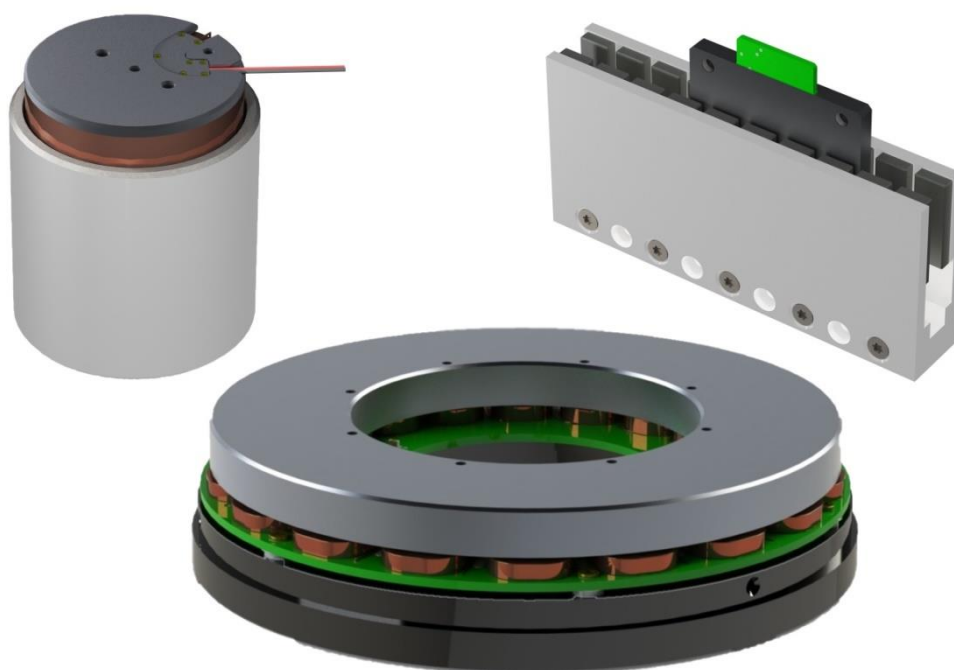


## PIMag®: Eigenentwickelte Voice-Coil-, Linear- und Torquemotoren

Individuelle Auslegung magnetischer Direktantriebe für flexible, wettbewerbsfähige und anwendungsspezifische Positionierlösungen



## 1 Einleitung

Positionier- und Scansysteme mit magnetischen Direktantrieben eignen sich für Anwendungen, die eine hohe Dynamik und Wiederholgenauigkeit erfordern und auch bei hohen Betriebszyklen zuverlässig arbeiten.

PI bietet zahlreiche Standardprodukte und kundenspezifische Positionierlösungen, die mit magnetischen Direktantrieben ausgestattet sind und verfügt über langjährige Erfahrung bei der Auslegung, Konstruktion und Fertigung der dafür notwendigen mechanischen und elektronischen Komponenten sowie eigener Encoder, Führungen und Motion Controller.

Darüber hinaus entwickelt PI bestimmte Motoren selbst, wenn Standardserien oder kundenspezifische Lösungen Leistungsmerkmale erreichen sollen, die mit am Markt verfügbaren Antriebskomponenten nicht möglich sind. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Voice-Coil-Motoren, eisenlosen und eisenbehafteten Linearmotoren sowie Torquemotoren.

Die Kompetenzen in der Motorentwicklung und die hohe Fertigungstiefe ermöglichen es PI, Kunden eine wettbewerbsfähige und flexible Lösung zu bieten, die genau an die Anforderungen der Anwendung angepasst ist.

Die eigenentwickelten Motoren sind mit dem Markennamen PIMag® gekennzeichnet. PI Positioniersysteme und Scanner mit diesen Motoren werden mit *Driven by PIMag®* ausgezeichnet.

