

## Die intelligente Kraftmessung: Innovativer diamantartiger Kraftsensor für die Verschrau- bungs- und Spanntechnik (DiaKra)

### Das Projekt

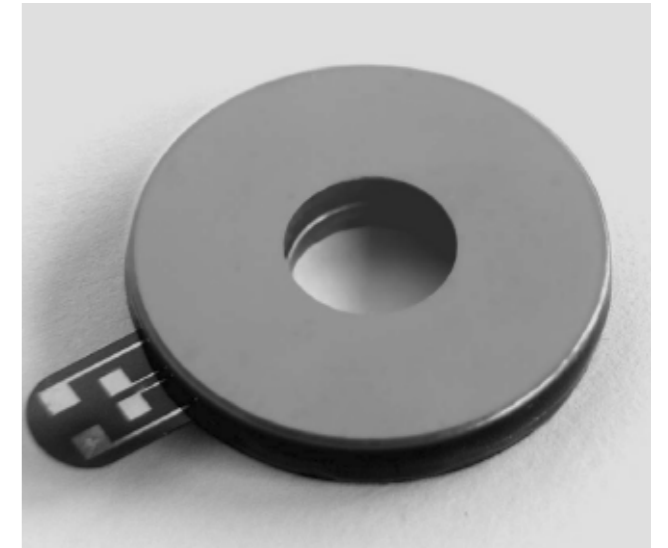
Dieses Projekt hat das Ziel, einen neuartigen Dünnschicht-Kraft-Sensor einschließlich der Messelektronik für die Verschraubungs- und Spanntechnik zu entwickeln. Der Sensor besteht aus einer, nur wenige Mikrometer dicken Hartstoffschicht, die auf diamantartigem Kohlenstoff basiert und extrem verschleiß- und korrosionsfest ist. Im Gegensatz zu bekannten Kraft- und Drucksensoren, die nach dem Biege-/Dehnungsprinzip arbeiten und damit eine Deformation der Messstelle erforderlich machen, bleibt das System völlig steif. Die Kraftmessung erfolgt über eine elektrische Widerstandsänderung, wobei die Schicht auch bei großen Lasten nur eine marginale, im Nanometerbereich liegende Verformung erfährt. Die Anwendung kann also direkt im Kraftschluss der Bauteile erfolgen, ohne dass zusätzliche Setzfügen eingebaut werden müssen.

Im Vergleich zu den bisher bekannten piezoresistiven Sensoren, die mechanisch nur sehr eingeschränkt belastbar sind, wird hier eine Sensorschicht mit hervorragenden tribologischen Eigenschaften verwandt, die direkt auf die mechanische Komponente und im Reibkontakt applizierbar ist.

Kraft- oder Drucksensoren für den Mittel- bis Hochlastbereich werden heute in aufwändiger Technik hergestellt. Die Messung erfolgt dabei mit Hilfe von Dehnungsmesssensoren (DMS) oder piezo-elektrischen, sowie piezo-resistiven Sensoren, die an geeigneten Stellen in einem Messgehäuse angeordnet werden. Diese Sensoren sind sehr teuer und nicht flexibel einsetzbar. Die Verbreitung der derzeit am Markt verfügbaren Kraftsensoren ist daher sehr beschränkt.

Das vorliegende Projektvorhaben ist auf die Entwicklung neuartiger Sensoren mit hoher Systemsteifigkeit für folgende Anwendungen ausgerichtet.

- (1) Kraftsensor in Form einer flexibel einsetzbaren Unterscheibe für die Verschraubungstechnik
- (2) Spannkraftsensor zur Messung der Haltekraft in Werkzeugsystemen wie Werkstückspannvorrichtungen und Werkzeugwechselsystemen
- (3) Dynamischer Drucksensor basierend auf Teller und Wellfederanwendungen



piezoresistive DiaForce®-Schicht wird von drei Dünnschicht-Elektroden zur Messung der Kraftverteilung kontaktiert

Neben der Schicht- und Materialoptimierung sowie der Mikrostrukturierung mittels Lasertechnik, stand insbesondere auch die anwendungsoptimierte Systementwicklung im Vordergrund. So war ein großer Teil der Arbeiten mit der Entwicklung der Messelektronik, geeigneter Schnittstellen zu Überwachungs- und Steuerungseinrichtungen, sowie der telemetrischen Ansteuerung der Sensoren befasst.

