

# Neue mikromechatronische PAD Präzisionsstellantriebe - mehr als eine Alternative zu Elektromotoren?

## PAD, a disruptive micromechatronic drive technology - an alternative to electric motors, or even more?

Dr. Andreas Kappel, Siemens AG, Munich, Germany, andreas.kappel@siemens.com

Dr. Bernhard Gottlieb, Siemens AG, Munich, Germany, bernhard.gottlieb@siemens.com

Dipl.-Ing. Carsten Wallenhauer, Siemens AG, Munich, Germany, carsten.wallenhauer@siemens.com

Dipl.-Ing. Roland Zeichfußl, Technical University Munich, Germany, roland.zeichfuessl.ext@siemens.com

### Kurzfassung

PAD (piezoelectric actuator drive) ist ein neues Kinematikprinzip, welches periodische Bewegungen von Festkörperaktoren verlustarm in kontinuierliche und präzise steuerbare Rotationsbewegungen konvertiert. Die hierzu eingesetzten Piezoaktoren dienen gleichzeitig als Sensoren zur Detektion von Lastmomenten. Die skalierbare PAD-Antriebstechnologieplattform besitzt eine hohe funktionale Integrationsdichte und deckt den gesamten Bereich von mikroskopischen bis zu makroskopischen Antrieben ab. Das neue Antriebsprinzip benötigt nur wenige Komponenten.

### Summary

PAD (piezoelectric actuator drive) is a novel principle for the efficient transformation of the linear motion of solid state actuators into powerful and precisely controllable rotation. The piezoelectric effect not only enables actuation, but also provides sensor capabilities in parallel, which PAD uses for sensitive torque measurement. PAD is a scalable drive technology with a high functional density, covering the whole range of applications from microscopic to macroscopic systems. The new concept only requires a few parts.

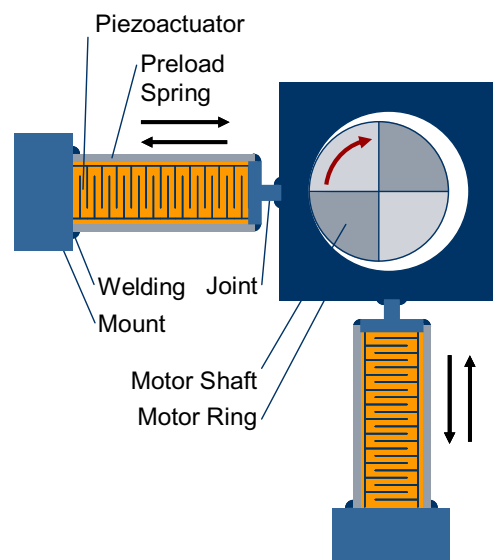
## 1 Die PAD Technologieplattform

PAD (piezoelectric actuator drive) ist eine neue Stellantriebstechnologie [1], [2]. Im Unterschied zu Elektromotoren werden bei PAD Festkörperaktoren verwendet. Die PAD Kinematik wandelt longitudinale Bewegungen, z.B. von Piezoaktoren, auf sehr effiziente Weise in Rotation um. Durch die Kombination der PAD Kinematik mit den Festkörpereigenschaften von Piezoaktoren ergeben sich, im Vergleich zu Elektromotoren, eine ungewöhnlich hohe Funktionsdichte und ein besonders vorteilhaftes Eigenschaftsspektrum. Die PAD Kinematik ist hinsichtlich der Leistung und der Materialsysteme von MEMS Strukturen über Kunststoffmotoren bis hin zu metallischen Motorbauformen mit einer Leistung von über 100 Watt skalierbar.

### 1.1 Das PAD Prinzip

Das PAD Prinzip beruht auf dem Abrollen einer Motorwelle auf der Innenfläche eines die Motorwelle umschließenden Antriebsringes, so wie dieses in Bild 1 dargestellt ist. Die Bewegung des Antriebsringes wird durch zwei rechtwinklig mit dem Antriebsring verbundene Piezoaktoren bewirkt, die mit 90° phasenverschobenen Sinussigna-

len angesteuert werden, so dass sich die linearen Bewegungen der Piezoaktoren zu einer kreisförmigen Verschiebewegung des Antriebsringes überlagern. Hierfür ist es erforderlich, dass der Hub der Piezoaktoren größer ist, als die Durchmesserdifferenz von Motorwelle und Antriebsring.



