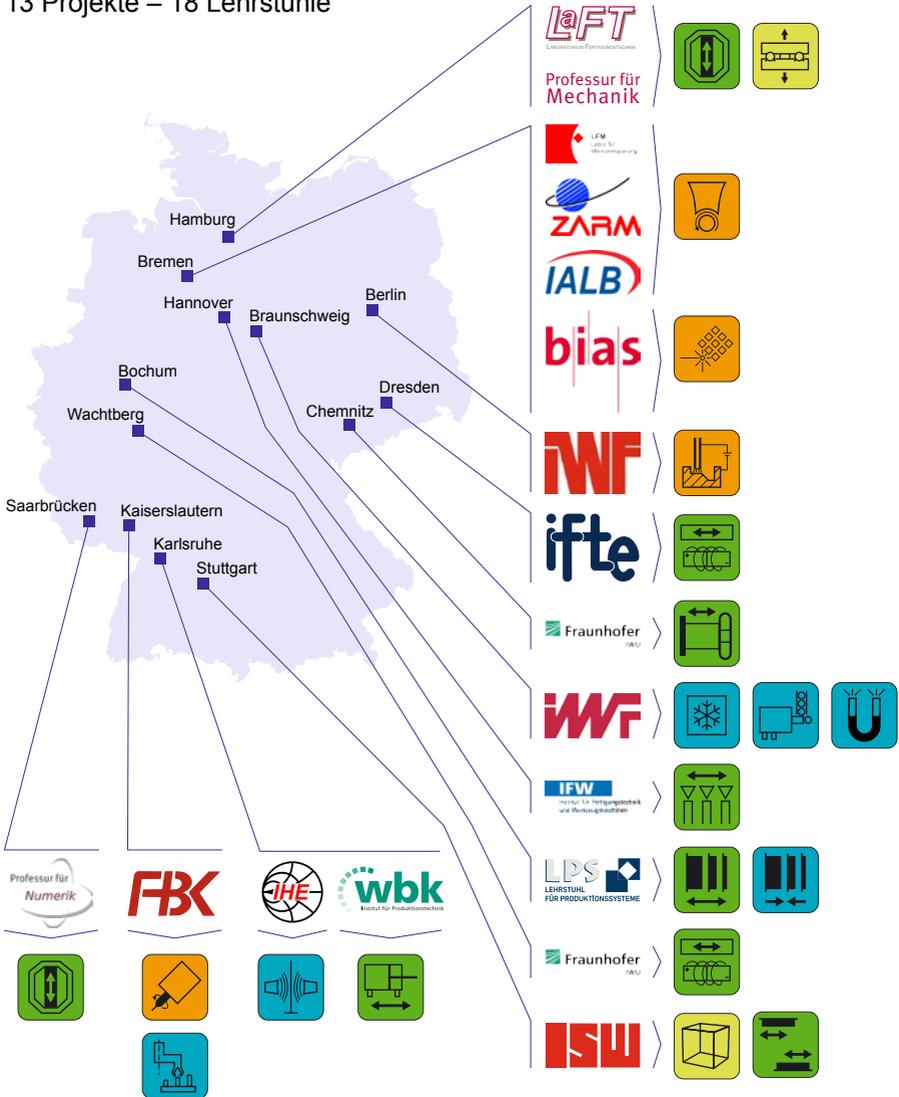
Hochgenaues Millimeterwellenradar für die Mikrobearbeitung ....		42
Multifunktionale Schnittstelle für kleine modulare Werkzeugmaschinen .....		44
Kleine Werkzeugmaschine.....	    	46



# Projketinformationen

# Projektpartner

13 Projekte – 18 Lehrstühle



## Zusammenfassung

Das Schwerpunktprogramm SPP1476 „kleine Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke“, gefördert von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG), setzt sich aus Projekten 18 führender Institute der Produktionstechnik von 13 deutschen Universitäten zusammen. Über den Projektzeitraum von 2010–2016 war das Ziel des Schwerpunktprogramms neuartige, größenangepasste, modulare Werkzeugmaschinen für die Mikrofertigung verfügbar zu machen. In enger Zusammenarbeit wurden an den unterschiedlichen Standorten neuartige Werkzeug- und Vorschubmodule entwickelt, so dass benötigte Maschinen ad hoc und aufgabenorientiert aus den funktionsverschiedenen Modulen integriert und desintegriert werden können.

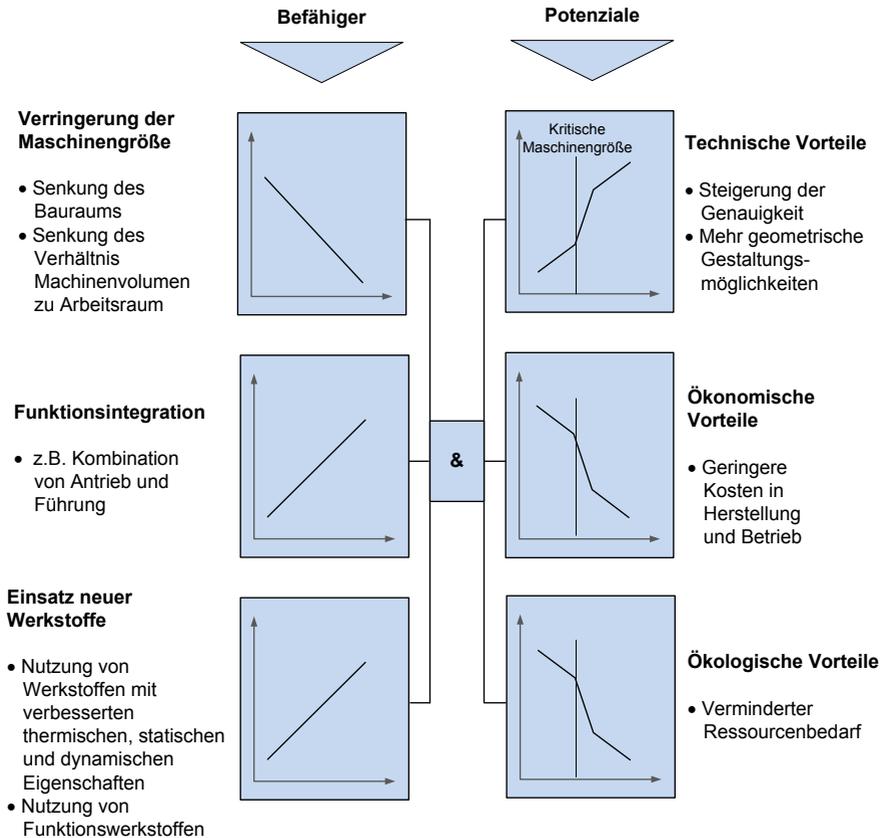
## Beteiligte Universitäten/ Forschungsinstitute



## Idee des DFG-Schwerpunktprogramms SPP1476

Für die Werkstücke zahlreicher Branchen, wie z.B. der Medizintechnik, Optik, Biotechnik, Mechatronik, Fluidik, des (Mikro-)Formen- und Werkzeugbau sowie der Mikroreakorteknik ist eine verstärkte Miniaturisierung, Funktionsintegration und Komplexitätssteigerung notwendig, um mit dadurch herstellbaren innovativeren Produkten wirtschaftlich erfolgreich zu sein. Aktuelle Forschungsaktivitäten widmen sich primär der Skalierung von Fertigungsverfahren und der Bildung komplexer Prozessketten zur Herstellung von Mikrowerkstücken. Ein intensiver Forschungsbedarf besteht jedoch, um die zur Mikrofertigung notwendigen Werkzeugmaschinen für die neuen Anforderungen zu qualifizieren. Dieser Entwicklungsbedarf lässt sich aus der Betrachtung einfacher Kenngrößen, wie dem Bauraum, der Größe des Arbeitsraumes, der zum Betrieb notwendigen Energie oder der bewegten Massen der Werkzeugmaschinen ableiten. Diese stehen in einem dramatischen Missverhältnis zum Volumen oder der Masse der nur wenige Millimeter großen Werkstücke mit Strukturen im Mikrometerbereich.

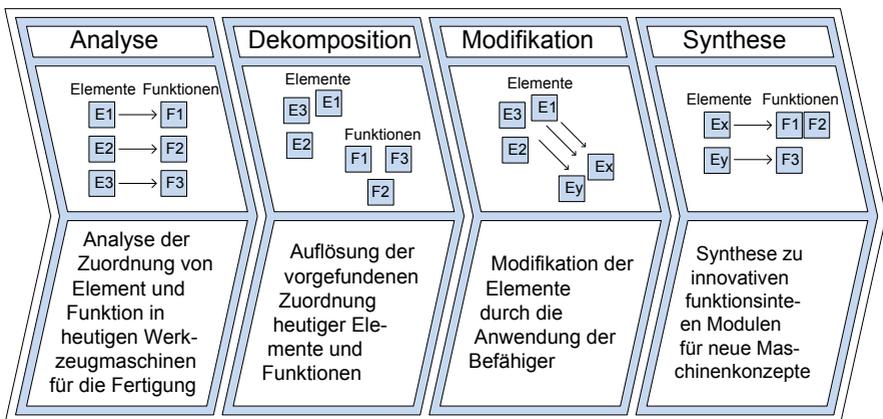
Ziel des SPPs ist die Entwicklung und prototypische Erprobung wissenschaftlich fundierter Methoden, um neuartige Werkzeugmaschinen für die Mikrofertigung zu bauen, die in ihren charakteristischen technologischen und technischen Kenngrößen an die zu fertigenden Mikrowerkstücke angepasst sind. Im Rahmen des SPPs findet eine Konzentration auf Werkzeugmaschinen für trennende Verfahren unter Nutzung mechanischer (Spanen), thermischer (Laser), elektrothermischer (Funkenerosion) und elektrochemischer Energie statt. Die neuen Maschinen besitzen technische, ökonomische und ökologische Vorteile. Die Maschinen ermöglichen die Herstellung komplexer Werkstücke mit höherer Genauigkeit aus einem großen Werkstoffspektrum und zeichnen sich zudem durch eine immanent höhere Veränderbarkeit in Struktur und Aufstellort aus. Ökonomische und ökologische Vorteile werden durch geringe Kosten und durch einen geringeren Ressourcenverbrauch für Herstellung und Betrieb der Maschine realisiert. Insbesondere wird durch das Unterschreiten von kritischen Größen der entwickelten Fertigungsmaschinen die Befähigung zu einer sprunghaftigen Verbesserung der genannten Eigenschaften erreicht.



Kleine Werkzeugmaschinen ermöglichen nach Unterschreiten einer bestimmten Größe die Einführung neuer oder bekannter, aber heute im Werkzeugmaschinenbau noch nicht verwendeter Technologien und Elemente. Diese ermöglichen im Gegensatz zur heute üblichen evolutionären Weiterentwicklung der Maschinen Innovations sprünge, also revolutionäre Schritte in der Entstehung und Nutzung der Maschinen.

