

Rolf Slatter, Arne Burisch

# Kleine Desktop-Montagelinie mit hoher Präzision

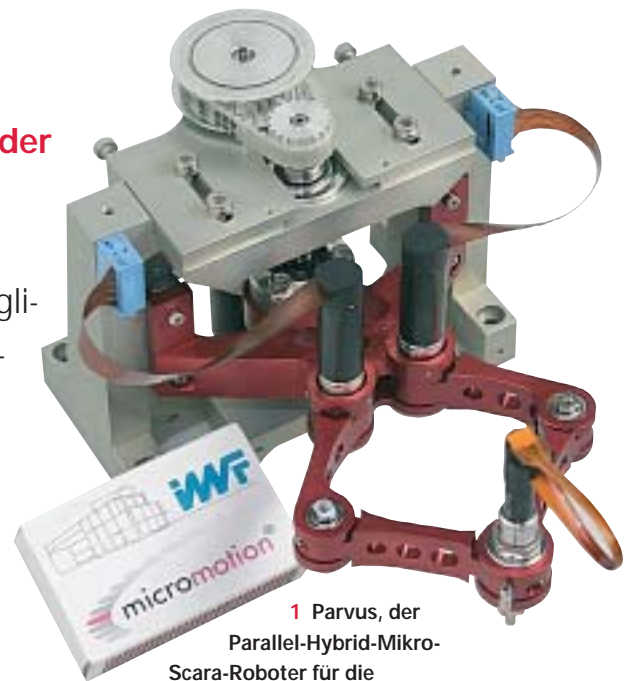


Micromotion GmbH  
An der Fahrt 13  
55124 Mainz-Gonsenheim  
Tel. +49 6131-6 69 27-0  
Fax +49 6131-6 69 27-20  
www.micromotion-gmbh.de

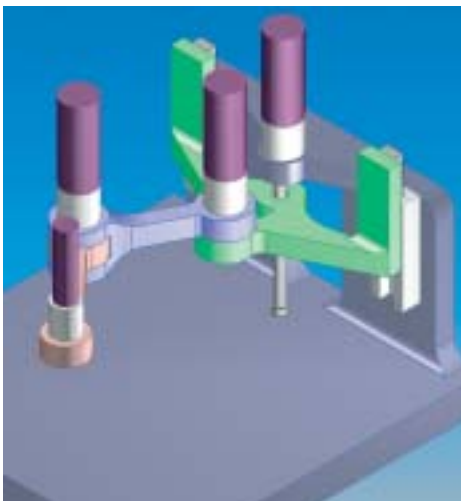
Sonderdruck

# Kleine Desktop-Montagelinie mit hoher Präzision

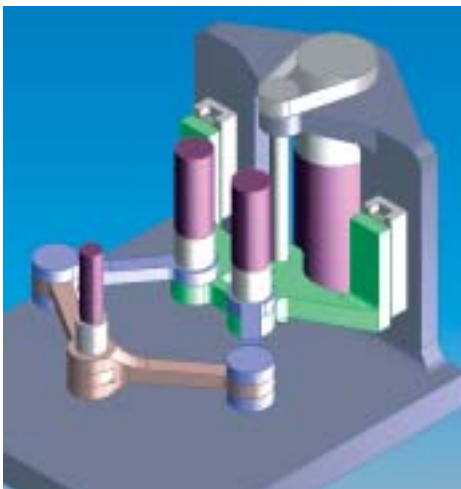
**Kombination aus Präzisionsgetriebe und hybrider Struktur.** Ein postkartengroßer Roboter montiert Kleinbauteile äußerst präzise: Er erreicht eine Wiederholgenauigkeit von unter  $1\ \mu\text{m}$ . Dies ermöglichen die neu entwickelte hybride Struktur des Roboters und der Einsatz eines Präzisionsgetriebes mit P-Verzahnung.



**1** Parvus, der Parallel-Hybrid-Mikro-Scara-Roboter für die Montage von Kleinbauteilen



**2** Serieller Struktur: In den Schulter- und Ellbogengelenken sind Mikrogetriebe und -motoren integriert



**3** Hybride Struktur: Zwei serielle Arme sind an der Handachse miteinander verbunden und zu einer Parallelstruktur kombiniert. In den Schultergelenken werden Mikrogetriebe eingesetzt, die Ellbogengelenke sind passiv

ra-Roboter (Selective-Compliance-Assembly-Robot-Arm) mit einer Parallelkinematik entwickelt (Bild 1). Der Roboter hat eine Grundfläche von  $150 \times 150\ \text{mm}^2$  und positioniert kleine, bis zu  $50\ \text{g}$  schwere Werkstücke. Auf Grund seiner kleinen Abmessungen wird er »Parvus« (lateinisch: klein) genannt. In den Primärachsen der Parallelarme sind spielfreie »Micro-Harmonic-Drive-Getriebeboxen« integriert, die eine Wiederholgenauigkeit von weniger als  $1\ \mu\text{m}$  ermöglichen. Die komplette Montagelinie passt auf einen Tisch.