Diamantartige amorphe Kohlenwasserstoffschichten werden seit Jahren erfolgreich für verschiedene tribologische Anwendungen entwickelt. Dabei kamen unterschiedliche Schichtsysteme zur Anwendung, die sich sowohl im Schichtaufbau als auch in der Zusammensetzung unterscheiden. Neben so genannten DLC-(diamond like carbon) Schichten (diamantartige amorphe Kohlenstoffschichten) mit unterschiedlichen Wasserstoffanteilen wurden verschiedene metallhaltige DLC Schichten entwickelt. Es ist bekannt, dass die mechanischen Eigenschaften von DLC-basierten Schichten in weiten Grenzen variiert und die Schichten auf unterschiedliche Unterlagen abgeschieden werden können. Die Härte dieser Schichten liegt typischer Weise zwischen 15 - 30 GPa. Sie besitzen ein relativ großes E-Modul von 140 - 270 GPa und zeigen in einer Reibpaarung mit Stahl oder DLC-Oberflächen sehr geringe Reibungskoeffizienten zwischen 0,1 und 0,2. Diese positiven Eigenschaften haben dazu geführt, dass DLC- bzw. Me-DLC-Schichten bereits eine breite industrielle Nutzung erfahren haben.

Das Fraunhofer IST hat auf der Basis von DLC-Schichten neuartige Kraftsensoren entwickelt, die hervorragende tribologische mit exzellenten kraftsensorischen Eigenschaften kombinieren. Der Sensor wird mit modernen Plasmaverfahren bei Temperaturen < 100°C hergestellt und kann auf sehr

unterschiedliche Grundkörper aufgebracht werden. Diese als DiaForce® geschützte Beschichtung lässt sich direkt im Reibkontakt oder an anderen mechanisch belasteten Orten einsetzen. Während für die heute verfügbaren Kraftsensoren nach dem DMS-Prinzip zwingend eine Deformation der Messstelle erforderlich ist, kann der neue Kraftsensor in vollkommen steifer Anordnung verwendet werden.

Die Messung der Kraft erfolgt piezoresistiv und erlaubt das Messen statischer und dynamischer Belastungen. Dabei wird die Last einfach senkrecht zu einer mit DiaForce® beschichteten Oberfläche eingeleitet und die dadurch verursachte Widerstandsänderung der Schicht gemessen. Es sind Messströme von nur wenigen Mikroampere erforderlich. Während DMS-Aufnehmer eine Empfindlichkeit – definiert durch den K-Faktor – von 2 besitzen, zeigen die DiaForce®-Schichten K-Werte bis zu 1000 und sind damit um Größenordnungen empfindlicher. Da die Sensorschicht sehr hart, aber auch elastisch ist, kann sie sowohl Druck- als auch Zugspannungen aufnehmen. Die Vorteile des Konzeptes, das diesem Projekt zugrunde liegt, lassen sich wie folgt definieren:

- Extrem hohe mechanische Belastbarkeit sowohl bei Druck- als auch bei Zugbelastung (bekannte piezokeramische Sensoren können nur Druckkräfte aufnehmen)
- Sehr geringe Schichtdicke erforderlich (1-4 µm)
- Die Kraftmessung erfolgt in einer mechanisch steifen Anordnung, d. h. die Messung erfolgt nicht über Verformungen des Bauteils, wie bei den heute üblichen DMS-Sensoren
- Flexible Anwendung, direkt applizierbar auf unterschiedliche technische Oberflächen
- Geringe Reibzahl, geringer Abrasiv- und Adhäsivverschleiß
- Sehr korrosionsbeständig, gute Passivierung
- Kostengünstige Herstellung

Im Rahmen dieses Projektes wurden Lösungen für verschiedene Anwendungen entwickelt. Als Beispiel wird im Folgenden ein Unterlegscheibensensor beschrieben.