**Bild 1** Generisches PAD Prinzip

Als Aktoren eignen sich u.a. Piezostacks wie sie in der Diesel/Benzin-Hochdruckdirektspritzung verwendet werden. Der Nutzhub dieser Aktoren beträgt 40 - 60  $\mu\text{m}$ . Bei einer Durchmesserdiffenrenz von 20  $\mu\text{m}$  und einem Motorwellendurchmesser von 10 mm ergibt sich für den reibschlüssigen PAD ein Untersetzungsverhältnis von 1:500. Die Steuerung der Drehrichtung erfolgt auf einfache Weise über die Phasenlage  $\pm 90^\circ$ , die der Drehgeschwindigkeit über die Ansteuerfrequenz. Der PAD ist im ausgeschalteten Zustand selbsthemmend. Im Betrieb kann der PAD in jeder Position angehalten werden, wobei im belasteten Haltezustand, dank der kapazitiven Aktoren, keine Leistung aufgenommen wird.

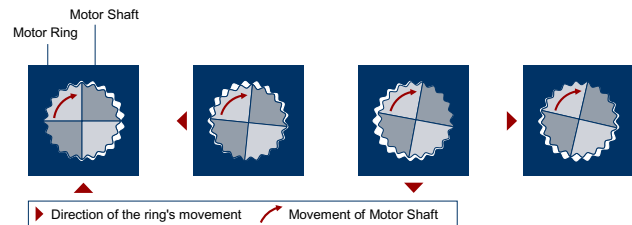
Da PAD nicht auf Magnetismus beruht, wird der Antrieb in seiner Funktion auch nicht durch Magnetfelder beeinflusst. Dies wurde in verschiedenen MRT Versuchen bei 1.5 Tesla bestätigt [3]. Umgekehrt erzeugt PAD nahezu keine EMV-Probleme, die beispielsweise die Bildgebung im MRT stören könnten. Der Umstand, dass auf die Motorwelle wirkende äußere Lastmomente zu proportionalen Reaktionskräften auf die Piezoaktoren führen, kann zur Realisierung einer Echtzeit Drehmomentmessung genutzt werden [4], [5]. PAD besteht aus nur wenigen Komponenten: einer Motorwelle, dem Antriebsring, den Aktoren sowie einem Motorgehäuse mit den Motorwellenlagern. Die mit einem reibschlüssigen PAD der in Bild 1 dargestellten Art erzielten Drehmomente liegen in der Größenordnung von 1.2 Nm. Werden für jede Linearrichtung zwei parallel wirkende Piezostacks eingesetzt, steigt das maximale Drehmoment auf 2.5 Nm.

Durch den mechanischen Schlupf bei diesen reibschlüssigen PAD Motoren, wie im übrigen auch bei allen anderen Piezomotorprinzipien (u.a. Ultraschall Motoren, Microstep Antriebe, Inchworm Antriebe, Trägheitsantriebe), ist für Positionieranwendungen ein zusätzlicher Encoder unabdingbar.

## 1.2 Formschlüssige PAD Kinematik

Durch eine formschlüssige Kraftübertragung zwischen Antriebsring und Motorwelle, mittels einer Mikroverzahnung, wird der PAD zu einem absolut positionierenden Präzisionsstellantrieb. Es muss lediglich eine Anfangsstellung der Motorwelle bekannt sein. Da die Mikroverzahnung bei gleicher Andruckkraft wesentlich höhere Tangentialkräfte überträgt, erhöht sich außerdem das Drehmoment um den Faktor 2-3, im Vergleich zu einem reibschlüssigen PAD. Bild 2 zeigt eine sequentielle Abfolge der Verschiebungsphasen des Antriebsringes und der resultierenden Drehwinkelstellungen der Motorwelle, bei formschlüssiger Kraftübertragung. Durch wiederholtes Durchlaufen des Zyklus wird die Motorwelle in kontinuierliche Rotation versetzt. Unter allen Piezomotorprinzipien ermöglicht einzig PAD eine kontinuierliche und formschlüssige Kraftübertragung bis in den Stillstand. Das Untersetzungsverhältnis der formschlüssigen PAD-Kinematik entspricht der Zähnezahldifferenz von Antriebsring und Motorwelle be-