Dieses Whitepaper erläutert Funktionsprinzipien und Eigenschaften der Voice-Coil-, Linear- und Torquemotoren. Darüber hinaus zeigt es anhand von Beispielen wie Leistungsmerkmale der unterschiedlichen Motortypen durch eine individuelle Auslegung an spezifische Anforderungen der Positionierlösung angepasst werden können, um z.B. eine hohe Kraftdichte oder kompakte Bauweise zu erreichen.

## 2 Magnetische Direktantriebe

Voice-Coil-, Linear- und auch Torquemotoren funktionieren aufgrund unterschiedlichster physikalischer Prinzipien. Beispielsweise basieren die meisten Voice-Coil-Antriebe auf der Lorentzkraft, bei der die erzeugte Kraft proportional zur Magnetfeldstärke und zum Strom der stromdurchflossenen

Leiter ist. Die elektrische Energie wird dabei in mechanische Energie umgewandelt. Je nach Stromrichtung wirkt die dabei erzeugte Kraft bidirektional.

Direktantriebe bieten vor allem hinsichtlich Verschleiß und Dynamik Vorteile gegenüber der klassischen Spindeltechnik. Da sie weitgehend auf mechanische Komponenten verzichten, gibt es weniger Reibung und kein Spiel und sie erzielen so eine höhere Präzision.

### 2.1 Voice-Coil-Motoren

Zylindrische Voice-Coils sind nach dem Tauchspulenprinzip aufgebaut, d.h. der Wicklungskörper sitzt in einem magnetischen Topf wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Dabei kann entweder der Wicklungskörper ("Moving Coil") oder der Topf ("Moving Magnet") bewegt werden.

Solche Voice-Coils lassen sich auch mit Hohlwelle realisieren, die dann als Durchführung oder auch zur Integration einer Linearführung genutzt werden kann.



Abb. 1 PIMag® zylindrischer Voice-Coil-Motor für den Einsatz in medizinischen Endoskopen

Abweichend vom zylindrischen Tauchspulen-Aufbau können solche Motoren auch in flacher Bauweise realisiert werden. In diesem Fall bewegt sich der Wicklungskörper über nebeneinander angeordnete Magnete wie in Abbildung 2 dargestellt ist.



Abb. 2 Voice-Coil-Motor in Flachbauweise

Voice-Coil-Motoren eignen sich für Positionieraufgaben mit hoher Dynamik und hohen Kräften. Sie kommen besonders bei Scananwendungen mit Stellwegen bis zu einigen zehn

Millimetern zum Einsatz. Die Lineartisch-Serien V-522, V-524 und V-528, wie in Abbildung 3 dargestellt, basieren beispielsweise auf Voice-Coil-Motoren von PI.

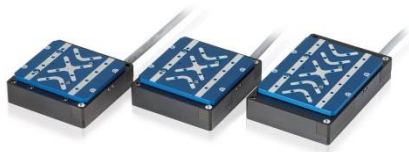


Abb. 3 Driven by PIMag®: Lineartisch-Serien V-522, V-524 und V-528 mit flach gebauten Voice-Coil-Motoren von PI

Voice-Coils können auch auf Kraft bzw. Motorkonstante optimiert werden. Die Motorkonstante bezeichnet das Verhältnis aus Kraft und Verlustleistung. Je höher die Motorkonstante, desto weniger Wärme entsteht bei der Erzeugung einer bestimmten Kraft. Sie beschreibt also auch die Effizienz des Motors hinsichtlich der Umwandlung von elektrischer Energie in Bewegungsenergie. Mit steigender Temperatur nehmen allerdings der Wicklungswiderstand und damit auch die Verlustleistung zu, weshalb die Motorkonstante temperaturabhängig ist.

In Bezug auf eine möglichst maximale Motorkonstante hat PI zylindrische Motoren wie in Abbildung 4 entwickelt.