ROLF SLATTER  
ARNE BURISCH

## Entwickeln eines Kleinroboters Schritt für Schritt

Erkenntnisse aus der Mikropro-Studie (siehe Seite 40) und Anregungen potenzieller Anwender führten zu folgenden Basisanforderungen:

- Positioniergenauigkeit  $< 1\ \mu\text{m}$ ,
- einfache und modulare Struktur,
- kleine Abmessungen, um eine Desktop-Montagelinie zu ermöglichen,
- niedrigere Herstellkosten als für existierende Systeme,
- einfacher Zugang zum Arbeitsraum des Roboters, um Komponenten automatisch zuführen zu können.

Der Trend zur Miniaturisierung in der Konsum- und Investitionsgüterindustrie führt zu einer zunehmenden Nachfrage nach Geräten und Systemen für die präzise Montage kleinster Komponenten. Bisher waren Maschinen für die Präzisionsmontage deutlich größer als das zu montierende Werkstück und viel größer als der benötigte Arbeitsraum. Das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig und Micromotion, Hersteller von spielfreien Mikrogetrieben und -antrieben, haben in Kooperation einen kleinen hybriden Sca-

Bevor mit der Konstruktion begonnen werden konnte, mussten mehrere Grundentscheidungen getroffen werden:

- Wie viele Freiheitsgrade sind erforderlich?
- Soll der Roboter über eine parallele, serielle oder hybride Struktur verfügen?
- Welcher Miniaturisierungsgrad ist geeignet und ab wann wirkt sich eine weitere Miniaturisierung negativ auf die Genauigkeit aus?
- Sollen konventionelle Gelenke oder Festkörpergelenke verwendet werden?

Die Anforderungen der Anwender machen deutlich, dass vier Freiheitsgrade notwendig sind. Drei Achsen werden benötigt, um das Werkstück in den drei orthogonalen Koordinaten linear zu positionieren. Bei den meisten praktischen Mikromontage-Anwendungen ist eine vierte rotatorische Achse erforderlich, um das Werkstück auszurichten. Aus diesen Punkten lassen sich die in **Tabelle A** aufgelisteten Anforderungen definieren.

Das Entwicklerteam führte zunächst eine detaillierte Analyse durch, bevor es sich für die hybride Struktur entschied. Entwürfe für beide Strukturen (**Bilder 2 und 3**) wurden angelegt, um die mögliche

Anforderung	Wert
Arbeitsraum	54 × 85 × 20 mm <sup>3</sup>
Grundfläche	< 150 × 150 mm <sup>2</sup>
Wiederholgenauigkeit	< 1 µm
Lineargeschwindigkeit (X, Y, Z Richtung)	> 100 mm/s
Drehgeschwindigkeit (θ-Achse)	> 160 °/s
Winkelauflösung (θ-Achse)	< 0,005 °
Last maximal	50 g

**A Basisanforderungen an Kleinstroboter**

### Serielle und hybride Struktur im Vergleich

Bei der seriellen Struktur wird nur in einem kleinen Bereich des Arbeitsraums (**Bild 4**) eine Auflösung im Sub-Mikrometer-Bereich erreicht.