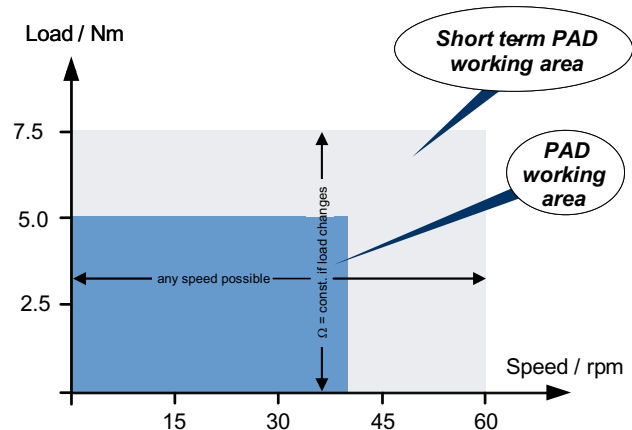
zogen auf die Zähnezahl der Motorwelle. Für die verschiedenen Motoren wurden bisher Untersetzungsverhältnisse von 1:50 bis zu 1:500 in Stahl und in Kunststoff realisiert. Die Herstellung der Verzahnungsstrukturen erfolgte durch Laserablation, Drahterodieren, Räumverfahren oder mittels Kunststoffspritzgießen. Wegen der vorteilhaften Eingriffsverhältnisse und der niedrigen Zahnbelastungen wurden bevorzugt zyklodische Zahnformen gewählt. Der Wirkungsgrad der PAD Kinematik beträgt ca. 95 %.



**Bild 2** Bewegungsabfolge beim formschlüssigen PAD

## 1.3 Generische PAD Eigenschaften

Die PAD Technologieplattform besitzt als Folge des direktwirkenden formschlüssigen Festkörperantriebs, unabhängig von der konkreten Motorbauform, eine Reihe generischer Vorteile sowie Alleinstellungsmerkmale. Beispielsweise ermöglicht die absolut spielfreie Mikroverzahnung Wiederholgenauigkeiten im Bereich einiger Bogensekunden [6]. Das Drehmoment ist, wie Bild 3 verdeutlicht, über der Motordrehgeschwindigkeit absolut konstant. Selbst bei stark wechselnden Lasten, z.B. im dynamischen Betrieb während Beschleunigungsphasen, ist die Drehgeschwindigkeit immer exakt proportional zur Ansteuerfrequenz. In Verbindung mit der hohen Antriebssteifigkeit können deshalb sowohl hochdynamische als auch äußerst langsame Präzisionsstellvorgänge ohne Stick-Slip ausgeführt werden.



**Bild 3** Drehzahl/Drehmomentcharakteristik PAD

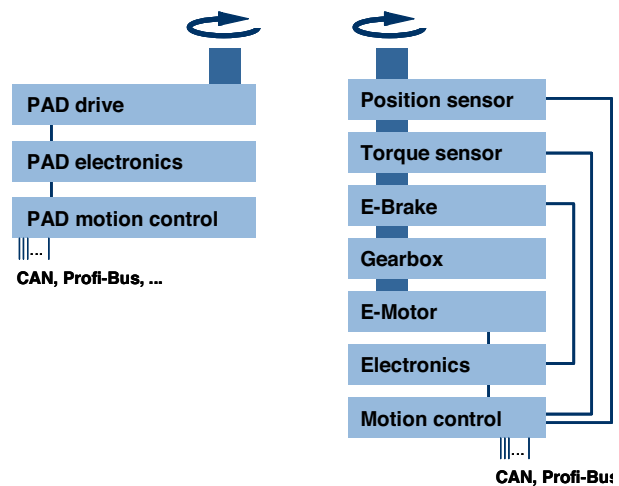
Bei Überschreiten des Maximalmomentes erfolgt ein Durchrutschen und Überspringen der Verzahnung. Die in gehärtetem Stahl oder in Kunststoff ausgeführten zyklodischen Mikroverzahnungen sind so ausgelegt, dass sie hier-