## Vorgehen

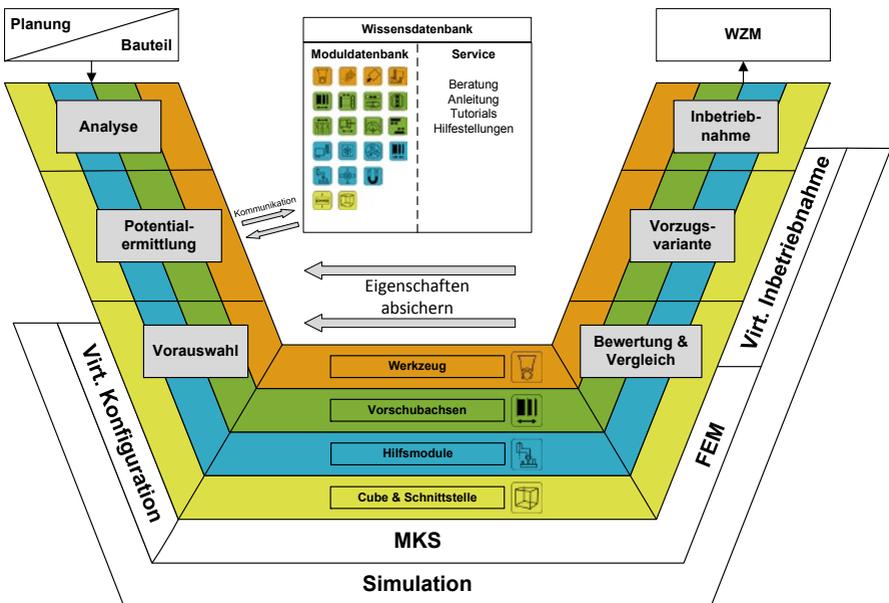
Für die Lösung der im höchsten Maße interdisziplinären Problemstellung wurde eine systematische, wissenschaftliche Vorgehensweise angewendet, die mit der Analyse und Dekomposition der Element-Funktions-Zuordnungen heutiger Mikrobearbeitungsmaschinen begann. Deren Modifikation in Kombination mit einer Auswahl von Technologiebefähigern und Basistechnologien ermöglichte die Synthese neuer funktionsintegrierender Module. In einer abschließenden Komplexitätsphase wurden Werkzeugmaschinen geschaffen, die ad hoc und aufgabenorientiert aus den genannten Modulen integriert und desintegriert werden können. Wesentlicher Technologiebefähiger ist das Unterschreiten eines kritischen Bauraumes der Module, ab dem neue Basistechnologien wie z.B. neue Werkstoffe, Funktionswerkstoffe, Kinematiken und Topologien, Steuerungs-/ Regelungsverfahren, Modularisierungskonzepte, sowie mechanische, energetische und Informations-Schnittstellen verwendet werden können. Basierend auf der hohen Veränderbarkeit der neuen Werkzeugmaschinen ist die Anwendbarkeit des neuen Maschinenkonzeptes durch die Entwicklung von Funktionsmustern erwiesen worden. Diese Funktionsmuster sind auf dem Hannover-Messe Stand 2016 des SPPs ausgestellt. Eine detaillierte Darstellung der Exponate und deren spezifische Konfiguration finden Sie in diesem Heft.



## Konfigurationsprozess

### Wie aus Modulen eine kleine Werkzeugmaschine für die Mikrobearbeitung entsteht

Um die Modularität des SPP 1476 erfolgreich zu nutzen, sind Vorgehensweisen notwendig, die den Anwender unterstützen, aus dem Modulbaukasten der Projektpartner ad hoc aufgabenangepasste Maschinensysteme zu konfigurieren. Beispielhaft wird hier ein Vorgehen erläutert, das aus einer Moduldatenbank mit angehängten Servicefunktionen und einem V-Modell als Planungswerkzeug für die verschiedenen Modulgattungen (Werkzeuge, Vorschübe etc.) besteht. Im Unterschied zu vielen anderen modularen Maschinenbaukästen handelt es sich hierbei um einen Anwender- und nicht um einen Herstellerbaukasten.



Die Konfiguration von Modulen zu Werkzeugmaschinen erfolgt entsprechend den Fertigungsanforderungen eines bestimmten Bauteils. Nicht das Modul, sondern das Bauteil mit seinen beschreibenden geometrischen und technologischen Eigenschaften ist Ausgangspunkt für eine werkstückzentrierte Rekonfiguration.

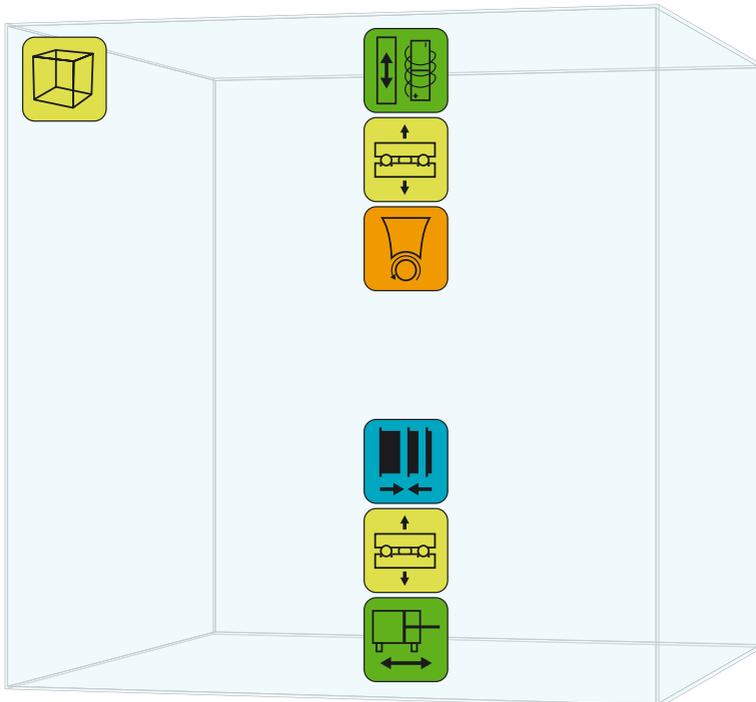
Über eine Wissensdatenbank in Form der Moduldatenbank erfolgt eine Potentialermittlung verschiedener theoretischer Kombinationen. Die Moduldatenbank enthält z.B. die Geometrie, Bearbeitungsverfahren, Drehzahl, minimale x-Koordinate, Genauigkeit in y-Richtung, Schnittstellen und Leistungsdaten der Module.

Bei der Kommunikation zwischen Anwender und Wissensdatenbank werden Prozessgrößen wie z.B. die zu fertigende Stückzahl aber auch die beim Anwender bereits vorhandenen Module berücksichtigt. Ergebnis der Potentialermittlung ist eine Auswahl an möglichen Kombinationen bzw. Modulen, die nach dem Grad der voraussichtlichen Aufgabenerfüllung gestaffelt sind. In einer darauf folgenden Simulation werden diese Eigenschaften überprüft und abgesichert. Simultan erfolgen die Bewertung und der Vergleich der unterschiedlichen Module und Konfigurationen. Nach Auswahl einer Vorzugsvariante folgen eine virtuelle und anschließend eine reale Inbetriebnahme der Werkzeugmaschine.

# Werkzeugmaschinen- Beispielkonfigurationen

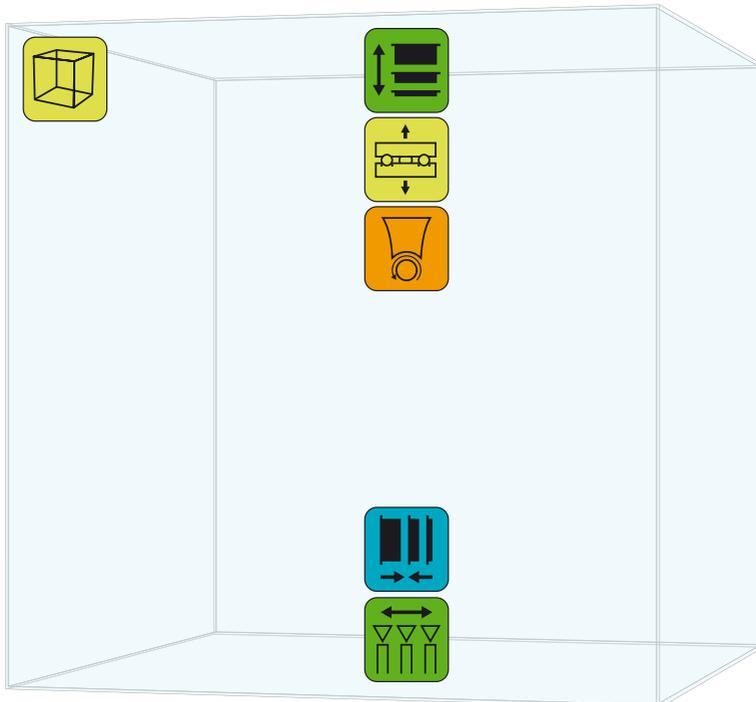
## Konfiguration Ia

In dieser Konfiguration wird ein GrindBall (🗑️ → S. 18) mittels eines permanentmagneterregten Direktantriebsmoduls (🌀 → S. 36) verfahren. Das Werkstück wird mit einer FGL-Spannvorrichtung (🔧 → S. 32) fixiert und mittels einer hydraulischen Achse (🛠️ → S. 30) bewegt. Die Verbindung der Module wird mithilfe einer multifunktionalen Schnittstelle (🔌 → S. 44) realisiert.



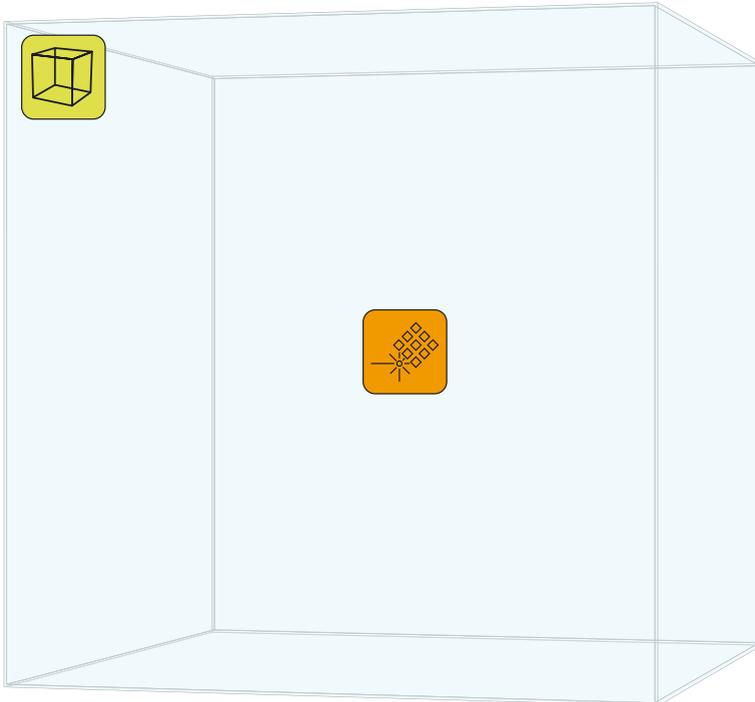
## Konfiguration Ib

In dieser Konfiguration wird ein GrindBall (🔧 → S. 18) mittels eines FGL-Aktors (🔧 → S. 32) verfahren. Das Werkstück wird mit einer FGL-Spannvorrichtung (🔧 → S. 32) fixiert und mittels eines fluiddynamischen Tisches (🔧 → S. 34) bewegt. Die Verbindung der Module wird mithilfe einer multifunktionalen Schnittstelle (🔧 → S. 44) realisiert.



