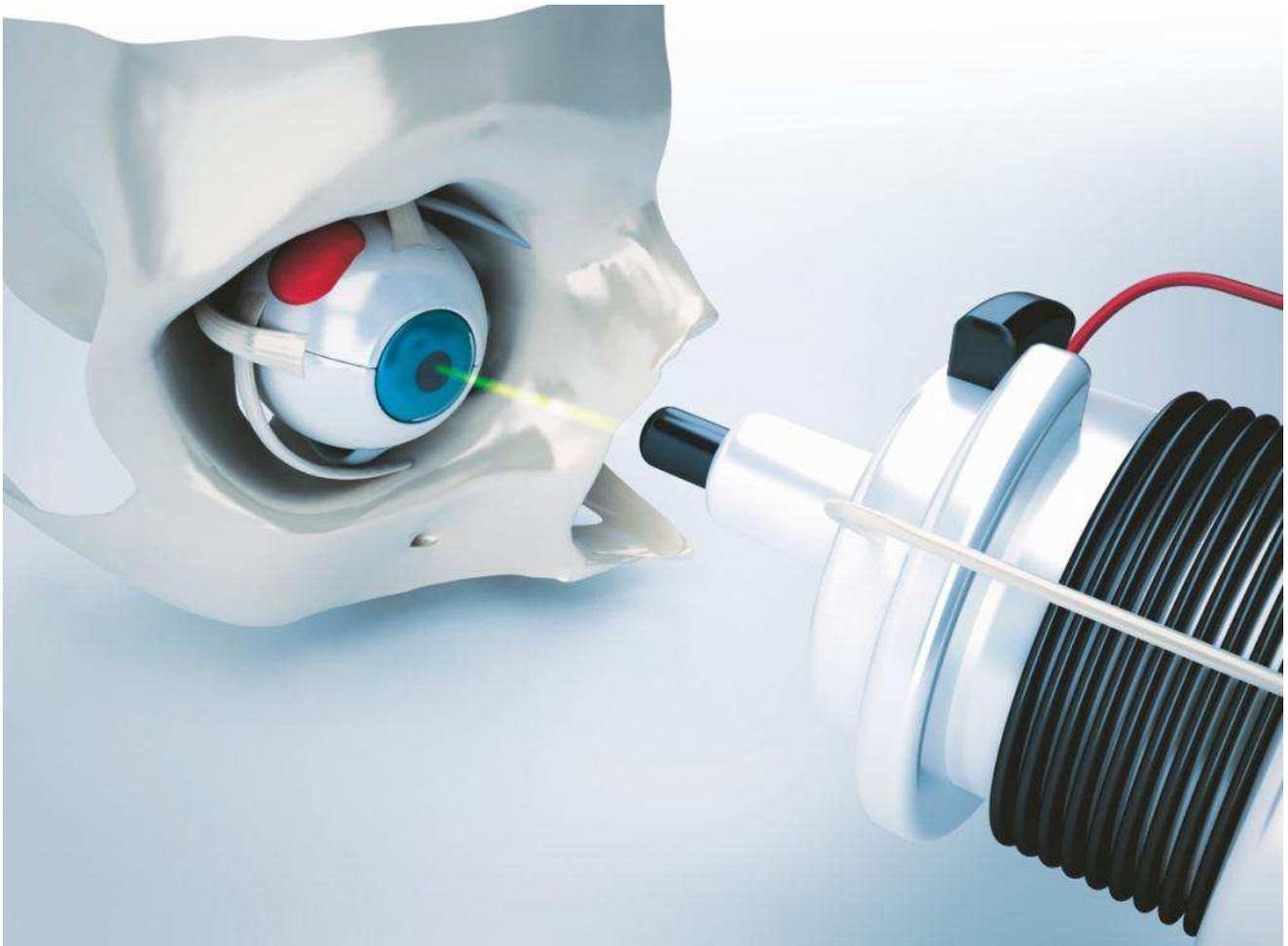


## Präzisionsarbeit am menschlichen Auge

Piezobasierte Positioniersysteme für die Ophthalmologie



Der Mensch ist ein „Augentier“, d. h. er erfasst die meisten Informationen visuell. Kein Wunder also, dass der Sehkraft eine große Bedeutung zukommt. Schon seit dem 13. Jahrhundert lassen sich Sehfehler mit optischen Gläsern korrigieren. In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts begannen bereits die ersten klinischen Studien zur Untersuchung chirurgischer Methoden für eine „Modellierung“ der Hornhaut.