durch nicht beschädigt werden. Da der Drehwinkelversatz immer einem ganzzahligen Vielfachen eines Zahnes entspricht, kann die Absolutposition durch Detektion der Überlastereignisse elektronisch korrigiert werden. Aufgrund der hohen Antriebssteifigkeit, der großen Antriebskräfte und der geringen gespeicherten Rotationsenergie kann PAD jeden Bewegungsverlauf darstellen und innerhalb von  $<0.1$  ms bei Maximaldrehzahl die Bewegungsrichtung kommutieren. Die Nutzung des direkten piezoelektrischen Effektes der Piezoaktoren ermöglicht die Drehmomenterfassung in Echtzeit ohne zusätzliche Sensorik. Da nicht nur äußere sondern auch innere, z.B. durch Lagerreibung, hervorgerufene Lastmomente detektiert werden, ergeben sich elegante Möglichkeiten zur Selbstüberwachung (predictive maintenance). Die Leistungsaufnahme eines PAD ist direkt proportional zur Ansteuerfrequenz und geht mit abnehmender Drehgeschwindigkeit gegen Null, da die Ladung der kapazitiven Piezoaktoren bei stehendem Antrieb konstant bleibt. Ohne zusätzliche Motorbremse ist so ein leistungsloses Halten von Lasten in jeder Position möglich. Die PAD Antriebe können darüber hinaus so konfiguriert werden, dass sie spannungslos entweder selbsthemmend sind oder ein deutlich reduziertes Haltemoment (Freilauf) besitzen. Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung wichtiger PAD Eigenschaften.

<b>Key Features</b>	• Very high-precision without encoders
	• Speed-independent high torque (several Nm) and ultrahigh dynamics
	• Smart load sensing
	• Very few components
	• Reduction of peripheral elements through sensoric capabilities and redundancy of gearbox
	• Self-blocking and no power consumption when motor is on hold
	• Scalable in mechanical power output and torque
	• Easy to synchronize (open-loop controlled)
	• Planar and cylindrical motor shapes
	• Less EMV and full MRI compatibility

**Tabelle 1** Eigenschaften der PAD Technologieplattform

Bei einem Leistungsvergleich mit heutigen Elektromotoren oder Piezomotoren ist zu berücksichtigen, dass ein PAD Antriebssystem bestehend aus den drei Komponenten PAD Drive, PAD Ansteuerungselektronik und PAD Motion Control Software, den Funktionsumfang eines voll ausgebauten klassischen Servosystems besitzt, wenn nicht sogar übertrifft. Dabei ist die Komplexität eines PAD Systems, wegen der wesentlich geringeren Anzahl von Komponenten signifikant niedriger, wie Bild 4 veranschaulicht. Die Adaption eines Encoders, Drehmomentsensors, Getriebes und einer Bremse an die Antriebswelle sowie die elektrische Verdrahtung dieser Komponenten entfallen vollständig. Durch die Kompaktheit, die open-loop Steuerung und die Möglichkeit der momentenbasierten Regelung, wird der Aufbau und der Betrieb komplexer mehrachsiger Antriebssysteme z.B. in den Bereichen der Robotik und der Automatisierungstechnik erheblich vereinfacht.



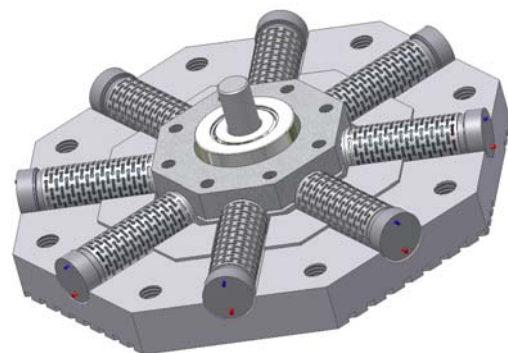
**Bild 4** Systemvergleich PAD mit Servosystem (rechts)

## 2 PAD Motorbauformen

Unter der Vielzahl von Festkörperaktoren nehmen die Piezoaktoren eine herausragende Stellung ein, da diese den höchsten Entwicklungsstand haben, zu wettbewerbsfähigen Kosten serienmäßig verfügbar sind und Sensor/Aktoreigenschaften besitzen. Die Klasse der Piezoaktoren differenziert sich in unterschiedliche Bauformen (Stack, Bieger, Scheraktor, Torque Block etc.) und Wirkungsweisen (z.B. Längseffekt, Schereffekt, Quereffekt), was für die Herstellung von PAD Antrieben unterschiedlicher Leistungsklassen und Formfaktoren von Vorteil ist.