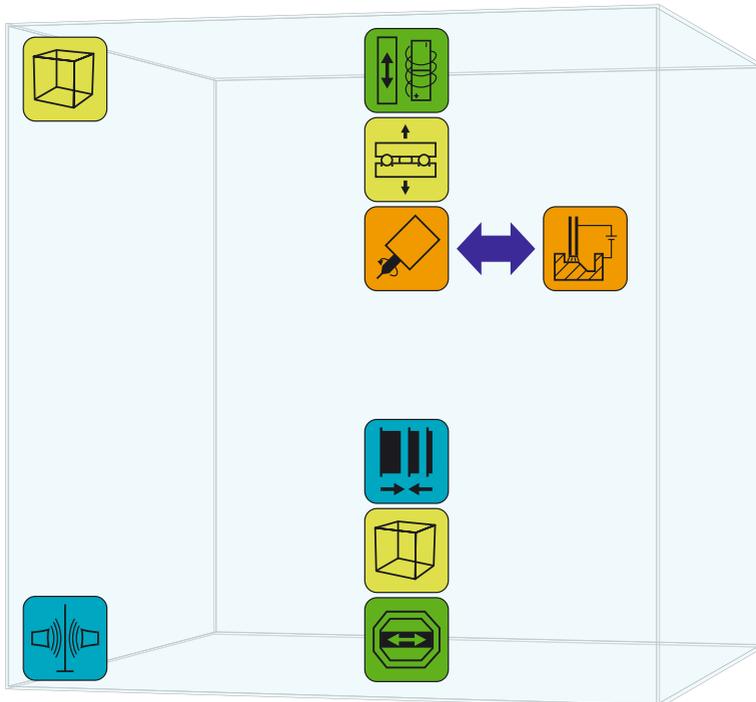
## Konfiguration Ic

In dieser Konfiguration wurde ein DMD-Jet (☀️ → S. 22), ein kompaktes Bearbeitungsmodul zum flächigen laserinduzierten elektrochemischen Abtragen, in den Cube (📦 → S. 46) integriert.



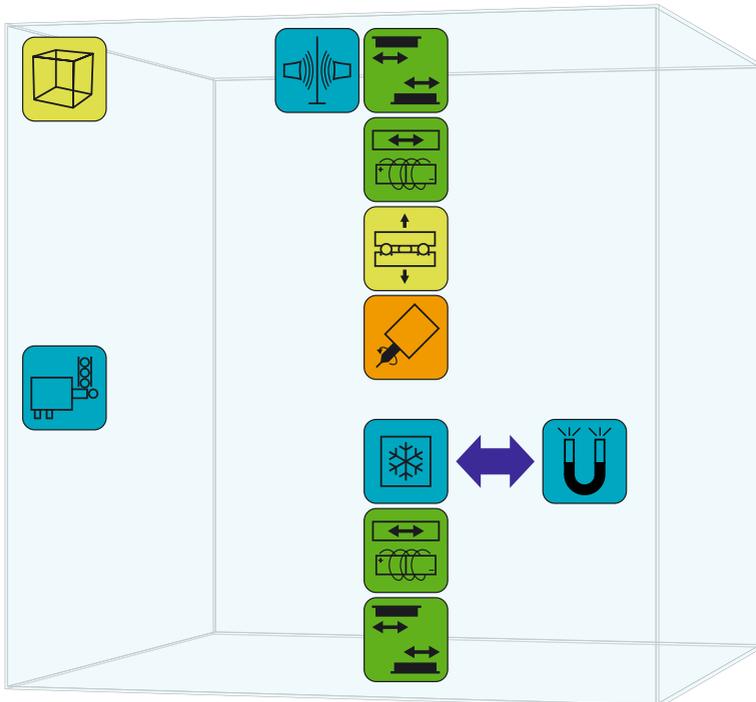
## Konfiguration II

In dieser Konfiguration wird eine luftgelagerte und -gesteuerte Werkzeugspindel (🔪 → S. 18) mittels eines permanentmagneterregten Direktantriebsmoduls (🌀 → S. 36) verfahren. Das Werkstück wird mit einer FGL-Spannvorrichtung (🔧 → S. 32) fixiert und mittels eines X-Y-Vorschubs auf Basis von nachgiebigen Mechanismen (📏 → S. 38) bewegt. Die Verbindung der Module wird mithilfe einer multifunktionalen Schnittstelle (🔌 → S. 44) realisiert. Ein Wechsel der Spindel zu einem Mikro-EDM (⚡ → S. 20) kann durchgeführt werden. Die translatorischen Bewegungen werden mittels drei Radarsensoren (📡 → S. 42) gemessen.



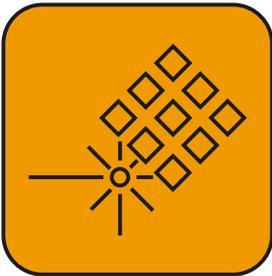
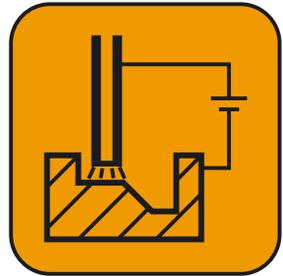
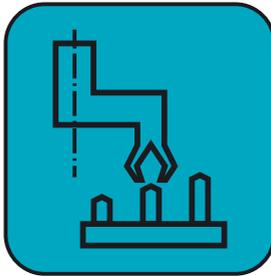
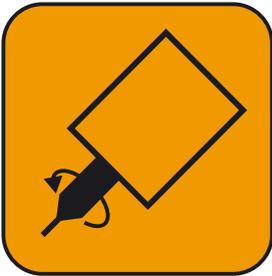
## Konfiguration III

In dieser Konfiguration wird eine luftgelagerte und -gesteuerte Werkzeugspindel (🔧 → S. 18) mittels eines permanentmagneterregten Direktantriebsmoduls (⚙️ → S. 36) verfahren. Weiterhin wird eine kooperative Bewegung von Werkzeug und Werkstück (🔄 → S. 46) realisiert und mittels einer Radarsensorik (📡 → S. 42) gemessen. Das Werkstück wird optional mit einer magnetischen oder einer Adhäsionsspanneinheit (🧲🧲 → S. 46) fixiert. Die Verbindung der Module wird mithilfe einer multifunktionalen Schnittstelle (🔌 → S. 44) realisiert. Der Werkstückwechsel erfolgt mit einer automatischen Werkstückzuführeinheit (🚚 → S. 46).



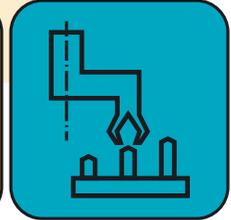
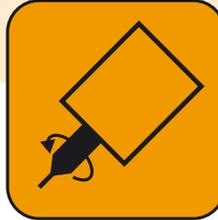
# Werkzeuge

---



## ■ Werkzeugspindel

Werkzeugspindel mit auswechselbaren Rotormodulen.



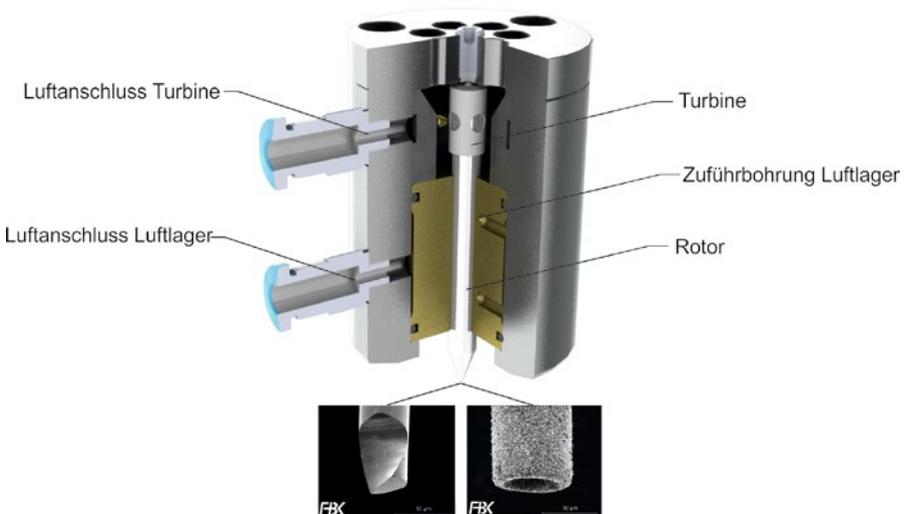
**Prof. Dr.-Ing. Jan C. Aurich**  
**Lehrstuhl für Fertigungstechnik und**  
**Betriebsorganisation (FBK)**  
**Technische Universität Kaiserslautern**

**FBK**

 Gottlieb-Daimler-Straße · 67663 Kaiserslautern  
 [fbk@mv.uni-kl.de](mailto:fbk@mv.uni-kl.de)  
 [www.fbk-kl.de](http://www.fbk-kl.de)



Eine Voraussetzung für die Realisierung der im SPP 1476 geförderten neuartigen Werkzeugmaschinen ist die Bereitstellung von schnellen und sehr präzisen Werkzeugspindeln. Die spanende Fertigung mikrotechnischer Strukturen stellt zwei grundlegende Anforderungen an die Werkzeugspindel der Bearbeitungsmaschine. Zum einen muss durch die Spindel eine sehr hohe Drehzahl zur Verfügung gestellt werden, um damit ausreichende Schnittgeschwindigkeiten bei Mikrowerkzeugen ( $< 100 \mu\text{m}$ ) zu erreichen. Zum anderen muss die Spindel einen sehr kleinen Rundlauffehler aufweisen.

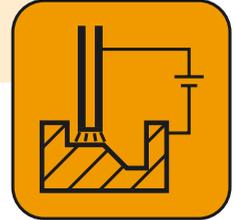


Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurden am Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation (FBK) der TU-Kaiserslautern mehrere miniaturisierte luftgelagerte Hochfrequenzspindeln mit austauschbaren Rotormodulen entwickelt. Mit diesen kann eine Drehzahl über  $300.000 \text{ min}^{-1}$  bei gleichzeitiger Rundlaufabweichung unter  $1 \mu\text{m}$  erreicht werden.

Abmessungen	35 x 25 mm
Masse	125 g
Drehzahl	$300.000 \text{ min}^{-1}$
Rundlaufabweichung	$< 1 \mu\text{m}$

## ■ Dry-EDM Modul

Modul zur Mikrofunktenerosion mit gasförmigen Dielektrika.