Abb. 4 PIMag® zylindrische Voice-Coil-Motoren

Sie zeichnen sich durch ein maximiertes Verhältnis aus Motorkonstante und Bauraum aus und können in diversen Größen gefertigt werden. Zylindrische Motoren werden beispielsweise in Positionierlösungen für Fokussiereinrichtungen eingesetzt, um einen Messkopf oder eine Optik dynamisch über ein Flexure-Festkörpergelenk in der Vertikalen zu bewegen. Tabelle 1 zeigt anhand von drei Beispielen die Leistungsmerkmale unterschiedlicher Größenvarianten.

| Leistungsmerkmale         | Größe 1 | Größe 2 | Größe 3 | Einheit |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Stellweg                  | 10      | 15      | 20      | mm      |
| Spitzenkraft              | 80      | 614     | 1772    | N       |
| Nennkraft                 | 20      | 149     | 380     | N       |
| Motorkonstante            | 7,5     | 31      | 57      | N/VW    |
| Kraftkonstante            | 22,6    | 88      | 98      | N/A     |
| Gegen-EMK                 | 22,6    | 88      | 98      | Vs/m    |
| Strom bei Spitzenkraft    | 3,5     | 7       | 18      | A       |
| Strom bei Nennkraft       | 0,9     | 1,7     | 3,9     | A       |
| DC-Widerstand             | 9,2     | 8,1     | 2,9     | Ohm     |
| Induktivität              | 4,5     | 7,5     | 3,4     | mH      |
| Elektrische Zeitkonstante | 0,49    | 0,93    | 1,17    | ms      |
| Mechanische Zeitkonstante | 1,71    | 0,66    | 0,54    | ms      |
| Masse Läufer              | 95      | 630     | 1800    | g       |
| Masse Stator              | 235     | 2530    | 8800    | g       |

Tab. 1 Beispiele für eigenentwickelte zylindrische Voice-Coil-Motoren

Die Kraft ist abhängig von der Position, da sich die Spulen in Relation zu den Permanentmagneten über den Stellweg verschieben. Dies ist in Abbildung 5 zu erkennen.

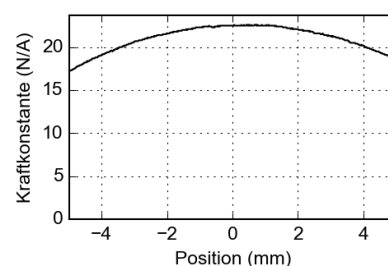


Abb. 5 Kraft-Weg-Diagramm eines zylindrischen PIMag® Voice-Coil-Motors

Um die Kraft möglichst schnell in den Motor zu treiben, kann wie in Abbildung 6 dargestellt die Spannung erhöht werden, da der Strom dann entsprechend schneller zur Verfügung gestellt wird. Im gleichen Verhältnis nimmt dann auch die Beschleunigung zu. Durch einen schnellen Beschleunigungsanstieg (Ruck) können somit hochdynamische Anwendungen realisiert werden.

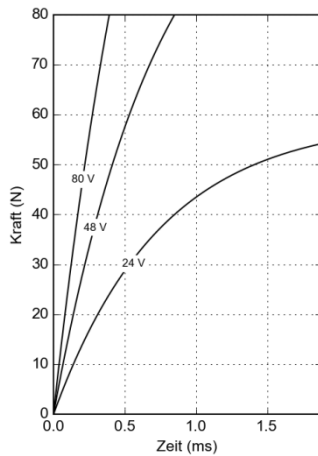


Abb. 6 Kraft-Zeit-Diagramm eines eigenentwickelten zylindrischen Voice-Coil-Motors

## 2.2 Linearmotoren

Ein klassischer 3-Phasen-Linearmotor ist im Prinzip eine Aneinanderreihung von mindestens drei (oder einem Vielfachen von drei) Voice-Coil-Motoren, die nach einem positionsabhängigen, festgelegten Muster angesteuert, d.h. kommutiert, werden. Ein Motor bestehend aus drei Spulen in einer U-förmigen Magnetbahn ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abb. 7 Aufbau eines Linearmotors: Drei stromdurchflossene Magnetspulen bewegen sich in einer Magnetbahn oder umgekehrt

Optional vergießt PI seine Linearmotoren unter Vakuum. Dies führt zu einer verbesserten Wärmeabfuhr, wodurch höhere Nennkräfte erreicht werden. Außerdem sorgt die Vergussmasse für eine Kapselung des Motors, womit er vor Beschädigung von außen z.B. bei der Montage geschützt ist.