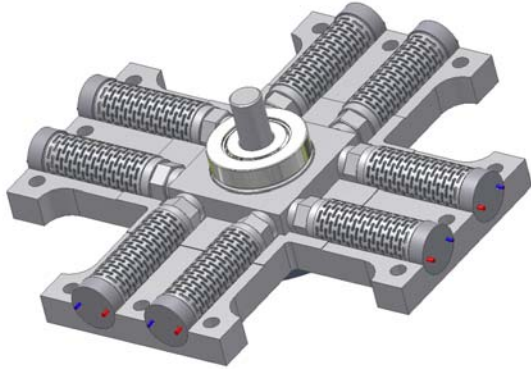
### 2.1 PowerPAD

Die Leistung eines PAD ist dem Volumen der piezoelektrischen Aktorkeramik direkt proportional. Damit kann die Leistung entweder durch größere Piezoaktoren oder durch Erhöhung der Anzahl der den Antriebsring verschiebenden Piezoaktoren gesteigert werden. Die Piezoaktoren können am Antriebsring radial, wie in Bild 5, oder orthogonal, wie in Bild 6, angebracht sein. Dies sind jedoch nur Beispiele. Durch die Vielfalt der möglichen geometrischen Konfigurationen, sind die unterschiedlichsten Formfaktoren und Leistungsklassen darstellbar.



**Bild 5** Sternförmiger OctoPAD

Die Endkappen der Piezoaktoren werden am Fußpunkt zwischen dem Gehäuseunter- und dem Gehäuseoberdeckel geklemmt. Bewegungsseitig sind die Piezoaktoren mit dem Antriebring verschweißt oder ebenfalls geklemmt. Aufgrund der hohen umlaufenden Radialkräfte werden zur Motorwellenlagerung und zur axialen Fixierung der Motorwelle Schrägnadellager eingesetzt.



**Bild 6** Kreuzförmiger OctoPAD

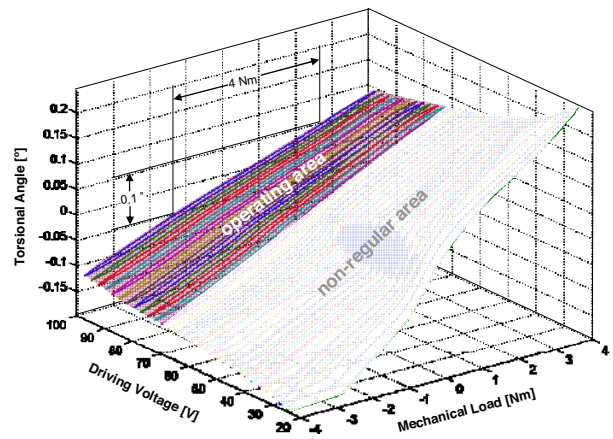
Bild 7 zeigt einen PowerPAD Prototypen der im Aufbau dem halben in Bild 6 gezeigten kreuzförmigen OctoPAD entspricht. Durch die TwinKonfiguration der Piezoaktoren mit am Antriebsring weit außen liegenden Kräfteinleitungspunkten ergibt sich eine sehr hohe Torsionssteifigkeit. Der PowerPAD wurde in zahlreichen Applikationen wie Delta3-Kinematik, CT-Tisch Antrieb, Linearachs Antrieb, Magnetresonanztomograph, XY-Positionier- und Projektionsvorrichtungen erfolgreich erprobt.



**Bild 7** PowerPAD Prototyp

Die Torsionssteifigkeit und Spielfreiheit des PowerPAD wurde durch aufgeprägte positive und negative Lastmomente und Registrierung der zugehörigen Drehwinkel mit einem hochauflösenden Encoder bestimmt. Wie Bild 8 zeigt, ist die mikroverzahnte PAD Kinematik in dem Arbeitsbereich des Motors ab  $> 70$  V Ansteuerungsspannung absolut spielfrei. Die Torsionssteifigkeit des Antriebs in diesem Bereich beträgt  $40 \text{ Nm/Grad}$ . Der Motor ist so justiert, dass er im nicht spannungsbeaufschlagten Zustand selbsthemmend ist, sich die Mikroverzahnung somit im Eingriff befindet. Eine Verringerung der Ansteuerungsspannung führt zu einer Entlastung der Eingriffskraft der Verzahnung, wobei ein Spiel auftritt (blaue Fläche in

Bild 8). Bei Spannungen ab  $70 \text{ V}$  ist die Verzahnung mit hoher Kontaktkraft vollständig im Eingriff.