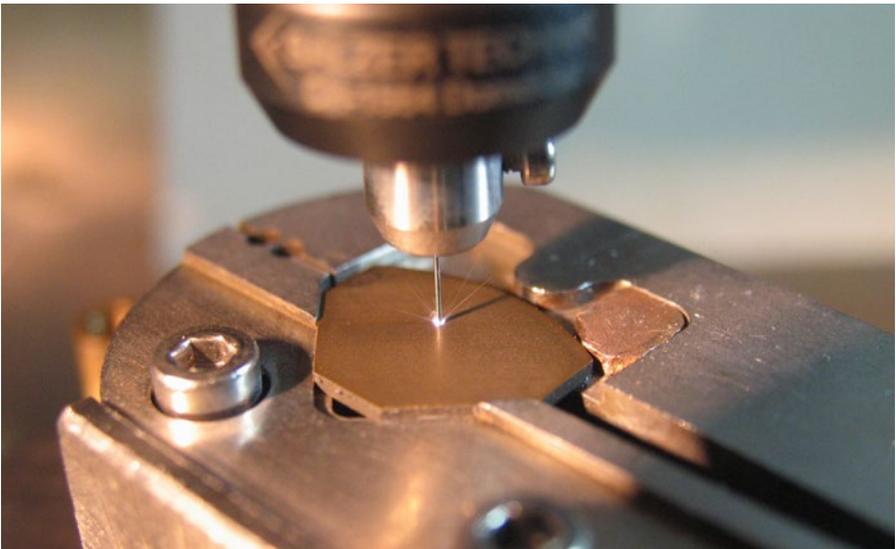
**Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann**  
**Institut für Werkzeugmaschinen und**  
**Fabrikbetrieb (IWF)**

**Technische Universität Berlin**

 Pascalstraße 8–9 · 10587 Berlin

 [uhlmann@iwf.tu-berlin.de](mailto:uhlmann@iwf.tu-berlin.de)

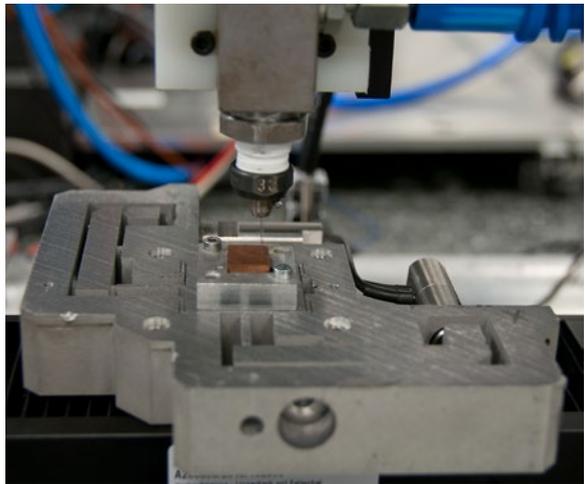
 [www.iwf.tu-berlin.de](http://www.iwf.tu-berlin.de)



Bei der Präzisionsfertigung kleiner Bauteile aus harten Werkstoffen kommt dem abtragenden Verfahren der Funkenerosion eine zentrale Bedeutung zu, da damit eine prozesssichere, präzise Bearbeitung, nahezu frei von Kräften, möglich ist. Dem Einsatz der Funkenerosion in einer modularen Maschine zur Mikrobearbeitung steht entgegen, dass die Bearbeitung üblicherweise mit flüssigen Dielektrika, wie deionisiertem Wasser oder Öl, durchgeführt wird.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SPP 1476 wurde im Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin die Technologie der Mikrobahnerosion in Hartmetall mit gasförmigem Dielektrikum entwickelt und umgesetzt. Die Ersetzung des flüssigen Dielektrikums durch ein gasförmiges Medium ermöglicht eine Miniaturisierung der Maschinenkomponenten sowie eine von der Einbaulage unabhängige Anordnung des Werkstücks. Neben der Technologieentwicklung der Trockenfunkenbahnerosion wurde ein neuartiges Modul sowie ein Steuerungskonzept zur Herstellung von dreidimensionalen Mikrostrukturen entwickelt. Dabei sind die durch die Spaltweitenregelung verursachte, hochfrequente Bewegung sowie der Vorschub auf verschiedene Bewegungssysteme aufgeteilt worden.

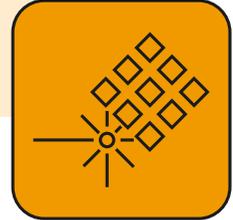
Die dreidimensionale Fertigung von Mikrostrukturen mittels Trockenfunkenbahnerosion ist ein neuartiges Fertigungsverfahren. Dieses bietet eine wirtschaftliche und vor allem ökologisch vorteilhafte Alternative zu den etablierten Fertigungsverfahren.



Abmessung	150 x 150 x 35 mm
Arbeitsmedium	Gasförmiges Dielektrikum
Antriebe	Piezoaktoren
Steuerung	Open source

■ DMD-Jet

Beherrschung des laserinduzierten Temperaturfeldes zur Realisierung eines kompakten Bearbeitungsmoduls zur flächigen Lasermaterialbearbeitung.

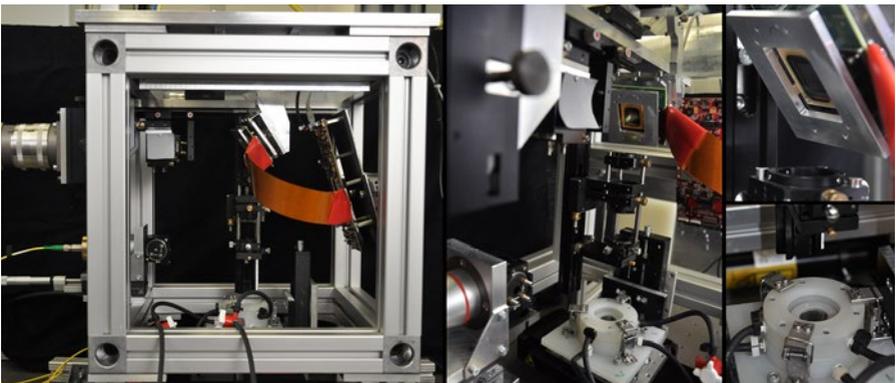


**Prof. Dr.-Ing. Frank Vollertsen**  
**Bremer Institut für angewandte**  
**Strahltechnik GmbH (BIAS)**  
**Universität Bremen**

 Klagenfurter Straße 2 · 28359 Bremen

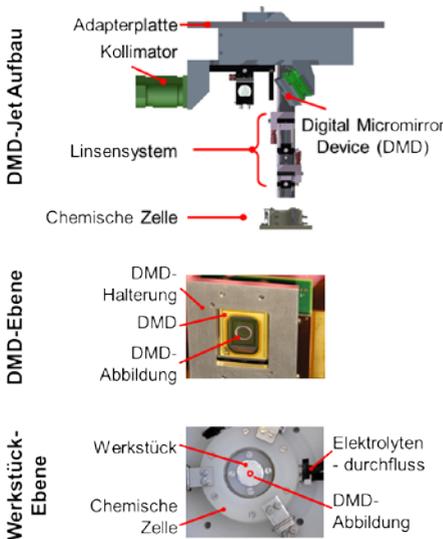
 mikrostrukturierung@bias.de

 www.bias.de

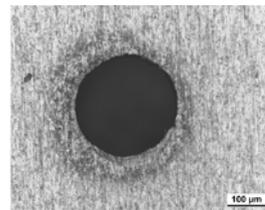


Dem Bestreben nach miniaturisierten metallischen Mikrobauteilen in der industriellen Fertigung steht die Diskrepanz von Maschinengröße zu Bauteilgröße entgegen. Eine berührungslose materialschonende Bearbeitung bietet das laserchemische Abtragsverfahren, welches aufgrund der vergleichsweise geringen Laserleistungsdichten den Einsatz diffraktiver, optischer Elemente, wie dem Digital-Micromirror-Device (DMD), ermöglicht. Dadurch kann die Bearbeitungsgenauigkeit gesteigert werden.

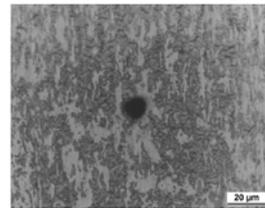
In diesem Projekt wird erstmalig beim laserchemischen Abtragen eine Verbindung der DMD-Technologie mit der laserbasierten Mikrobearbeitung erprobt. Ziel dabei war es, ein kompaktes Bearbeitungsmodul zum simultanen 2D-Mikromaterialabtrag zu realisieren und zu charakterisieren, welches kombinierbar mit anderen Modulen in der Mikrofertigung eingesetzt werden kann.



Bearbeitungsbeispiel (Bohren von 50 µm Ti-Folien)



Bilddurchmesser 786 Pixel  
Bohrungsdurchmesser 280 µm  
Laserleistung 30 W



Bilddurchmesser 32 Pixel  
Bohrungsdurchmesser 8 µm  
Laserleistung 10 W

Würfelabmessungen	450 x 450 x 450 mm
Laser	Faserlaser; 1.080 nm; 300 W
DMD	1.024 x 768 Pixel
Werkstoffe	Titan; rostfreier Edelstahl (50 µm Folien)
Elektrolyte	5 mol H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , 1.9 mol H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

## ■ GrindBall

Werkzeugantriebs- und Lagerungskonzepte für achsenlose Mikroschleifwerkzeuge (GrindBall).



**Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. E. Brinksmeier**  
**Labor für Mikrozerspanung (LFM)**  
**Universität Bremen**

 Badgasteiner Straße 2 · 28359 Bremen  
 cflosky@lfm.uni-bremen.de  
 www.lfm.uni-bremen.de



LFM  
 Labor für  
 Mikrozerspanung

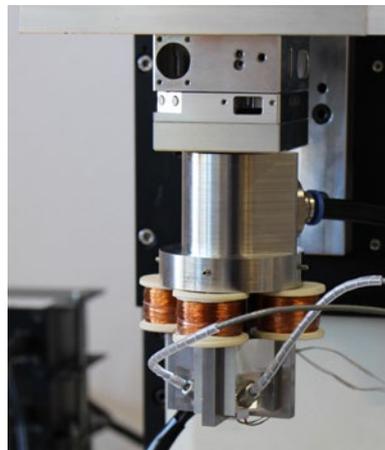
**Prof. Dr.-Ing. B. Orlik**  
**Institut für elektrische Antriebe,**  
**Leistungselektronik und Bauelemente (IALB)**  
**Universität Bremen**

 Otto-Hahn-Allee 1, NW1 · 28359 Bremen  
 alexander.norbach@ialb.uni-bremen.de  
 www.ialb.uni-bremen.de



**PD Dr.-Ing. habil. Rodion Groll**  
**Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie**  
**und Mikrogravitation (ZARM)**  
**Universität Bremen**

 Am Fallturm · 28359 Bremen  
 gomez@zarm.uni-bremen.de  
 www.zarm.uni-bremen.de



Die kontinuierliche Miniaturisierung komplexer Bauteile in vielen Anwendungsbereichen, wie in der Medizintechnik, Optik und Elektronik, erfordert kleine Werkzeugmaschinen, die an die Werkstückdimensionen angepasst sind. Hierfür müssen ebenfalls miniaturisierte Bearbeitungsmodule entwickelt werden, die einen möglichst geringen Einbauraum benötigen und zugleich eine präzise Bauteilefertigung ermöglichen. Am Beispiel eines Bearbeitungsmoduls zum Schleifen sprödharter Werkstoffe wird das GrindBall-Modul prototypisch umgesetzt.

Dieses Modul besteht im Wesentlichen aus einer elektromagnetischen Werkzeuglagerung, einem fluiddynamischen Antrieb und kugelförmigen Schleifwerkzeugen. Die Positionierung und der Antrieb des Werkzeugs erfolgen kontaktlos und ermöglichen so eine achsenlose Bearbeitung, die durch eine angepasste Kinematik in der Lage ist, auch im Kavitätengrund eine niedrige Oberflächenrauheit zu erzeugen.