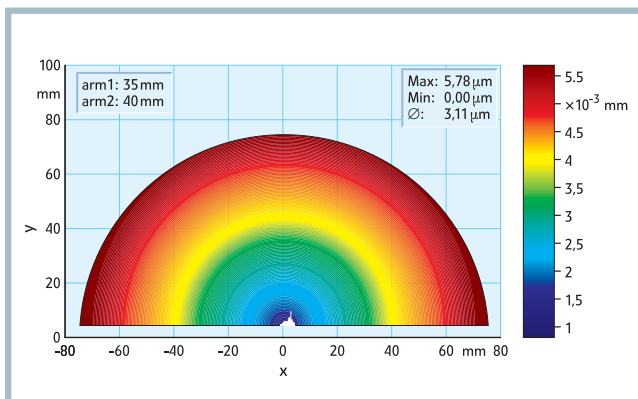
Im Vergleich dazu ergibt sich bei der hybriden Struktur eine symmetrische Sub-Mikrometer-Auflösung (**Bild 5**) über nahezu den gesamten Arbeitsraum. Darüber hinaus bieten die zu einer Parallelstruktur kombinierten Arme eine deutlich höhere dynamische Leistung, da nur der Getriebemotor für die vierte (rotierende) Achse vom bewegenden Arm getragen wird. Die Miniaturisierung der passiven Gelenke lässt sich leichter realisieren als bei den aktiven Gelenken der seriellen Struktur. Die komplexe Regelung, die auf-

grund der geschlossenen kinematischen Struktur entsteht, wird mit der Kinematik-Software vom IWF und der entsprechenden Rechnerleistung der Robotersteuerung bewältigt.

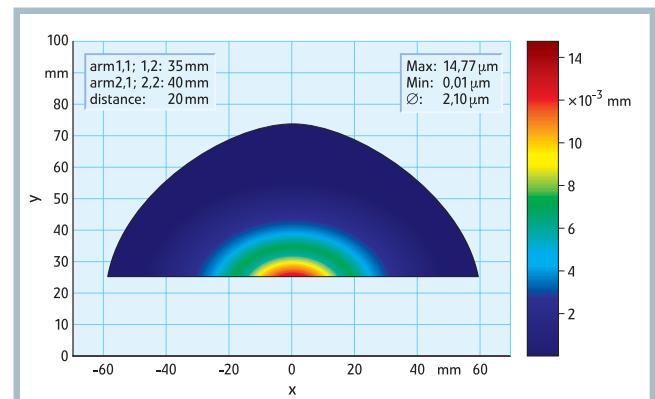
### Innovative Komponenten ermöglichen die Umsetzung

Mit einer Wiederholgenauigkeit von zehn Winkelsekunden nimmt das spielfreie Micro-Harmonic-Drive-Getriebe eine zentrale Rolle ein. Laut Hersteller ist es das weltweit kleinste spielfreie Präzisionsgetriebe (**Bild 6**), das die erforderliche Genauigkeit für einen Mikroroboter dieser Art erfüllt. Es wird seit 2001 in verschiedenen Anwendungen eingesetzt [1, 2].

In dem Getriebe wird eine neue zum Patent angemeldete Verzahnung, die P-



4 Auflösung im Arbeitsraum bei der seriellen Struktur



5 Auflösung im Arbeitsraum bei der parallelen Struktur

Auflösung beim Positionieren an allen Punkten im Arbeitsraum zu ermitteln.

Bei der hybriden Struktur (**Bild 3**) sind zwei serielle Arme an der Handachse miteinander verbunden und werden zu einer Parallelstruktur kombiniert. Die oberen Arme (Schultergelenke) werden von Micro-Harmonic-Drive-Getrieben in Kombination mit Mikromotoren und integrierten Encodern angetrieben. Die Ellbogengelenke sind passiv und führen zu einer Spielfreiheit in den Gelenken. Hier werden vorgespannte Kugellager verwendet. In die Handachse ist wie bei der seriellen Struktur ein Getriebemotor integriert, um das Werkstück mit der Rotationsachse positionieren zu können.

### FAZIT

#### Innovation spart Raum

Die Anforderung, auf kleinem Raum eine präzise arbeitende Montagelinie aufzubauen, wird durch die hybride Struktur des Montageroboters Parvus erfüllt. Stabile, aber leichte Roboterarme und ein kleines spielfreies Präzisionsgetriebe sorgen zusammen mit der speziellen Parallelstruktur der Arme für eine Wiederholgenauigkeit von 1 µm über beinahe den ganzen Arbeitsraum.

Verzahnung (siehe **Seite 42**), eingesetzt. Diese Verzahnung kann ein doppelt so hohes Drehmoment übertragen wie bisher bekannte Verzahnungen. Dadurch wird eine höhere Armbeschleunigung erreicht, was zu kürzeren Zykluszeiten des Roboters führt.