**Bild 8** Lost-motion Verhalten des PowerPAD

Die erreichten Leistungsdaten sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Dauerausgangsleistung ist momentan durch die Verlustwärme der Piezoaktoren begrenzt. Sie kann durch Zwangskühlung noch wesentlich erhöht werden. In der nächsten Entwicklungsstufe ist eine Verdopplung der Leistungsdichte vorgesehen.

Characteristic	Value
Driving torque	$5 \text{ Nm}^*$
Holding torque	$11 \text{ Nm}$
Mechanical power output at 40 rpm ( <i>continuous</i> )	$21 \text{ W}$
Speed range	$0 - 60 \text{ rpm}$
Moment of inertia (shaft)	$5 \text{ gcm}^2$
Angular resolution	$< 2 \text{ arcsec}$
Load detection sensitivity	$< 0.01 \text{ Nm}$
Weighth	$750 \text{ g}$
Size	$9.5 \times 9.5 \times 3.7 \text{ cm}$

\*20 Nm possible in future

**Tabelle 2** Motordatenblatt PowerPAD

## 2.2 MiniPAD

Abhängig von den Leistungs- und Packageanforderungen, kann die PAD Kinematik in unterschiedlichen Materialsystemen ausgeführt und mit anderen Aktoren kombiniert werden [7]. Ein Beispiel hierfür ist der in Kunststoffspritzgusstechnik hergestellte Zeigerantrieb für Kfz-Anwendungen (Tacho, Drehzahl, Uhr, Tankanzeige), siehe Bild 9.

Als Antrieb dienen zwei piezoelektrische Biegeaktoren, deren Linearbewegungen durch eine Rahmenkinematik zu einer kreisförmigen Verschiebewegung des Antriebsringes überlagert werden. Der im Vergleich zu Stapelaktoren erheblich größere Arbeitshub der piezoelektrischen Biegeaktoren von  $\pm 200 \mu\text{m}$  gestattet gröbere Verzahnungsstrukturen, die mittels Kunststoffspritzguss herstellbar sind. Die integrierte Anschlagserkennung wurde ohne zusätzliche Sensorik, ausschließlich durch Nutzung des direkten Piezoeffektes der Biegeaktoren, realisiert.



**Bild 9** MiniPAD als Zeigerantrieb. Produktnahes Muster

Durch die Umstellung auf eine kunststoffgerechte Konstruktion in PAD-Technologie konnte die Komponentenanzahl von 18 auf 8 und die Anzahl der Montageschritte von 46 auf 22 reduziert werden. Die Biegeaktoren werden direkt in die Rahmenkinematik eingespritzt. Im Vergleich zu heutigen Mikroschrittantrieben ermöglicht dieses eine deutlich kostengünstigere Herstellung. Mit den in Tabelle 3 aufgeführten Daten erfüllt der MiniPAD die Spezifikation für derartige Zeigerantriebe.

Characteristic	Value
Driving torque	1.5 mNm
Holding torque	3.5 mNm
Speed range	0 – 180 rpm
Mechanical power at 180 rpm	28 mW
Absolute positioning accuracy	0.1 °
Stop detection	integrated
Motor shaft inertia	2 gmm <sup>2</sup>
Weighth	13.4 g*
Size	40 x 33 x 15 mm

\*without pointer

**Tabelle 3** Motordatenblatt MiniPAD

### 2.3 StandardPAD

Obwohl planare Motorbauformen vorteilhaft sein können, orientieren sich die Einbaubedingungen, wenn es sich nicht um Neukonstruktionen handelt, doch überwiegend an den zylindrischen Formfaktoren heutiger Motor/Getriebe-kombinationen. Aufgrund der funktionellen Vorteile eignet sich PAD prinzipiell zum Replacement. Die hierfür entwickelte "zylindrische" PAD Bauform, siehe Bild 10, basiert auf dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen MiniPAD. Um die längliche Bauform zu erreichen, wurden die Biegeaktoren entlang der Motorwelle angeordnet. Zur Leistungssteigerung besitzt der StandardPAD zwei Biegeaktorpaa-re. Für stärkere StandardPADs können auch Stapelaktoren oder TorqueBlocks eingesetzt werden.