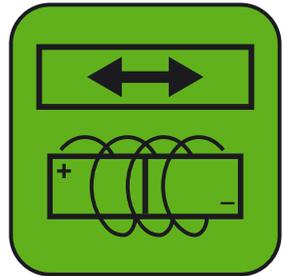
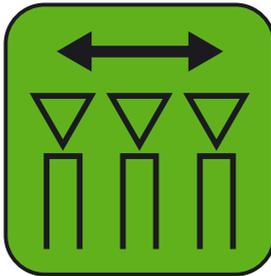
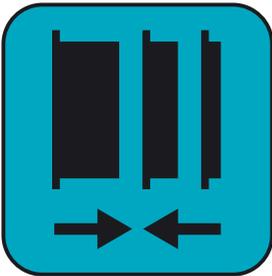
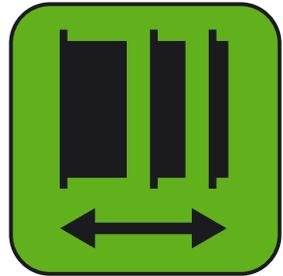
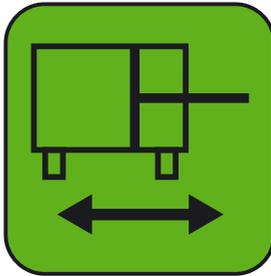
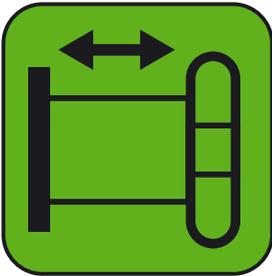
Die fluiddynamische Simulation und Auslegung der Fluidkanäle zeigen, dass das GrindBall-Modul seinen optimalen Betriebspunkt bei einer tangentialen Zerspankraft von  $F_t > 0,1 \text{ N}$  und einer Schleifleistung von  $P_c = 1,1 \text{ W}$  erreicht. Dabei sind die Bremsmomente durch Wirbelströme, die durch die elektromagnetische Lagerung entstehen, mit  $M_b = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}$  vernachlässigbar. Durch die Auswahl eines Modulwerkstoffs mit niedrigerer Remanenz (max.  $0,1 \text{ T}$ ) wird die maximale elektromagnetische Kraft auf ca.  $1 \text{ N}$  erhöht. Somit kann das GrindBall-Modul mit einem Hydrauliköl betrieben werden, das eine theoretische maximale Schleifleistung von  $1,1 \text{ W}$  erreichen kann.

Abmessungen	Ø60 x 150 mm
Masse	ca. 400 g
Max. Drehzahl (theor.)	12.000 min <sup>-1</sup>
Schleifleistung (theor.)	1,1 W



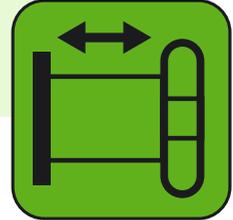
# Aktoren

---



## ■ Hybridaktor

Entwicklung eines multifunktionalen Antriebsmoduls zur Realisierung von Vorschubbewegungen in Maschinen der Mikrofertigung.



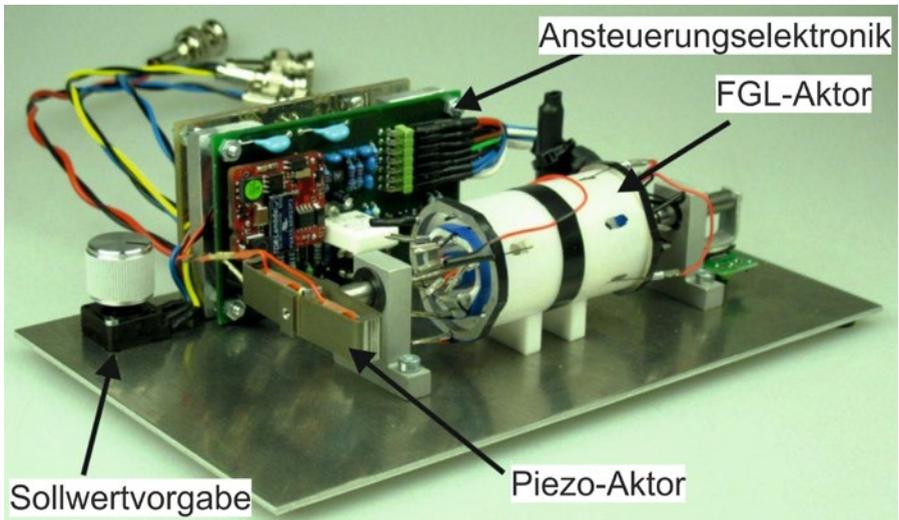
**Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel**  
**Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen  
und Umformtechnik (IWU)**

 Nöthnitzer Straße 44 · 01187 Dresden

 [info@iwu.fraunhofer.de](mailto:info@iwu.fraunhofer.de)

 [www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)

 **Fraunhofer**  
IWU

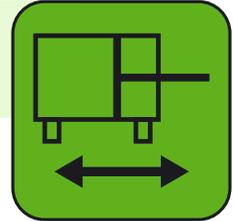


Im Rahmen der Arbeiten erfolgte die Entwicklung einer Achsmoduls mit Funktionsaufteilung zur Realisierung von Vorschubbewegungen in Werkzeugmaschinen der Mikrofertigung. Im Gegensatz zu konventionellen Antriebsprinzipien werden hier die Vorteile von Piezokeramiken und Formgedächtnislegierungen (FGL) in einem hybriden Aktor kombiniert. Der Formgedächtnisaktor erschließt dabei den Arbeitsraum und der Piezoaktor sichert Präzision und Dynamik. Die Eigenschaften der Funktionswerkstoffe erlauben es dabei, Funktionen zu kombinieren. Zum Beispiel können Antrieb und Führung in einem Element realisiert werden, da bestimmte Freiheitsgrade bereits im Aktor gebunden werden können. Der Entwurf neuer Regelungskonzepte bildet einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten. Es werden sowohl die unabhängige Regelung der Teilaktoren, als auch übergeordnete Regelungskonzepte des Gesamtmoduls untersucht. Mit experimentellen Untersuchungen wird die Befähigung des hybriden Aktorsystems untersucht und nachgewiesen. Als Ergebnis stehen zwei, funktionsfähige Prototypen von Vorschubmodulen zur Verfügung, wobei der eine Prototyp auf hohe Quersteifigkeiten und der andere auf Multifunktionalität und geringe Masse optimiert ist. Die Abbildung zeigt den zweiten Prototypen des Hybridaktors einschließlich Ansteuerelektronik.

	<b>FG Aktor</b>	<b>Piezoaktor</b>	<b>Hybridaktor</b>	<b>Anforderung</b>
<b>Hub</b>	6 mm	0,5 mm	6,5 mm	5–10 mm
<b>Kraft</b>	50 N	40 N	40 N	50 N
<b>Dynamik</b>	0,2 Hz	200 Hz	200 Hz	200 Hz
<b>Maße</b>	60 x 33 x 33 mm	12 x 50 x 10 mm	60 x 50 x 35 mm	Min.
<b>Masse</b>	30 g	25 g	80 g	Min.
<b>Hubverhältnis</b>			0,1	Max.
<b>Kraftdichte</b>			0,5 N/g	Max.

## ■ Hochpräzises hydraulisches Vorschubmodul

Hochintegriertes Antriebsmodul für die Mikrobearbeitung mit günstigem Verhältnis von Bau- zu Arbeitsraum.

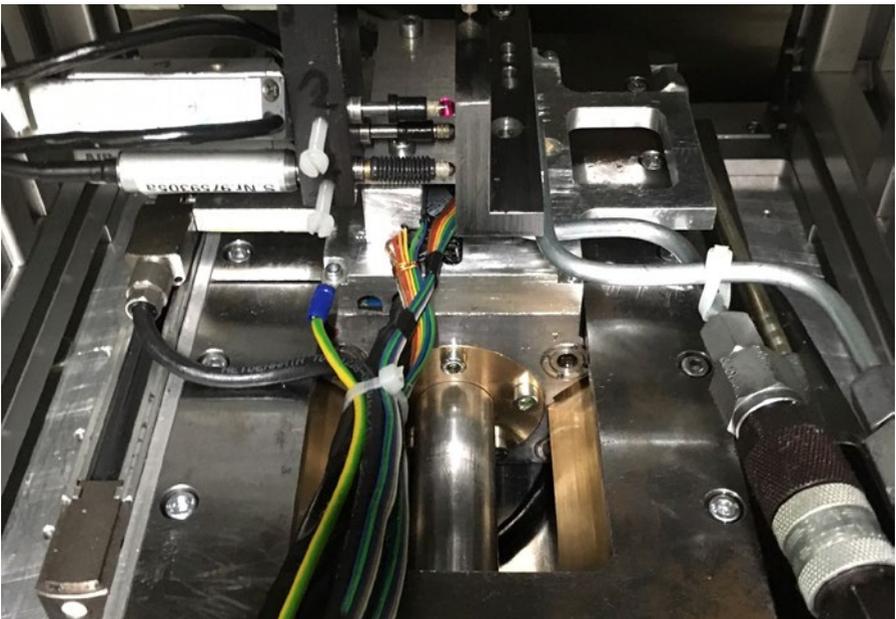


**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer**  
**Institut für Produktionstechnik (WBK)**  
**Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

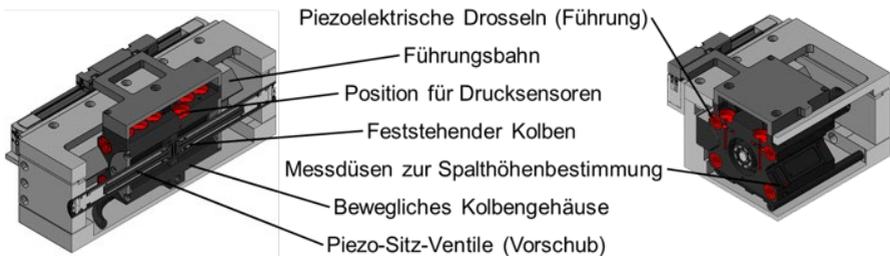
 Kaiserstraße 12 · 76131 Karlsruhe

 [juegen.fleischer@kit.edu](mailto:juegen.fleischer@kit.edu)

 [www.wbk.kit.edu](http://www.wbk.kit.edu)



Vorschubachsen positionieren Werkzeug und Werkstück relativ zueinander und haben dadurch eine besondere Stellung zur Erzielung hoher Genauigkeiten in Werkzeugmaschinen. Eine hochgenaue Positionierung ermöglicht auch die gezielte Berücksichtigung von geometrischen Fehlern einzelner Werkzeugmaschinenkomponenten und damit eine Kompensation von Fehlern. Das Konzept des hochintegrierten Antriebsmoduls mit günstigem Verhältnis von Bau zu Arbeitsraum setzt hierfür an mehreren Stellen an. Die Vorschubbewegung der Achse wird durch ein bewegliches Kolbengehäuse umgesetzt, das auf einer mit Öl beaufschlagten Kolbenstange verfährt. Piezoelektrische Drosseln sorgen in Kombination mit einem hochgenauen Glasmaßstab für eine hohe Positioniergenauigkeit und Steifigkeit in Verfahrrichtung. Darüber hinaus ist in das Achsgehäuse ein hydrostatisches Führungssystem mit insgesamt acht Drucktaschen integriert. Diese sind über zwei gegenüberliegenden Führungsbahnen angeordnet und können durch piezoelektrische Drosseln unabhängig voneinander geregelt werden.

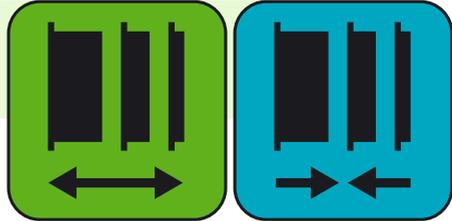


Die Regelung des Ölstroms durch die aktiven Drucktaschen ermöglicht einerseits die Aufnahme von Bearbeitungskräften, kann andererseits aber auch zur Fehlerkompensation genutzt werden. Durch gezielte Variation der Spalthöhen der einzelnen Drucktaschen können kleine Kompensationsbewegungen in drei rotatorischen und zwei weiteren translatorischen Freiheitsgraden umgesetzt werden. Die resultierenden Spalthöhen werden über ein Staudruckmesssystem bestimmt. Durch dieses Konzept kann die Achse prinzipiell sowohl eigene geometrische Fehler, als auch Abweichungen anderer Komponenten ausgleichen. Die multifunktionale Nutzung von Öl als Druckmedium ermöglicht darüber hinaus eine kompakte Bauweise.