Für spezielle Anwendungen, welche hohe Geschwindigkeiten oder schnelle Stromanstiegszeiten benötigen, kann PI Motoren für besonders hohe Betriebsspannungen bis 600 VDC auslegen. Linearmotoren profitieren hier von dem gleichen Effekt, der schon für Voice-Coil-Motoren diskutiert wurde: durch die höhere Spannung kann der Strom schneller zur Verfügung gestellt werden, wodurch eine höhere Dynamik erreicht wird. Außerdem ist es möglich, industrietypische Servoverstärker mit hohen Spannungen zu nutzen.

Die bei PI-Linearmotoren zum Einsatz kommenden Magnetbahnen können in unterschiedlichen Längen zur Verfügung gestellt werden. Sie können modular aneinander gereiht werden, um beliebig lange Stellwege zu realisieren. Zur Auswahl stehen einseitige Magnetbahnen und solche mit U-Profil. Magnetbahnen mit U-Profil erreichen gegenüber einseitigen Magnetbahnen höhere Magnetfeldstärken und höhere Kräfte. Sofern die Magnete darüber hinaus als Halbach-Array angeordnet werden, kann die Magnetfeldstärke gegenüber einer Nordpol-Südpol-Anordnung etwa um weitere 10% erhöht werden. Zudem kann bei einem Halbach-Array der Eisenrückschluss entfallen, wodurch diese Magnetbahnen deutlich leichter werden. Diese Vorteile gelten auch bei einer einseitigen Magnetbahn. Hierbei werden durch die Verwendung von Halbach-Arrays außerdem hohe Streufelder auf der Rückseite der einseitigen Magnetbahn vermieden. Für Anwendungen, die besonders leichte Magnetbahnen erfordern, kann PI Karbonträger bereitstellen.

PI fertigt Linearmotoren eisenlos oder eisenbehaftet. Motoren beider Art werden beispielsweise in der Lineartisch-Serie V-508 eingesetzt. Ein beispielhafter Lineartisch dieser Serie ist in Abbildung 8 dargestellt.



Abb. 8 Driven by PIMag®: Lineartisch der Serie V-508 mit PI-eigenem Linearmotor mit Halbach-Array für eine besonders flache Bauform bei gleichzeitig geringem Gewicht

### 2.2.1 Eisenbehaftete Linearmotoren

Eisenbehaftete Linearmotoren eignen sich für hohe Kräfte und Beschleunigungen bei begrenztem Bauraum. Das Eisen maximiert die magnetischen Kräfte und trägt zu einer hohen thermischen Stabilität bei. Um Wirbelstromverluste zu reduzieren, wird das Eisen laminiert und zumeist aus gestapelten und isolierten Trafoblechen aufgebaut. Der Nachteil der eisenbehafteten Motoren liegt in der Anziehungskraft, welche zwischen dem Eisen und den gegenüber angeordneten Magneten entsteht. Beim Einsatz einer Linearführung wird diese also zusätzlich belastet. Hinzu kommt noch das so genannte Cogging, eine Schwankung der Verschiebekraft über den Stellweg, welches zwar durch eine spezielle Zahngeometrie limitiert wird, aber nicht vollständig

beseitigt werden kann. Ein beispielhafter Aufbau eines eisenbehafteten Linearmotors ist in Abbildung 9 dargestellt.



Abb. 9 Beispielhafter Aufbau eines eisenbehafteten Linearmotors ohne Magnetbahn

Der in Abbildung 10 dargestellte vergossene Motor ist ein Beispiel für einen von PI entwickelten eisenbehafteten Linearmotor.