Die Armstruktur muss leicht sein und gleichzeitig eine hohe Steifigkeit aufweisen. Die Querschnitte des Arms mussten zu diesem Zweck durch Ausfräsungen und Optimieren des Querprofils angepasst werden, um das Gewicht zu reduzieren, ohne jedoch an Steifigkeit zu verlieren. **Bild 1** zeigt den Parvus im Größenvergleich mit einer Streichholzschachtel. Die Handachse ist eine Hohlachse, durch die Versor- ➤

## BACKGROUND

# Präzisionsroboter: kleiner + billiger

In der Konsum- und Investitionsgüterindustrie zeichnet sich ein Trend zur Miniaturisierung ab. Dies führt zu einem jährlichen Wachstum von 20 Prozent für Produkte, die auf der Mikrosystemtechnik basieren, und erhöht folglich die Nachfrage nach Mikroproduktionstechniken [1].

zur eigenen physikalischen Größe einen relativ großen Arbeitsbereich abdecken, jedoch nur eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  erreichen.

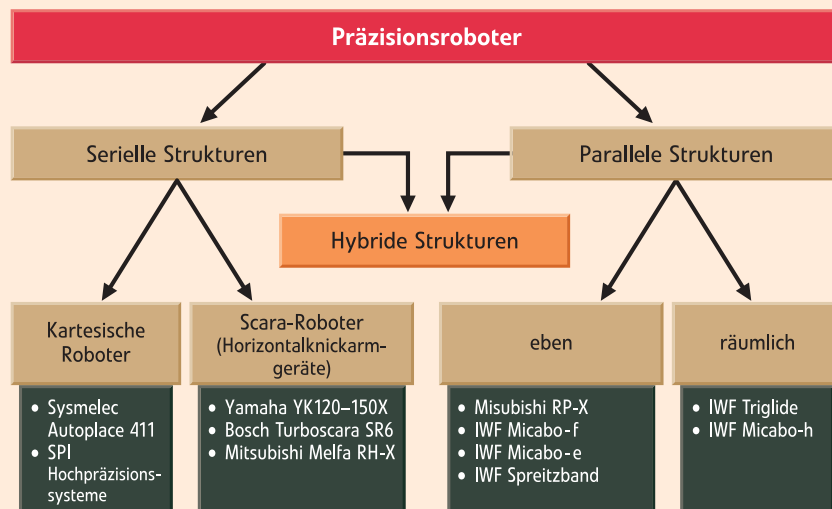
Roboter mit Parallelstruktur werden in der Industrie selten eingesetzt. Eine Ausnahme ist der »Mitsubishi RPX« mit einer

Wiederholgenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Die übrigen Entwicklungen beschränken sich auf die universitäre Forschung, beispielsweise an der TU Braunschweig. Hier hat man mit dem Triglide-Roboter Erfahrungen mit Parallelstrukturen gesammelt. Der Roboter erzielt eine Wiederholgenauigkeit von  $< 1 \mu\text{m}$  [3-5].

Laut Mikropro-Studie sind die existierenden Lösungen zu teuer und zu groß. Damit erfüllen sie nicht die Anforderungen des Marktes nach kleinen kostengünstigen Robotern für Positionier- und Montageaufgaben.

Mit den von Harmonic Drive entwickelten spielfreien Mikropräzisionsgetrieben und hochdynamischen Mikromotoren mit integrierem Inkremental-Encoder können

die erprobten Roboterarmstrukturen jetzt miniaturisiert werden. Sie erlauben darüber hinaus den Einsatz neuer Reglertechnologien ohne komplexe Aktuatoren, wie beispielsweise Piezoantriebe [3, 5].



Die Ergebnisse der Mikropro-Studie [2] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Trend zu multifunktionalen hybriden Baugruppen in der Mikrosystemtechnik erhöht die Nachfrage nach Geräten, die präzise positionieren und Kleinstbauteile mit einer Genauigkeit von  $< 1 \mu\text{m}$  montieren können.
- Bis zu 80 Prozent der Produktionskosten liegen in der Montage. Das erfordert hohe Montagegeschwindigkeit und hohe Prozessstabilität während des Montagevorgangs.
- Die existierenden Präzisions-Montagemaschinen und Roboter sind zu teuer.
- Montagesysteme werden zunehmend im Reinraum eingesetzt und müssen diesen Anforderungen entsprechend kompakt sein.