Verfahrweg	100 mm
Zweiseitige Positioniergenauigkeit	3,8 µm
Max. Geschwindigkeit	4.000 mm/Min

## ■ FGL-Antrieb und Spanneinheit

Modulare Desktop-Bearbeitungszentren mit Formgedächtnisantrieben.



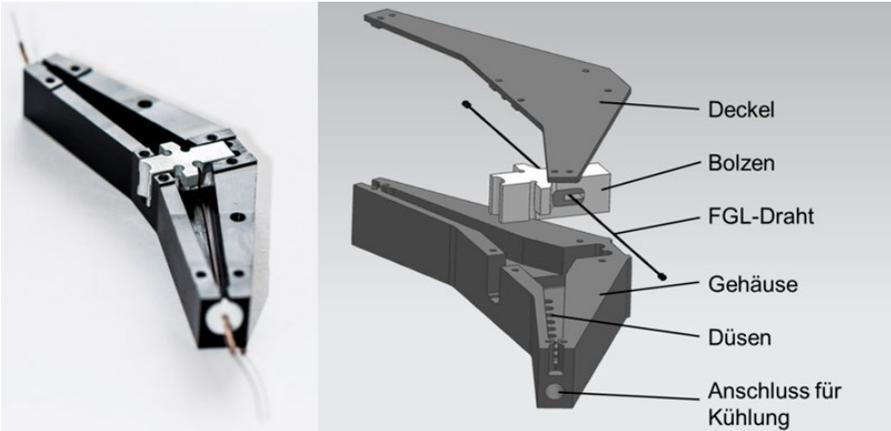
**Prof. Dr.-Ing. Horst Meier**  
**Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter**  
**Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS)**  
**Ruhr-Universität Bochum**



 Universitätsstraße 150 · 44801 Bochum  
 sekretariat@lps.ruhr-uni-bochum.de  
 www.lps.rub.de



Das Teilprojekt des Lehrstuhls für Produktionssysteme (LPS) im Rahmen des SPP 1476 „Kleine Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke“ befasst sich mit der Entwicklung einer modularen Antriebsachse bestehend aus mehreren Aktormodulen.



In den einzelnen Aktoren arbeitet ein Formgedächtnisdraht, der einen Bolzen aus dem Gehäuse schiebt und damit einen Stellweg erzeugt. Um größere Wege zu erreichen, werden mehrere Aktoren in einer Achse in Serie geschaltet.

Drei solcher Antriebsachsen werden schließlich zu einem 3-Achs-System kombiniert. Die Achsen erreichen Positionsgenauigkeiten von etwa 1 µm. Durch die Standardisierung der Aktoren, könnte eine solche Achse sehr preisgünstig angeboten werden.



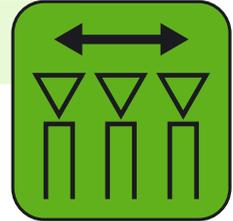
Neben der Entwicklung dieses innovativen Antriebskonzepts hat der LPS

innerhalb des Schwerpunktprogramms eine Spannvorrichtung mit Formgedächtnistechnik entwickelt, die in mehreren Maschinenvarianten zum Einsatz kommt. Hierbei wird die Spannung mit einer konventionellen Feder erzeugt und bei Bedarf mithilfe eines Formgedächtnisdrahtes gelöst.

Abmessungen (x-Achse)	150 x 150 x 40 mm
Masse	500 g
Genauigkeit	1 µm

## ■ Fluidantrieb

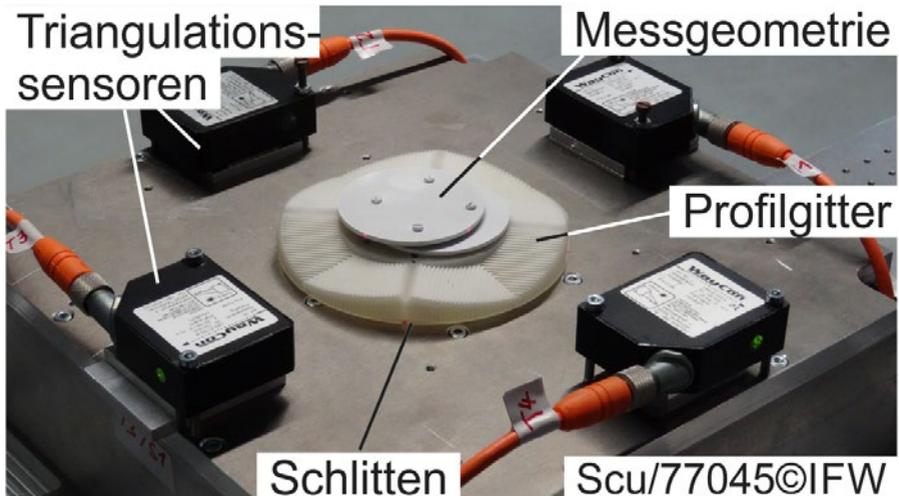
Kompakte Maschinenmodule für die spanende Mikrobearbeitung.



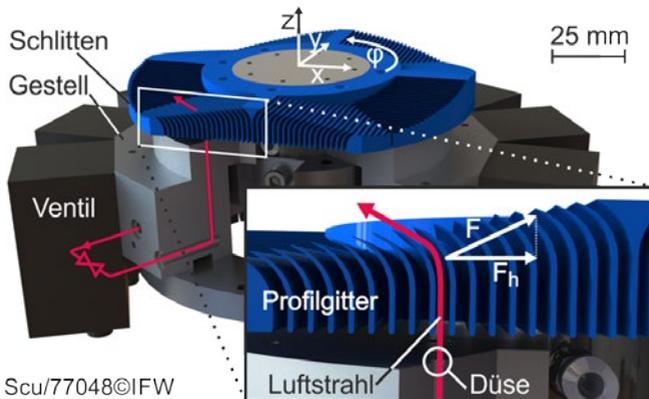
**Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena**  
**Institut für Fertigungstechnik und**  
**Werkzeugmaschinen (IFW)**  
**Leibniz Universität Hannover**



 An der Universität 2 · 30823 Garbsen  
 [info@ifw.uni-hannover.de](mailto:info@ifw.uni-hannover.de)  
 [www.ifw.uni-hannover.de](http://www.ifw.uni-hannover.de)



Für eine effiziente und flexible Mikrobearbeitung sind dynamische, mehrachsige Vorschubbewegungen notwendig. Da das Potential für die Größenreduzierung serieller Maschinenkinematiken begrenzt ist, wurde ein Planarantrieb für kleine Werkzeugmaschinen entwickelt. Dieser nutzt ein fluiddynamisches Wirkprinzip und integriert die Antriebs- und Führungsfunktionen von drei Maschinenachsen in einem sehr kompakten Aufbau. Der Antrieb besteht im Wesentlichen aus Schlitten und Gestell. Der Schlitten hat einen Außendurchmesser von nur 120 mm und kann in X- und Y-Richtung innerhalb eines kreisförmigen Arbeitsraums mit einem Durchmesser von 22 mm positioniert werden. Unabhängig von der Schlittenposition sind unbeschränkte Drehungen um die Z-Achse möglich.



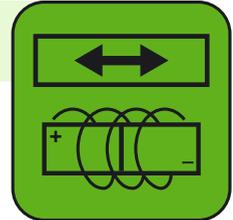
Scu/77048@IFW

Eine magnetisch vorgespannte aerostatische Lagerung führt den Schlitten berührungslos in der Bewegungsebene. Außen trägt der Schlitten 8 Segmente mit Profilgittern unterschiedlicher Ausrichtung. 12 ins Gestell integrierte Düsen bilden mit dem jeweils gegenüberliegenden Profilgitter Aktoren. Die Abbildung zeigt einen Luftstrahl, der aus einer Düse austritt und am Profilgitter abgelenkt wird. Die horizontale Komponente  $F_h$  der Reaktionskraft  $F$  treibt den Schlitten an. Jede Düse wird einzeln über ein Proportionalventil gesteuert. Position und Ausrichtung des Schlittens wird von vier Lasertriangulationssensoren gemessen. Dazu sind zwei Scheiben mit bekanntem Durchmesser als Messgeometrie exzentrisch am Schlitten befestigt.

Arbeitsraum (X,Y)	Ø 22 mm
Drehfreiheit ( $\varphi$ )	> 360°
Vorschubkraft	1,2 N
Schlittenmasse	0,393 kg

## ■ Kleine kompakte Linear- und Planardirektantriebe

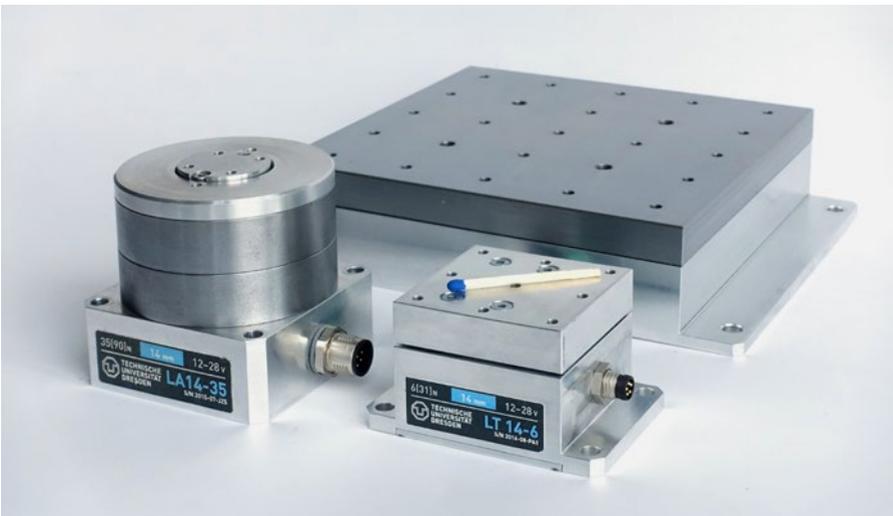
Kompakte ein- und mehrachsige elektrodynamische Vorschubmodule für kleine Werkzeugmaschinen.



**Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig**  
**Dr.-Ing. Thomas Bödrich**  
**Institut für Feinwerktechnik und**  
**Elektronik-Design (IFTE)**  
**Technische Universität Dresden**

**ifte**

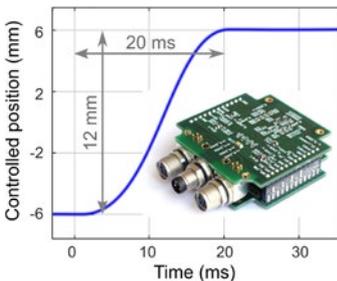
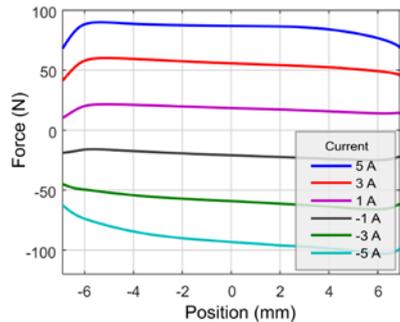
 Helmholtzstraße 10 · 01069 Dresden  
 [thomas.boedrich@tu-dresden.de](mailto:thomas.boedrich@tu-dresden.de)  
 [www.ifte.de](http://www.ifte.de)



Kurze Verfahrswege bis ca. 25 mm gestatten Lineardirektantriebe mit einfachem einphasigen Aufbau, z. B. für kleine Werkzeugmaschinen oder die Automatisierungstechnik. Speziell Ausführungen mit bewegten Dauermagneten und eisenbehalteter Statorwicklung ermöglichen hohe Wandlergüten, d. h. große Kräfte bei kleinen Verlustleistungen und kleinem Bauraum. Eine Reihe solcher kompakten, dynamischen und kostengünstigen Linearachsen und -tische sowie ein neuartiger Planardirektantrieb wurden entwickelt, aufgebaut und getestet. Sie zeichnen sich aus durch:

- integrierte Wälz- oder Federführungen,
- integrierte inkrementelle oder absolute Wegsensoren mit Auflösungen von 0,16 bis 1,25  $\mu\text{m}$ ,
- integrierte flachheitsbasierte Lageregelung,
- „sensorlose“ Kraftregelung,
- Steuerbefehle mittels EtherCAT, USB oder RS 232.