### Kraftsensoren als Unterlegscheiben

Schraubverbindungen werden heute nach Drehmomentangaben montiert. Gemessen wird dabei allerdings nicht die Spannkraft, sondern die Reibungskraft der jeweiligen Schraube. Dies führt bei geölten oder verrosteten Schrauben zu gravierenden Abweichungen.

Der in diesem Projekt entwickelte Unterlegscheibensensor kann je nach Einbauort in geschützter Ausführung als gekapselte Schicht zwischen zwei Scheiben oder als Einzelschichtsensor ausgeführt werden.

Die Anwendung der DiaForce®-Schicht mit innenliegender Elektrode zwischen zwei Scheiben bietet neben der idealen Kapselung auch noch den Vorteil, dass eine lokale Messung der Kraftverteilung durch separierte Elektrodenflächen erfolgen kann. Eine weitere positive Möglichkeit besteht darin, dass mit Hilfe preiswerter fotolithographischer Techniken auch die erforderlichen Anschlüsse und weitere Sensoren auf dem Kontaktträger realisiert werden können. Dabei

lässt sich auch ein Temperatursensor mit Hilfe einer Mikrostrukturierungstechnik integrieren. Dieser Wert kann dann zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Kraftsensors verwandt werden. Des Weiteren können telemetrische Komponenten, wie z. B. Spulen und Antennen oder ein Auswerte- und Übertragungschip integriert werden.

### Die Kooperation

Die Entwicklung der Sensoren für die Verschraubungs- und Spanntechnik erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen den institutionellen und industriellen Projektpartnern. Dabei erfolgt die Weiterentwicklung der DiaForce®-Schicht in enger bilateraler Arbeitsteilung zwischen dem Fraunhofer IST und dem IHT der TU Braunschweig. Die Entwicklung der Messelektronik wird vom IMS durchgeführt. Auch hierzu erfolgen intensive Abstimmungen hinsichtlich der Anforderungen. Das Gleiche trifft auch für die Entwicklung der telemetrischen Systeme zu. Hier werden für die verschiedenen Anwendungen Systeme mit unterschiedlicher Reichweite entwickelt. Die im Projekt geplanten Anwendungen der DiaForce®-Schichten zum Aufbau der kraftmessenden Unterlegscheibensensoren erfolgen federführend bei der Firma E. Winkemann, während sich die Firma C. Bauer auf Anwendungen im Bereich Automatikgetriebe und Klopfsensor konzentriert. Bei den Spannsystemen verfolgt die Firma Ott-Jakob die Integration der DiaForce®-Sensoren in Werkzeugwechselsysteme (Spannzangen) und die Firma Hilma-Römheld die Entwicklung von kraftgesteuerten Werkstückspannvorrichtungen.

### Die Perspektiven

Aufbauend auf den erreichten Stand im Projekt „DiaKra“ werden weitere Entwicklungsprojekte konzipiert, die die verschiedenen Anwendungen zur Marktreife weiter entwickeln sollen. Dazu zählt ein Nachfolgeprojekt, das sich mit der Entwicklung von kraftsensorintegrierten Unterlegscheiben befasst wird. Geplant ist die Entwicklung eines kompletten Systems, welches kraftsensorintegrierte Unterlegscheiben mit drahtgebundener elektrischer Versorgung und telemetrischer Signalübertragung zusammen mit einem geeigneten Werkzeug, z. B. einem Steckschlüsselsatz mit integrierter berührungsloser Messelektronik vorsieht. Weitere Entwicklungsprojekte mit dem Ziel marktfähige Produkte zu entwickeln, werden zurzeit beim Klopfsensor und beim DiaForce®-Sensor für Spannwerkzeuge vorbereitet.