Es gibt verschiedene Lösungen, um den Anforderungen dieser Studie gerecht zu werden. Beim einfachsten Lösungsansatz erfolgt eine Unterteilung in serielle, parallele und hybride Strukturen. Serielle und parallele Strukturen können in vier Unterkategorien unterteilt werden. Die erste Kategorie umfasst kartesische Roboter. Sie sind sehr groß im Vergleich zu den Bauteilen, die montiert werden, und kostspielig. Dafür erreichen sie aber eine hohe Wiederholgenauigkeit von 1 bis  $3 \mu\text{m}$ , wie beispielsweise der »Sysmelec Autoplace 411«. Die zweite Kategorie beinhaltet Scara-Roboter, die im Verhältnis

## LITERATUR

- 1 S. Fatikow: »Mikroroboter und Mikromontage«; Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig 2000
- 2 J. Hesselbach, A. Raatz: »mikroPRO – Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik«; Vulkan Verlag, Essen 2002
- 3 J. Hesselbach, A. Raatz, J. Wrege, S. Soetebier: »Design and Analysis of a Macro Parallel Robot with Flexure Hinges for Micro Assembly Tasks«; Proc. of 35th International Symposium on Robotics (ISR), 23-26 March, Paris, France 2004, No.TU14-041fp
- 4 J. Hesselbach, G. Pokar, J. Wrege, K. Heuer: »Some Aspects on the Assembly of Active Micro Systems«; Production Engineering Vol. XI/1, 2004, pp. 159-164
- 5 J. Hesselbach, J. Wrege, A. Raatz, O. Becker: »Aspects on Design of High Precision Parallel Robots Book«; Journal of Assembly Automation Vol. 24, No.1, Emerald, 2004, pp. 49-57, ISSN 0144-5154



**6** Micro Harmonic Drive: Mikro-Servoantrieb und Getriebebox

› gungsleitungen, wie beispielsweise eine Vakuumversorgung, geführt werden, um das Werkstück greifen zu können.

Für die Zukunft ist geplant, mechanische oder elektrostatische Mikrogreifer des Instituts für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig einzusetzen [3]. Erste Tests haben bereits gezeigt, dass Parvus die Anforderungen der Mikropro-Studie (siehe Seite 40) erfüllt und

die Desktop-Montagelinie Realität geworden ist. ■

#### **Autoren**

Dr. ROLF SLATTER ist Geschäftsführer bei Micromotion in Mainz.  
ARNE BURISCH ist Diplomand am Institut für Werkzeugmaschinen & Fertigungstechnik (IWF) an der TU Braunschweig.

#### **Literatur**

- 1 R. Degen, R. Slatter: »Hollow shaft micro servo actuators realized with the Micro Harmonic Drive«; Proceedings of Actuator 2002, Bremen
- 2 R. Slatter, R. Degen: »Micro actuators for precise positioning applications in vacuum«, Proceedings of Actuator 2004, Bremen
- 3 J. Hesselbach, G. Pokar, J. Wrege, K. Heuer: »Some Aspects on the Assembly of Active Micro Systems«; Production Engineering Vol. XI/1, 2004, 159-164

#### **KONTAKT**

Harmonic Drive AG  
65555 Limburg,  
Tel. 0 64 31 /50 08 -0,  
Fax 0 64 31 /50 08 -18,  
[www.harmonicdrive.de](http://www.harmonicdrive.de)

Harmonic Drive ist Vertriebspartner der Micromotion GmbH in Mainz.



## MIKROGETRIEBE

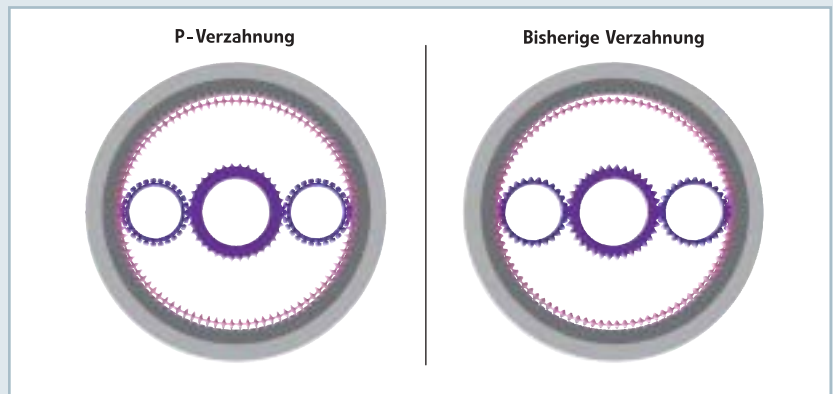
# Pilzkopf-Verzahnung

Der Pilzkopf ist ein neues Verzahnungsprofil für Mikrogetriebe. Es ermöglicht laut Hersteller eine Leistungssteigerung um 200 Prozent und wird bereits in industriellen Anwendungen eingesetzt.