Die unteren Abbildungen zeigen beispielhaft eine kompakte Linearachse mit integrierter Ansteuerung, die zugehörige gemessene Kraft-Weg-Strom-Charakteristik und eine gemessene geregelte Sprungantwort.



**Linearachse LA 14-35**

Verfahrbereich	14 mm
Nenn-/Spitzenkraft	$\pm 35 / \pm 90 \text{ N}$
Abmessungen	65 x 65 x 63 mm
Sensorauflösung	1,25 $\mu\text{m}$
Spannung	12...28 VDC
Schnittstellen	EtherCAT, RS232

■ Vorschubeinheiten auf Basis von nachgiebigen Mechanismen

Qualifizierung von funktionsintegrierten Vorschubeinheiten auf Basis von nachgiebigen Mechanismen in kleinen Werkzeugmaschinen für kleine Werkstücke.



**Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg**  
**Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik (LaFT)**  
**Helmut-Schmidt-Universität**

Holstenhofweg 85 · 22043 Hamburg  
 laft@hsu-hh.de  
 www.laft-hh.de



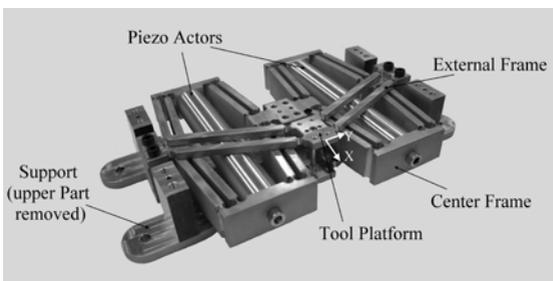
**Prof. Dr.-Ing. Rolf Lammering**  
**Professur für Mechanik**  
**Helmut-Schmidt-Universität**

Holstenhofweg 85 · 22043 Hamburg  
 rolf.lammering@hsu-hh.de  
 www.hsu-hh.de/mechanik

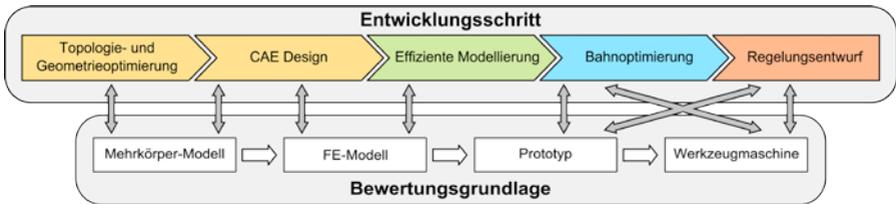
**Professur für Mechanik**

**Prof. Dr. Thomas Schuster**  
**Professur für Numerische Mathematik**  
**Universität des Saarlandes**

66123 Saarbrücken  
 sek-schuster@num.uni-sb.de  
 www.num.uni-sb.de/schuster/



Im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes wurde ein ganzheitlicher, nichtintuitiver Entwicklungsprozess von Vorschubeinheiten auf Basis nachgiebiger Mechanismen erarbeitet. Entwicklungsingenieuren und Anwendern von kleinen Werkzeugmaschinen, die auf nachgiebigen Mechanismen basieren, wurde eine wissenschaftlich abgesicherte und standardisierte Vorgehensweise zur Produktentwicklung verfügbar gemacht, die die Generierung optimaler konstruktiver Lösungen ermöglicht. Dies beinhaltet neben der Generierung der Topologie und der Geometrie der elastischen Gelenke auch eine entsprechende Modellierung zur Verwendung in der mathematischen Bahnoptimierung sowie im Entwurf der Regelung. Durch die direkte Einbindung der Entwicklungswerkzeuge in ein ganzheitliches System können Entwicklungsprozesse effizient gestaltet werden.

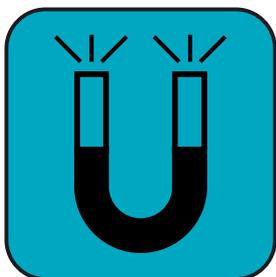
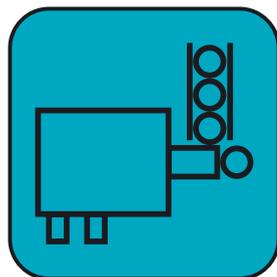
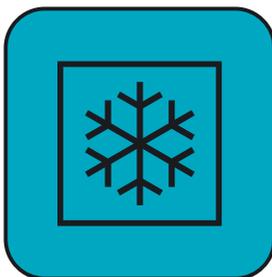
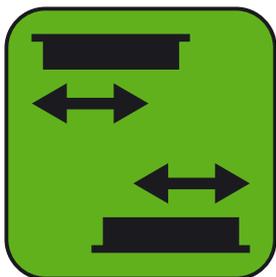
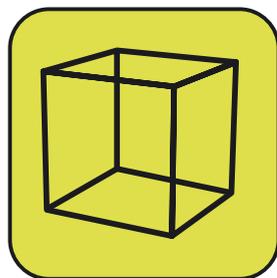
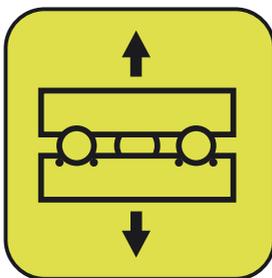


Beispielhaft wurde der abgeleitete Entwicklungsprozess anhand einer Vorschubeinheit mit zwei Freiheitsgeraden angewendet. Das Modul setzt sich aus zwei Piezoaktoren zusammen, deren Stellwege durch einen nachgiebigen Mechanismus verstärkt werden. So wurde ein Arbeitsraum in X- und Y-Richtung generiert, in dem ein Werkzeug oder Werkstück operieren kann. Um die Vorschubeinheit optimal in eine modulare Werkzeugmaschine zu integrieren, wurde ein adaptiver Regler entwickelt, welcher sich der aktuellen Konfiguration und Belastung in der Werkzeugmaschine anpasst. Die Vorschubeinheit kann mit Hilfe von Schnittstellen in kleinen Werkzeugmaschinen integriert werden.

Abmessungen	210 x 175 x 57,5 mm
Masse	1.750 g
Verfahrweg	1,6 x 3,5 mm
Genauigkeit	1 µm

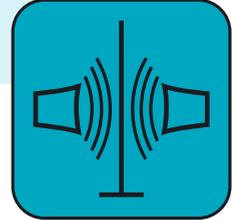


# Zusatzmodule



## ■ Hochgenaues Millimeterwellenradar für die Mikrobearbeitung

Millimeterwellen Radar-Sensorik zur hochgenauen Positionsmessung in kleinen Werkzeugmaschinen.



**Prof. Dr.-Ing. Nils Pohl**  
**Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik**  
**und Radartechnik (FHR)**

**Fraunhofer**

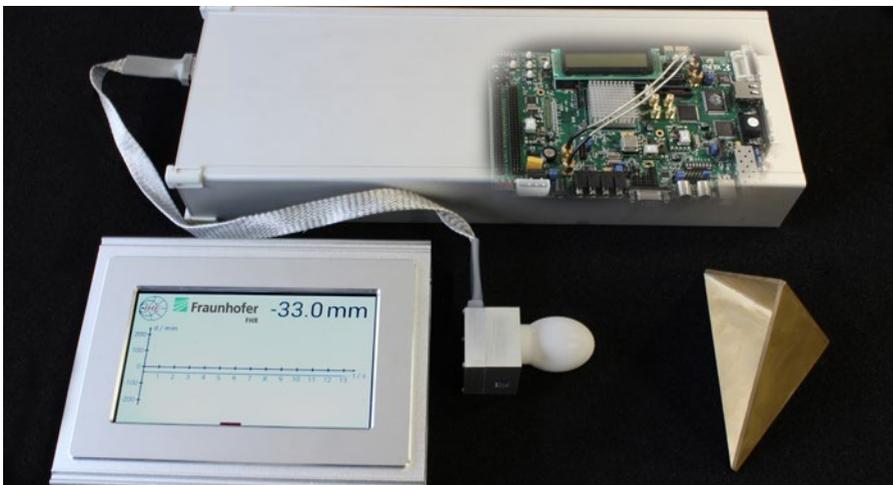
 Fraunhoferstraße 20 · 53343 Wachtberg  
 [nils.pohl@fhr.fraunhofer](mailto:nils.pohl@fhr.fraunhofer)  
 [www.fhr.fraunhofer.de](http://www.fhr.fraunhofer.de)

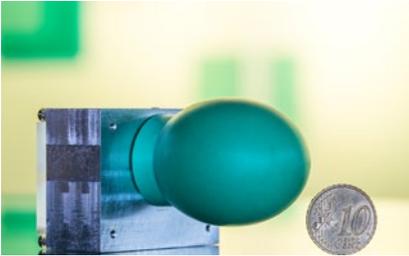


**Prof. Dr.-Ing. Thomas Zwick**  
**Institut für Hochfrequenztechnik**  
**und Elektronik (IHE)**

**Karlsruher Institut für Technologie**

 Engesserstraße 5 · 76131 Karlsruhe  
 [thomas.zwick@kit.edu](mailto:thomas.zwick@kit.edu)  
 [www.ihe.kit.edu](http://www.ihe.kit.edu)

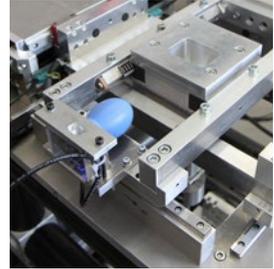




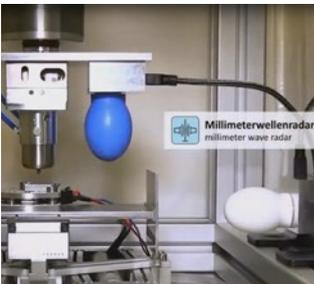
In Kooperation der beiden Institute FHR und IHE wurde ein hochgenauer Radarsensor realisiert, der eine flexible Integration in unterschiedliche Werkzeugmaschinen (WZM) Module ermöglicht. Die Durchführung von hochgenauen, absoluten Messungen nahe der Wirkstelle ist ein wesentlicher Vorteil des Radarkonzepts. Die

fortschreitende Miniaturisierung der WZM-Module im SPP erfordert in vielen Fällen eine angepasste Messtechnik, die nach dem aktuellen Stand der Technik nicht mit anderen Messsystemen bedient werden kann. Die Anforderungen an den Sensor sind:

- Adaptive miniaturisierte Sensorlösung für flexible Integrationsmöglichkeit in WZM-Module,
- Wirkstellennahe Abstandsmessung mit Mikrometer-Genauigkeit über kleine und große Abstände,
- Robuste Messungen auch unter schwierigen Bedingungen wie Spanflug, Kühlmittelnebel, etc.,
- Kostengünstige Integration in Werkzeugmaschine.