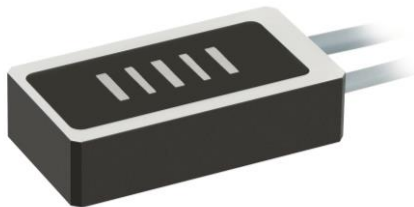


Abb. 10 PIMag® Linearmotor mit laminiertem magnetischen Stahl und Epoxidharz-Vergussmasse

Die eisenbehafteten Linearmotoren werden zum Beispiel mit drei oder sechs Spulen aufgebaut. Die Leistungsmerkmale sind anhand zweier Beispiele in Tabelle 2 dargestellt.

| Leistungsmerkmal             | 3 Spulen   | 6 Spulen   | Einheit |
|------------------------------|------------|------------|---------|
| Max. Spannung                | 48         | 48         | V       |
| Nennkraft (ohne/mit Kühlung) | 5,8 / 12,5 | 9,0 / 22,7 | N       |
| Nennstrom (ohne/mit Kühlung) | 1,2 / 2,6  | 1,0 / 2,5  | A       |
| Motorkonstante               | 4,59       | 6,27       | N/VW    |
| Kraftkonstante               | 4,81       | 9,08       | N/A     |
| Gegen-EMK (Phase-Phase)      | 3,75       | 7,5        | Vs/m    |
| DC-Widerstand (Phase-Phase)  | 2,1        | 4,1        | Ohm     |
| Induktivität (Phase-Phase)   | 1,64       | 3,79       | mH      |
| Elektrische Zeitkonstante    | 0,78       | 0,92       | ms      |

Tab. 2 Vergossenen Linearmotoren mit drei bzw. sechs Spulen

Für eine konstante Kraft können die Linearmotoren eine bestimmte Maximalgeschwindigkeit erreichen. Dies ist am Beispiel eines eisenbehafteten Linearmotors in Abbildung 11 gezeigt. Diese Maximalgeschwindigkeit ist neben weiteren Motordaten ebenfalls abhängig von der zur Verfügung gestellten Motorspannung.

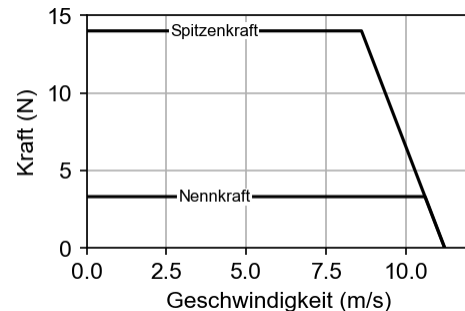


Abb. 11 Kraft-Geschwindigkeits-Diagramm eines eisenbehafteten Linearmotors

## 2.2.2 Eisenlose Linearmotoren

Eisenlose Linearmotoren eignen sich für Positionieraufgaben mit den höchsten Ansprüchen an Präzision. Im Gegensatz zu eisenbehafteten Linearmotoren tritt kein Cogging auf. Dadurch eignen sich eisenlose Motoren ideal für Anwendungen mit hoher Ablaufgenauigkeit und für Anforderungen an eine hohe Geschwindigkeitsstabilität, da es keine variierenden Kräfte auf die Linearführung oder Störungen für den Controller in Form von Cogging gibt. Durch die besonders flache Bauweise eignen sie sich außerdem für kleinste Bauräume. Kraft und Dynamik können über die Anzahl oder über die Baugröße der Motorspulen ausgelegt werden. Eisenlose Motoren erreichen im Vergleich zu eisenbehafteten Motoren in den meisten Fällen geringere Nenn- und Spitzenkräfte. Das begründet sich im Design aufgrund fehlender, thermisch leitfähiger Metalle und der damit eingeschränkteren Wärmeabfuhr aus den Spulen. Zusätzliche Temperatursensoren sorgen aber für einen Überlastschutz der Motoren. Ein beispielhafter Aufbau eines eisenlosen Linearmotors ist in Abbildung 12 dargestellt.