**Bild 10** StandardPAD mit länglichem Formfaktor

Die erzielbare Leistung hängt von der maximalen Arbeitsfrequenz, dem Maximalhub und der Blockierkraft der Biegeaktoren ab. Zur Drehmomentsteigerung können auch mehrere StandardPAD Kinematiken auf eine gemeinsame Motorwelle wirken, wobei die Motoren elektrisch zu einem Motor verschaltet werden. Die Kinematik kann sowohl aus Kunststoff als auch aus Metall bestehen. Hierdurch kann flexibel auf Kundenanforderungen bezüglich Leistung, Package, Drehzahl/Drehmomentcharakteristik und Kosten eingegangen werden. Das Konzept des StandardPAD eignet sich zum Aufbau einer kompletten Motorbau-reihe. Tabelle 4 enthält typische Leistungsdaten.

Characteristic	Value
Driving torque	60 mNm
Holding torque	130 mNm
Speed range	0 – 60 rpm
Mechanical power at 60 rpm	400 mW
Absolute positioning accuracy	0.01 °
Load detection	integrated
Motor shaft inertia	68 gmm <sup>2</sup>
Weighth	50 g*
Size	48 x 21 x 21 mm**

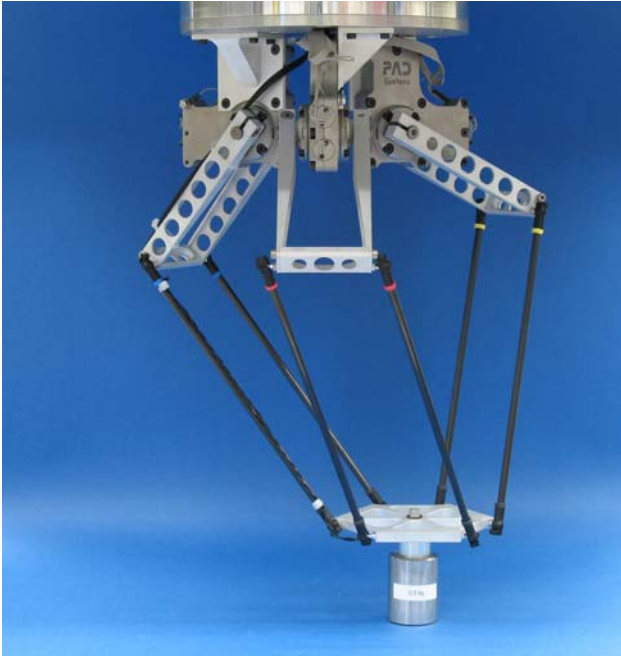
\*without gear wheel \*\*without motor shaft

**Tabelle 4** Motordatenblatt StandardPAD

## 3 Applikationsbeispiel Delta3 Roboter

Zur Demonstration der Eigenschaften Genauigkeit, Dynamik, energieloses Halten und Synchronisierbarkeit, wurde der in Bild 11 gezeigte Delta3 Roboter entwickelt [8]. Er besteht aus drei in einem 120 Grad Winkel auf einer Grundplatte montierten PowerPAD Antrieben, die über parallelgeführte Antriebsarme mit einer Endeffektorplatte verbunden sind. Der Arbeitsraum des Roboters ist zylindrisch und besitzt einem Durchmesser von 14 cm sowie eine Arbeitshöhe von 20 cm. Die maximale Nutzlast beträgt 4 kg. Die Motion Control der PAD Antriebe erfolgt über einen PC und drei FPGA-gesteuerte 12-bit Schaltend-stufen auf Basis eines mathematischen Modells der inver-

sen Kinematik [9]. Zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit wurden Messungen mit und ohne Nutzlasten durchgeführt [10]. Die Reproduzierbarkeit der angefahrenen Positionen war lastunabhängig und im Bereich weniger Mikrometer. Der durch die endliche Steifigkeit der Roboterkinematik bedingte Offset der Absolutposition von 130  $\mu\text{m}$  bei einer 2 kg Nutzlast, kann durch die inhärente Lastmomentendetektion elektronisch kompensiert werden.