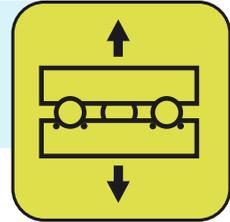
Der realisierte Radarsensor verwendet einen integrierten SiGe Transceiver-Chip für eine kostengünstige Realisierung und arbeitet im Frequenzbereich zwischen 68 GHz und 93 GHz. Die große Bandbreite des Radars von 25 GHz ermöglicht eine Distanzauflösung im mm-Bereich und Genauigkeiten im einstelligen Mikrometerbereich. In Kombination mit einem FPGA können Messwiederholraten von 100 Hz erreicht werden, so dass das Radar zur Regelung von WZM-Modulen genutzt werden kann.



Abmessungen (Radar)	40 x 50 x 77 mm
Masse (Radar)	185 g
Genauigkeit	Standardabweichung auf festes Ziel < 1 µm
Absolutgenauigkeit	< 5 µm
Messwiederholrate (FPGA)	100 Hz / 10 ms
Schnittstelle (FPGA)	Ethernet

## ■ Multifunktionale Schnittstelle für kleine modulare Werkzeugmaschinen

Funktions- und prinziphybride Schnittstellen für die schnelle Rekonfiguration kleiner modularer Werkzeugmaschinen zur Nutzung durch ein Anwenderkollektiv.



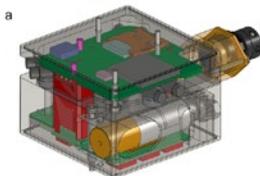
**Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg**  
**Institut für Konstruktions- und**  
**Fertigungstechnik (LaFT)**  
**Helmut-Schmidt-Universität**

Holstenhofweg 85 · 22043 Hamburg

laft@hsu-hh.de

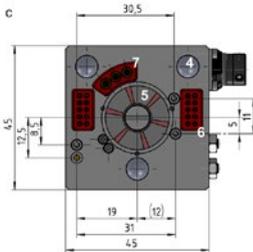
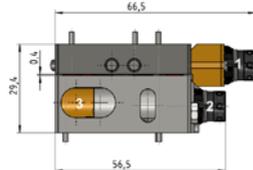
www.laft-hh.de

**LaFT**  
 LABORATORIUM FERTIGUNGSTECHNIK

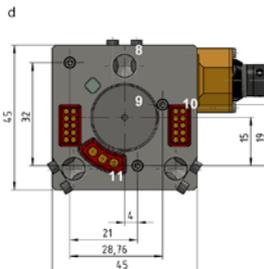


Schnittstelle im Zusammenbau

b Seitenansicht, Ober-u. Unterteil



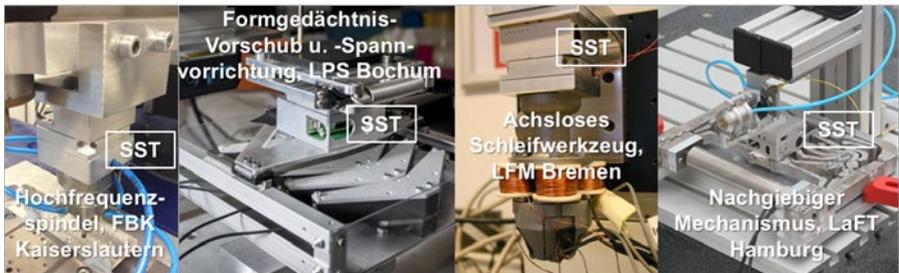
Schnittstellenunterteil  
 maschinenseitig



Schnittstellenoberteil  
 werkzeugseitig

- 1 Minimax-Anschluss nach außen zur Leistungs- und Signalübertragung, werkzeugseitig
- 2 Minimax-Anschluss nach außen zur Leistungs- und Signalübertragung, maschinenseitig
- 3 EC-Motor
- 4 Keramikugel
- 5 Magnetsystem
- 6 Steckverbinder mit Signalkontaktstiften
- 7 Steckverbinder mit Leistungskontaktstiften
- 8 Hartmetallrundstäbe
- 9 Haftplatte
- 10 Gegenstück Signalkontakt
- 11 Gegenstück Leistungskontakt

Kleine Werkzeugmaschinen für die Mikrofertigung bieten großes Potential zur Modularisierung durch Miniaturisierung. Um Module schnell, aufwandsarm und präzise zu entsprechenden kleinen Werkzeugmaschinen zu konfigurieren sind Schnittstellen notwendig, die neben der mechanischen Positionierung auch die Möglichkeit zur Übertragung von elektrischer Energie und Information bieten. Hierzu wurde eine funktions- und prinzipiell hybride Schnittstelle (SST) entwickelt, die neben der schnellen (Re)konfiguration kleiner, modularer Werkzeugmaschinen aus den Einzelmodulen des SPP auch für wandlungsfähige Montagesysteme und als Werkzeugschnittstelle für kleine Roboter genutzt werden kann.

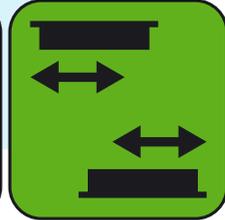
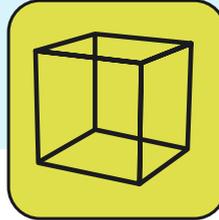


Erfolgreiche Verifikation der SST in kleinen Werkzeugmaschinen durch (v.l.n.r.): mechanische Verbindung im Fräs-/Bohrprozess, Übertragung des Steuersignals/der Spannungsversorgung, keine Störeinflüsse auf/durch weiteres Magnetfeld, mechanische Verbindung bei Beschleunigung. Die Tabelle zeigt eine Zusammenfassung der Schnittstellencharakteristika.

Hochgenaue, mechanische Kopplung durch 6-Punkt-Kontakt und schaltbares Magnetsystem mit einer Präzision von ca. $0,5 \mu\text{m}$ in Translation und $0,3''$ in Rotation; ca. 70 N max. Haftkraft, geöffnet ca. 1,5 N Restkraft, stufenlos einstellbar; max. Belastung 170 N
Intelligentes, sicheres und automatisiertes Koppeln (Module identifizieren, Konfigurationen zählen und speichern, inkompatible Konfigurationen verbieten, Fehlerbudgets für spezifische Konfigurationen ablegen und aufrufen)
Fertigungsfolge/-historie auf dem Werkstückträger, Modulmodell, Werkzeugverschleißprofile und Sensorsignale speichern und verarbeiten
Signalübertragung über 20 Pins; Energieübertragung über 3 Leistungspins mit 120 W pro Pin
Modular, skalierbar, austauschbar, anpassbar durch den Anwender

## ■ Kleine Werkzeugmaschine

Modular strukturierte, (re)konfigurierbare Maschinen für die Mikrobearbeitung mittels kooperativer Bewegungserzeugung.

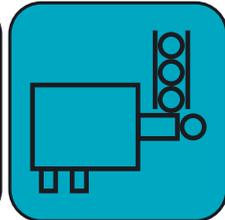
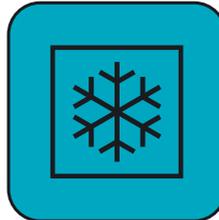


**Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl**  
**Institut für Steuerungstechnik**  
**der Werkzeugmaschinen und**  
**Fertigungseinrichtungen (ISW)**  
**Universität Stuttgart**

 Seidenstraße 36  
 70174 Stuttgart

 [christoph.batke@isw.uni-stuttgart.de](mailto:christoph.batke@isw.uni-stuttgart.de)

 [www.isw.uni-stuttgart.de](http://www.isw.uni-stuttgart.de)



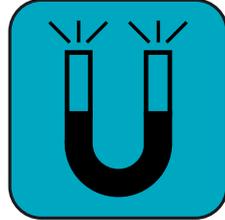
**Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder**  
**Institut für Werkzeugmaschinen und**  
**Fertigungstechnik (IWF)**

**Technische Universität Braunschweig**

 Langer Kamp 19b · 38106 Braunschweig

 [t.tounsi@tu-braunschweig.de](mailto:t.tounsi@tu-braunschweig.de)

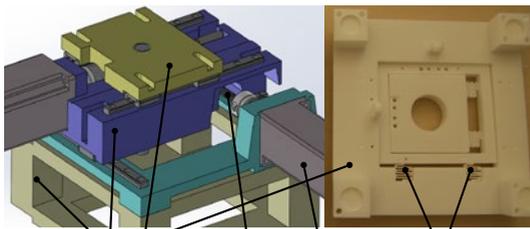
 [www.tu-braunschweig.de/iwf](http://www.tu-braunschweig.de/iwf)



Bisherige Werkstücke aus der Mikrozerspanung werden auf Werkzeugmaschinen gefertigt, die im Vergleich zu den zu bearbeitenden Mikrostrukturen bezüglich ihres Bau- und Arbeitsraums überdimensioniert sind. Dies führt zu dem Ansatz, die Maschinenabmessungen zu verkleinern und größenangepasst zu den Werkstücken aufzubauen. Diese Maschinen lassen sich aber nicht einfach durch einen Skalierungseffekt aufbauen, es ist vielmehr eine grundlegende Neukonstruktion von Rahmengestell, Antrieben und neuen Kinematiken erforderlich.

Mit dem Gestaltungsansatz des modularen Production Cube Module und der kooperativen Bewegungserzeugung kann eine insgesamt kompaktere Bauweise erreicht werden, die über Adapterplatten beliebige Kombinationen unterschiedlicher Fertigungsverfahren zulässt.

Eine weitere Skalierung zu kleineren Maschinen hin erlaubt es, die Maschine mittels generativer Verfahren herzustellen und dadurch flexible, individuelle



Generativ gefertigtes KGT Bauteil Motor Integrierte Federn

Maschinen zu gestalten und neuartige Strukturen zu integrieren.

Die Werkstückspannvorrichtung kann das Arbeitsergebnis des Zerspanprozesses wesentlich beeinflussen. Eine wichtige Anforderung an Spannsysteme, besonders in der Mikrobearbeitung, ist die Forderung nach einer hohen Flexibilität. Diese ermöglicht eine schnelle und einfache Einspannung und somit Bearbeitung verschiedenster Bauteile, Geometrien und Werkstoffe. Eine entwickelte Adhäsionsspanneinheit kann sowohl mit Wasser als auch mit Wachs als Spannmedium betrieben werden und erlaubt die Einspannung von unterschiedlichsten Werkstoffen. Eine Magnetspanneinheit basierend auf Permanentmagneten eignet sich für das Einspannen von ferromagnetischen Werkstoffen, wie sie bspw. Im Formenbau eingesetzt werden. Beide erreichen Spannkräfte von bis zu 30 N in Vorschubrichtung.

	<b>Abmessungen</b>	<b>Masse</b>
<b>Magnetspannvorrichtung</b>	Ø40 x 30 mm	150 g
<b>Adhäsionsspannvorrichtung</b>	Ø45 x 36 mm	65 g
<b>Gedruckte Werkzeugmaschine</b>	150 mm <sup>3</sup> (ohne Motoren)	ca. 5 kg
<b>Kleine Werkzeugmaschine</b>	450 x 450 x 700 mm	ca. 80 kg





Das Ganze ist mehr  
als die Summe aller Teile.

— Aristoteles