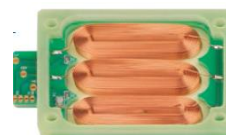


Abb. 12 Beispielhafter Aufbau eines PIMag® eisenlosen Linearmotors ohne Magnetbahn

Der in Abbildung 13 dargestellte flache Motor in einer U-Profil Magnetbahn ist ein Beispiel für einen von PI entwickelten eisenlosen Linearmotor.



Abb. 13 Flacher PIMag® Linearmotor mit drei Spulen in einer U-förmigen-Magnetbahn

Die eisenlosen Motoren werden z.B. auch mit drei oder sechs Spulen aufgebaut. Die Leistungsmerkmale sind anhand zweier Beispiele in Tabelle 3 dargestellt.

| Leistungsmerkmal             | 3 Spulen  | 6 Spulen   | Einheit |
|------------------------------|-----------|------------|---------|
| Max. Spannung                | 48        | 48         | V       |
| Nennkraft (ohne/mit Kühlung) | 4,1 / 9,8 | 8,1 / 18,4 | N       |
| Nennstrom (ohne/mit Kühlung) | 0,5 / 1,2 | 1,0 / 2,3  | A       |
| Motorkonstante               | 4,56      | 6,45       | N/VW    |
| Kraftkonstante               | 7,9       | 7,9        | N/A     |
| Gegen-EMK (Phase-Phase)      | 6,5       | 6,5        | Vs/m    |
| DC-Widerstand (Phase-Phase)  | 6,1       | 3,1        | Ohm     |
| Induktivität (Phase-Phase)   | 0,87      | 0,42       | mH      |
| Elektrische Zeitkonstante    | 0,14      | 0,14       | ms      |

Tab. 3 Besonders flachen Motoren mit drei bzw. sechs Spulen

## 2.3 Torquemotoren

Einen Torquemotor kann man sich vereinfacht als radial ausgeführten Linearmotor vorstellen. In einer alternativen Bauweise kann man den Rotor auch als aufgerollte einseitige Magnetbahn darstellen, während der Stator die Spulen, eingebettet in einer Eisenmatrix, trägt. Ein Beispiel für einen von PI entwickelten Torquemotor ist in Abbildung 14 dargestellt.



Abb. 14 Sehr flacher PIMag® Torquemotor mit großer Apertur

Torquemotoren eignen sich genauso wie Linearmotoren für Positionieraufgaben mit den höchsten Ansprüchen an Präzision bei gleichzeitig hohen Drehmomenten und Beschleunigungen. Das Drehmoment skaliert quadratisch mit dem Durchmesser, während die Magnetlänge linear skaliert. Außerdem ermöglichen große Durchmesser Aperturen, z.B. zum Durchführen von Laserstrahlen oder Kabeln.

Torquemotoren sind spielfreie Direktantriebe und eignen sich damit für Positionieranwendungen, in denen höchste Genauigkeiten verlangt werden. Die hohe Steifigkeit führt zu einer hohen Wiederholgenauigkeit. Das große Antriebsmoment lässt große Beschleunigungen zu und führt zu einer hohen Dynamik.

Torquemotoren werden in der Präzisionspositionierung überwiegend für Direktantriebsdrehtische genutzt. Ein solcher Drehtisch ist in Abbildung 15 dargestellt, gestapelt auf einem Hexapod. Es handelt sich um einen besonders flachen, hochdynamischen und stabilen Torquemotor-Drehtisch mit sehr großer Apertur. Die gemeinsame Apertur des Drehtisches und des Hexapods kann so z.B. als Durchführung eingesetzt werden.