Heute haben sich unterschiedliche Laserverfahren etabliert, um für eine Sehschärfenkorrektur die Krümmung der Hornhaut entsprechend beeinflussen zu können. Sie alle haben eine entscheidende Gemeinsamkeit: Die Laserstrahlsteuerung und -fokussierung, welche hochpräzise Positioniersysteme erfordern. Piezobasierte Lösungen haben hier meist die Nase vorn. Sie arbeiten mit der notwendigen Präzision, sind schnell, zuverlässig und lassen sich dank unterschiedlicher und kompakter Bauformen gut in die heute üblichen Lasersysteme integrieren.

## Präzisionsarbeit am menschlichen Auge

Fehlsichtigkeiten am Auge kann man heute dank refraktiver Operationstechniken bis in hohe Dioptrienbereiche ausgleichen. Dazu wird die Hornhautform in der Sehachse durch Entfernen von Hornhautpartikelchen mit Hilfe von Laserstrahlen so modelliert, dass die resultierende Brechkraft der Hornhaut (Epithel) wieder zur Länge des Augapfels passt (Abb. 1).

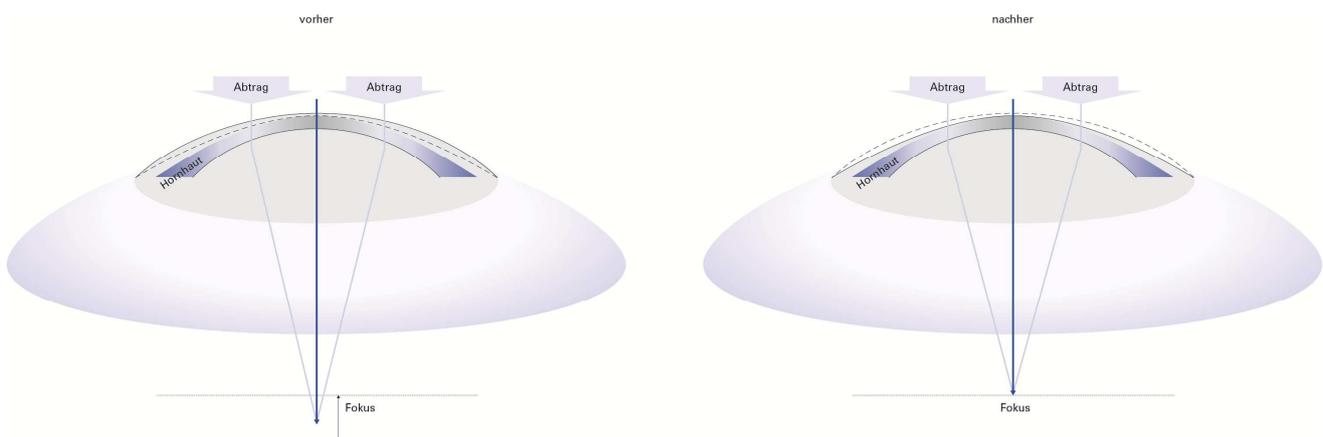


Abb. 1 Um Fehlsichtigkeiten am Auge auszugleichen wird die Hornhautform in der Sehachse durch Entfernen von Hornhautpartikelchen mit Hilfe von Laserstrahlen so modelliert, dass die resultierende Brechkraft der Hornhaut (Epithel) wieder zur Länge des Augapfels passt (Bild: PI)

Bei der Epi-LASIK (epitheliale Laser-in-situ-Keratomieusis) wird dazu zunächst das Epithel mit einem Mikrokeratom (mechanischem Präparationsskapell) oder einem Laser präpariert. Die dabei entstehende dünne Hornhautlamelle, der so genannte Flap, wird anschließend zur Seite geklappt. Die obere Zellschicht der Hornhaut im Behandlungsbereich kann aber auch mit Hilfe eines kleinen Spezialinstrumentes in Form eines Schabers (PRK = photorefraktive Keratektomie) entfernt werden. Bei der so genannten LASEK (Lasergestützte subepitheliale Keratomieusis) wird die mit einem „Einritzring“ durchbohrte oberflächliche Hornhaut zur Ablösung mit einer schwachen Alkohollösung kurz benetzt und von Hand vorsichtig zur Seite geschoben. Dann erst folgt die eigentliche Laserbehandlung.