■ Um die Bedeutung dieser Neuentwicklung zu verstehen, ist ein Rückblick in die Geschichte hilfreich. Zahnräder wurden bereits von Aristoteles um 330 vor Christi erwähnt. Aufgrund ihrer formschlüssigen Verbindung übertragen Zahnräder Drehbewegungen ohne Schlupf und Drehmomente. Man unterscheidet Zahnräder mit Evolventenverzahnung, Treibstockverzahnung oder Zykloidenverzahnung. Am weitesten verbreitet ist die Evolventenverzahnung, bei der die Zähne aneinander abrollen können. Die Kurve dieser Zahnform bezeichnet man als Evolvente. Ihre Attraktivität verdankt sie ihrer hohen Tragfähigkeit, dem hohen Wirkungsgrad und der gleichförmigen Übersetzung. Zusätzlich können mit ein und demselben Werkzeug Evolventenzahnräder mit einer unterschiedlichen Anzahl von Zähnen und Profilveränderungen hergestellt werden. Die Fertigung ist daher kostengünstig. Dieses Zahnprofil beruht auf Berechnungen von Leonhard Euler um 1750. Natürlich hat es in der Zwischenzeit Detailanpassungen gegeben, aber keine dramatischen Formänderungen.

## Höhere Kraftübertragung

Die Weiterentwicklung des »Micro-Harmonic-Drive-Getriebes« hat zu einem patentierten Mikrogetriebe mit Pilzkopf-Verzahnung (P-Verzahnung) ge-



P-Verzahnung erhöht die Drehmomentbelastbarkeit des Getriebes um das Doppelte

führt. Mit Berechnungsprogrammen von Harmonic-Drive, wurde der Eingriff der verschiedenen Verzahnungspaare simuliert. Daraus resultierende Profilveränderungen waren die Basis für Festigkeitsprüfungen. Das iterative Verfahren führte zu dem optimierten Zahnradprofil. Das Bild links zeigt, dass die P-Verzahnung von bisherigen Zahngeometrien (rechts im Bild) abweicht. Beim Flexspline, dem Bauteil in Magenta, sind die Zähne höher und dünner. Dadurch vergrößert sich die Weite der Zahnflanken. Das hat den Vorteil, dass die Ringdicke des Bauteils höher sein darf. Der Flexspline ist steifer und kann dadurch höhere Kräfte übertragen. Außerdem ist der Überdeckungsgrad zwischen den Zahnradpaaren des Flexsplines und den Circular Splines (graues Bauteil) größer. Das heißt, die Anzahl von Zähnen, die gleichzeitig im Eingriff sind, steigt und damit auch die

Leistung. Das Planetenrad (dunkelblaues Bauteil) greift in einen Flexspline ein, bei dem die Zahnflanke extrem groß ist. Dadurch müssten beim Planetenrad eigentlich die Zähne sehr dick ausgeführt werden. Bei dicken Zähnen geht jedoch von dem Planetenrad keine Elastizität mehr aus, so dass im Zahnfuß hohe Spannungen auftreten. Um diese Spannungen am Zahnfuß zu minimieren, sind Hinterprofile in den Planetenradzähnen vorgesehen. Diese Geometrie führt zur P-Verzahnung. Messungen belegen, dass die Drehmomentbelastbarkeit bei der P-Verzahnung um 200 Prozent höher ist. Das bedeutet, es können größere Lasten bewegt oder schneller beschleunigt werden. Dies wiederum resultiert in kürzeren Taktzeiten für Produktionsmaschinen und folglich höherer Produktivität. ■

[www.micromotion-gmbh.de](http://www.micromotion-gmbh.de)



Micromotion GmbH  
 An der Fahrt 13  
 55124 Mainz-Gonsenheim  
 Tel. 06131-6 69 27-0  
 Fax 06131-6 69 27-20  
[www.micromotion-gmbh.de](http://www.micromotion-gmbh.de)  
[info@micromotion-gmbh.de](mailto:info@micromotion-gmbh.de)



Harmonic Drive AG  
 Hoenbergstraße 14  
 65555 Limburg  
 Tel. 06431-50 08-0  
 Fax 06431-50 08-18  
[www.harmonicdrive.de](http://www.harmonicdrive.de)  
[info@harmonicdrive.de](mailto:info@harmonicdrive.de)

Harmonic Drive AG  
 ist der Vertriebspartner der  
 Micromotion GmbH.