### Das Projekt im Überblick:

Die intelligente Kraftmessung: Innovativer diamantartiger Kraftsensor für die Verschraubungs- und Spanntechnik (DiaKra)  
**Technologiefeld /Branche:** Verkehrstechnik, Robotik, Energietechnik, Mikrosystemtechnik  
**Laufzeit:** 01.08.2003 bis 31.10.2005  
**Projektkosten:** 939.988 Euro  
**Förderungssumme:** 693.991 Euro

### Projektpartner **Forschung**

#### Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST)

(Koordinator)  
Dipl.-Ing. Holger Lüthje  
Bienroder Weg 54E  
38108 Braunschweig  
Tel.: 0531 2155-644  
Fax: 0531 2155-900  
E-Mail: luethje@ist.fraunhofer.de  
**Projektschwerpunkte:** DiaForce®-Technologie, Projektkoordination

#### Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS)

Dr. Gerd vom Bögel  
Finkenstr. 61  
47057 Duisburg  
Tel.: 0203 3783-228  
Fax: 0203 3783-277  
E-Mail: Gerd.vomBoegel@ims.fhg.de  
www.ims.fhg.de  
**Projektschwerpunkt:** Entwicklung der Messelektronik

#### Technische Universität Braunschweig Institut für Halbleitertechnik IHT

PD Dr. Erwin Peiner  
Hans-Sommer-Str. 66  
38106 Braunschweig  
Tel.: 0531 391-3774  
Fax: 0531 391-5844  
E-Mail: IHT@tu-bs.de  
www.iht.tu-bs.de  
**Projektschwerpunkt:** Elektrische Materialcharakterisierung

#### Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Sensorik  
Prof. Dr. Reinhard Lerch  
Paul-Gordan-Str. 3/5  
91052 Erlangen  
Tel.: 09131 85-23131  
Fax: 09131 85-23133  
E-Mail: reinhard.lerch@lse.e-technik.uni-erlangen.de  
www.lse.uni-erlangen.de  
**Projektschwerpunkt:** Schaltungsentwicklung

### Projektpartner **Industrie**

#### Christian Bauer GmbH + Co. KG

Dr. Lothar Brückner  
Schorndorfer Str. 32  
73642 Welzheim  
Tel.: 07182 12-256  
Fax: 07182 12-315  
E-Mail: l.brueckner@christianbauer.com  
www.christianbauer.com  
**Branche:** Feinwerktechnik  
**Projektschwerpunkt:** DiaForce®-Anwendungen auf Teller- und Wellfedern

#### E. Winkemann GmbH & Co. KG

Detlev Dehne  
Bremkerlinde 5  
58840 Plettenberg  
Tel.: 02391 819-260  
Fax: 02391 819-100  
E-Mail: d.dehne@winkemann.de  
www.winkemann.de  
**Branche:** Maschinenbau  
**Projektschwerpunkt:** Kraftsensoren als Unterlegscheibe

#### Hilma-Römheld GmbH

B. Ginsberg  
Schützenstr. 74  
57271 Hilchenbach  
Tel.: 02733 281-194  
Fax: 02733 281-113  
E-Mail: b.ginsberg@hilma.de  
www.hilma.de  
**Branche:** Maschinenbau  
**Projektschwerpunkt:** Spannwerkzeuge mit integrierten DiaForce®-Spannkraftsensoren

#### Ott-Jakob GmbH & Co Spanntechnik KG

Stephan Gast  
Industriestr. 3-7  
87663 Lengenwang  
Tel.: 08364 9821-66  
Fax: 08364 9821-10  
E-Mail: Gast@ott-jakob.de  
www.ott-jakob.de  
**Branche:** Maschinenbau  
**Projektschwerpunkt:** DiaForce®-Sensoren integriert in Werkzeugspannsysteme