## Femtosekunden- und Excimerlaser

Prinzipiell werden bei diesen refraktiven Operationen zwei unterschiedliche Lasertypen eingesetzt: Excimerlaser und Femtosekundenlaser. Die Letztgenannten arbeiten im Infrarotbereich und senden Lichtimpulse aus, deren Dauer im Femtosekundenbereich liegt (eine Femtosekunde entspricht  $10^{-15}$  s). Die Laserenergie entlädt sich nicht an der Oberfläche der Hornhaut, sondern im Innern in einer vorher bestimmten Tiefe und mit einer Wirkdauer von einigen Femtosekunden.

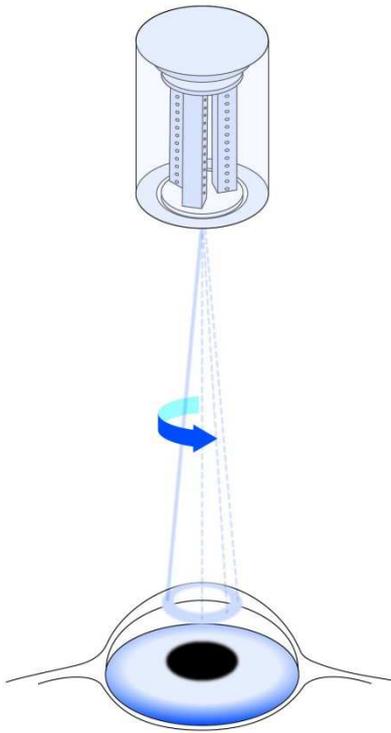


Abb. 2 Bei der Steuerung der Laserstrahlen ist höchste Präzision obligatorisch. Piezobasierte Positioniersysteme bieten hierfür beste Voraussetzungen (Bild:PI)

Die Laserenergie entlädt sich nicht an der Oberfläche der Hornhaut, sondern im Innern in einer vorher bestimmten Tiefe und mit einer Wirkdauer von einigen Femtosekunden. Auf diese Weise lassen sich Gewebe extrem exakt und praktisch ohne Wärmeentwicklung schneiden. Dies nutzt man z. B. bei der oben genannten LASIK-Methode, um das dünne Hornhautscheibchen (Flap) zu entfernen. Mit Femtolasern lassen sich aber auch Hornhauttunnel für intracorneale Implantate präparieren, z. B. für künstliche Linsen.

Die Korrektur der Fehlsichtigkeit übernimmt jedoch nicht der Femtolaser. Hier kommen Excimerlaser zum Einsatz. Sie senden UV-Licht aus, wobei sich die Energie des Laserstrahls direkt an der Oberfläche der Hornhaut entlädt. Der Laserstrahl dringt nur in eine mikrometerbreite Gewebeschicht der Hornhaut ein und lässt dort das Gewebe verdampfen. Die Modellierung der Hornhaut geschieht punktgenau, sodass Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit oder Astigmatismus (Hornhautverkrümmung) behoben werden können. Damit ist bei beiden in der Augenbehandlung eingesetzten Lasern die genaue Positionierung des Laserstrahls bzw. die schnelle und präzise Steuerung des Laserstrahls ausgesprochen wichtig.

Ist der Excimerlaser im Einsatz, überwacht ein in das System integrierter Eye Tracker die Position des Auges und passt die Platzierung des Lichtstrahls mit einer Reaktionszeit von weniger als 10 ms entsprechend an. Der Laser muss hierfür ebenfalls entsprechend geführt werden (Abb. 2).