Abb. 15 Flacher PIMag® Torquemotor-Drehtisch mit großer Apertur  
gestapelt auf einem PI-Hexapod

Ein weiteres Beispiel ist der in Abbildung 16 dargestellte Torquemotor-Drehtisch, der aufbauend auf einem H-811-Hexapod in hochautomatisierten Produktionssystemen Einsatz findet.



Abb. 16 PIMag® Torquemotor-Drehtisch gestapelt auf einem PI-Hexapod  
für hochautomatisierte Produktionssysteme

bis 7 mm benötigt. Zudem bieten Voice Coils besonders hohe Maximalgeschwindigkeiten, die zum Beispiel beim Digital Slide Scanning im „Scanning-on-the-fly“-Modus den Durchsatz erhöhen.



Abb. 17 Autofokus-Anwendung mit Voice-Coil Z-Achse und Linearmotor  
X-Achse

Aber auch für Fälle, in denen sich der Kunde nur für eine Komponente einer Positionierlösung interessiert, ist PI aufgrund seiner Fertigungstiefe und technologischen Breite ein geeigneter Ansprechpartner.

### 3 Zusammenfassung

Mit der Kompetenz in der Entwicklung eigener Motoren und mit den für eine komplette Positionierlösung erforderlichen Kerntechnologien wie Sensoren, Führungen und Motion Controller kann PI seinen Kunden wettbewerbsfähige Lösungen anbieten, deren Leistungsmerkmale optimal an die Anforderungen der Anwendung angepasst sind. So zeigt Abbildung 17 beispielsweise eine Anwendung, die unterschiedliche Motortypen vereint. Der gezeigte Mehrachsenaufbau für Autofokus-Applikationen besteht aus einer X- und Z-Achse. Die X-Achse trägt hierbei beispielsweise ein zu bearbeitendes Werkstück auf einem V-508 Lineartisch. Als Ergänzung zu häufig eingesetzten piezokeramischen Antrieben ermöglicht die Voice-Coil Z-Achse große Stellwege bis hin zu mehreren Millimetern. Dies ist unter anderem für die Lasermaterialbearbeitung von Bedeutung. Aber auch für die Multi-Photonen Fluoreszenzmikroskopie und die Deep Tissue Mikroskopie werden Stellwege von typischerweise 1

Serviceniederlassungen ist die PI Gruppe international vertreten.

## 4 Autor



Dr. Nico Bolse, Produktmanager für PIMag® Magnetantriebe und Motorized Positioners bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG in Karlsruhe, Deutschland.

## 5 Über PI

Das Unternehmen Physik Instrumente (PI) ist für die hohe Qualität seiner Produkte bekannt und nimmt seit vielen Jahren eine Spitzenstellung auf dem Weltmarkt für präzise Positioniertechnik ein. Seit über 40 Jahren entwickelt und fertigt PI Standard- und OEM-Produkte mit Piezo- oder Motorantrieben.

Eine kontinuierliche Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte, Produkte und Systemlösungen und über 200 Technologiepatente kennzeichnen heute die Unternehmensgeschichte. Dabei entwickelt, fertigt und qualifiziert PI alle Kerntechnologien selbst: Von Piezokomponenten, -aktoren und -motoren und magnetischen Direktantrieben über Luftlager, Magnet- und Festkörperführungen bis hin zu Nanometrologie-Sensoren, Regeltechnik und Software. PI ist dadurch von den am Markt verfügbaren Komponenten unabhängig, um seinen Kunden die fortschrittlichsten Lösungen anzubieten. Die hohe Fertigungstiefe ermöglicht dabei eine vollständige Prozesskontrolle, um flexibel auf die Marktentwicklungen und neue Anforderungen zu reagieren.

Durch die Übernahme der Mehrheitsanteile an ACS Motion Control, einem weltweit führenden Entwickler und Hersteller modularer Motion Controller für mehrachsige Antriebssysteme, kann PI außerdem maßgeschneiderte Komplettsysteme für industrielle Anwendungen liefern, die höchste Präzision und Dynamik fordern. Mit vier Standorten in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und