**Bild 11** PowerPAD gesteuerte Delta3 Roboterkinematik

## 4 Ausblick

PAD stellt eine neue mikromechatronische Antriebstechnologieplattform dar, die sich durch eine sehr hohe Funktionsdichte auszeichnet. Mit der inhärenten Echtzeit-Lastmomentenmessung eröffnen sich neue Möglichkeiten der drehmomentbasierten Antriebsregelung. Aufgrund der Skalierbarkeit und des Funktionsumfangs sind PAD-Systeme in den Bereichen Robotik, Medizingerätetechnik, Luft/Raumfahrttechnik, Automatisierungstechnik und Werkzeugmaschinen universell einsetzbar. Sie können beispielsweise als Surgical Robots in der Chirurgie und in Magnetresonanztomographen sowie im Bereich der Prothetik eingesetzt werden. Ein weiteres interessantes Anwendungsfeld ist die Servicerobotik, da hier sensitives Force Feedback, Präzision, Energieeffizienz, Leistungsgewicht, Geräuscharmheit und Bewegungsanmutung einen besonders hohen Stellenwert haben. Durch die hohe Dynamik und Präzision eignet sich PAD besonders gut für Tracking Anwendungen, z.B. zur Antennennachführung oder im Bereich optischer und astronomischer Instrumente. Durch die hohe Integrationsdichte besitzt PAD ein sehr günstiges Leistungsgewicht.

## 5 Literatur

- [1] Kappel, A.; Gottlieb, B.; Schwebel, T.; Wallenhauer, C.: PAD – Piezoelectric Actuator Drive. Actuator 2006, 10th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, Germany 2006, p. 457 - 460
- [2] Kappel, A.; Gottlieb, B.; Wallenhauer, C.: Piezoelektrischer Stellantrieb (PAD). at – Automatisierungstechnik 56 (2008) 3, DOI 10.1524/auto.2008.0693, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, p. 128 - 135
- [3] Vogl, M.; Kraus, T.; Zeichfüßl, R.; Wallenhauer, C.; Gottlieb, B.; Kappel, A.; Lüth, T.: Development of a MRI-safe Piezo Actuator Drive (PAD). Actuator 2008, 11th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, Germany 2008, June 9. - 11., p. 576 - 579
- [4] Wallenhauer, C.; Gottlieb, B.; Kappel, A.; Schwebel, T.; Rucha, J.; Lüth, T.: Accurate Load Detection Based on a New Piezoelectric Drive Principle Employing Phase-Shift Measurement. IEEE Journal of Micromechanical Systems, Vol. 16, No.2, April 2007, DOI 10.1109/JMEMS. 2006.889536, p. 344 - 350
- [5] Kappel, A.; Gottlieb, B.; Schwebel, T.; Wallenhauer, C.; Vogl, M.; Rucha, J.; Lüth, T.: PAD – Ein mikromechatronisches Antriebssystem mit ungewöhnlichen Eigenschaften. VDE Verlag, GMM, Fachbericht 54, 2007, p. 147 – 152
- [6] Rucha, J.; Liess, H.; Heinzl, J.; Kappel, A.; Schwebel, T.; Gottlieb, B.; Wallenhauer, C.; Lüth, T.: Applicability of a piezoelectric actuator drive as a sensorless high precision drive. Actuator 2006, 10th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, Germany 2006, p. 636 - 639
- [7] Kappel, A.; Gottlieb, B.; Wallenhauer, C.; Zeichfüßl, R.; Vogl, M.; Kraus, T.; Lüth, T.: PAD - A Scalable Drive Technology. Actuator 2008, 11th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, Germany 2008, June 9. - 11., p. 558 - 561
- [8] Vogl, M.; Kraus, T.; Zeichfüßl, R.; Wallenhauer, C.; Gottlieb, B.; Kappel, A.; Lüth, T.: Konstruktion und Messung der Steifigkeiten des hochpräzisen PAD-Delta3 Roboters mit Piezorotationsantrieben. Robotik 2008 Kongress, München, Juni 11. - 12., p. 63 - 66
- [9] Kraus, T.; Vogl, M.; Zeichfüßl, R.; Wallenhauer, C.; Gottlieb, B.; Kappel, A.; Lüth, T.: Steuerung für den PAD-Delta3 Roboter auf Basis eines digitalen Signalprozessors. Robotik 2008 Kongress, München, Juni 11. - 12., p. 269 - 271
- [10] Zeichfüßl, R.; Gottlieb, B.; Wallenhauer, C.; Kappel, A.; Vogl, M.; Kraus, T.; Lüth, T.: Synchronously Controlled Piezoelectric Actuator Drives (PAD) as Motors of a Delta-3 Robot. Actuator 2008, 11th Int. Conf. on New Actuators, Bremen, Germany 2008, June 9. - 11., p. 125 - 128