## Hochpräzise Piezokippspiegel als Ein- oder Mehrachsensysteme

Gängige Ablenktechniken, wie die meist auf dem Induktionsprinzip basierenden Galvanometer-Scanner, sind für solche Hochpräzisionsanwendungen am menschlichen Auge zwar prinzipiell geeignet, haben jedoch auch Nachteile. Um in zwei Achsen positionieren zu können, müssen zwei Systeme hintereinander geschaltet, also gestapelt werden.

Dadurch ergeben sich unterschiedliche Kippunkte und der Platzbedarf ist verhältnismäßig groß. Piezogetriebene Kippspiegelsysteme (Abb. 3) sind hier die bessere Alternative, da sie nicht nur die erforderliche Genauigkeit bieten, sondern gleichzeitig auch kompakt bauen, hohe Beschleunigungen und eine große dynamische Bandbreite bieten.



Abb. 3 Kompakter Piezo-Kippspiegel mit zwei orthogonalen Achsen und 100 mrad optischem Ablenkwinkel bei 0,0005 mrad Auflösung; Länge 38 mm (Bild: PI)

Als Spezialist auf diesem Gebiet gilt schon seit etlichen Jahren die Firma Physik Instrumente (PI), die für Anwendungen in der Ophthalmologie gleich eine ganze Reihe unterschiedlicher Lösungen anbietet, die nicht nur die speziellen Erfordernisse dieses Applikationsbereichs abdecken, sondern sich obendrein auch noch gut in die Lasersysteme integrieren lassen. Sie ermöglichen einen optischen Ablenkbereich bis zu 120 mrad, extrem schnelles Ansprechverhalten (10 ms bis 1 ms mit Spiegel) sowie Auflösungen bis in den Nano-Radianbereich.

Treibende Kraft dieser ein-, zwei- oder dreiachsigen Systeme sind Piezoaktoren. Aktoren, die auf dem Piezoeffekt basieren, bewegen sich mit Auflösungen im Sub-Nanometerbereich bei hoher Dynamik und Scanfrequenzen bis zu mehreren tausend Hertz. Da die Bewegung auf kristallinen Effekten beruht, gibt es keine rotierenden oder reibenden Teile; Piezoaktoren sind dadurch praktisch wartungs- und verschleißfrei. Elektrisch wirken sie wie kapazitive Lasten und benötigen im statischen Betrieb keine Leistung. In den Kippspiegelsystemen wirken sie direkt oder über Festkörpergelenke auf die Spiegelplattform. Da keine Zwischenelemente wie Spindeln oder Getriebe verwendet werden, sind sie umkehrspielfrei.

Elektrisch wirken sie wie kapazitive Lasten und benötigen im statischen Betrieb keine Leistung. In den Kippspiegelsystemen wirken sie direkt oder über Festkörpergelenke auf die Spiegelplattform. Da keine Zwischenelemente wie Spindeln oder Getriebe verwendet werden, sind sie umkehrspielfrei.

Bei Kippspiegelsystemen mit mehreren Bewegungsachsen sind die Piezoantriebe in parallelkinematischen Positioniersystemen eingesetzt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Diese Bauform hat gegenüber seriellen Systemen verschiedene Vorteile: So gibt es nur eine bewegte Plattform mit gemeinsamem Drehpunkt, die Dynamik ist höher und die Baugröße kleiner. Außerdem erreichen die Systeme eine höhere Linearität als durch Hintereinanderschalten von zwei Einachssystemen – z. B. Galvanoscannern – realisierbar ist.

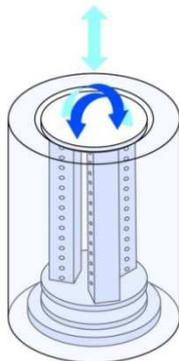


Abb. 4 Bei parallelkinematischen Systemen wirken alle Aktoren unmittelbar auf die gleiche Plattform; Prinzipaufbau mit drei Aktoren (Bild:PI)

Integrierte hochauflösende Positionssensoren sorgen für hohe Linearitätswerte von besser als 0,25 % über den vollen Stellbereich und für eine Wiederholgenauigkeit von typischerweise 5  $\mu$ rad.

## Piezo-Ultraschallantriebe

Ebenfalls interessante Möglichkeiten für die Laserstrahlsteuerung erschließen die keramischen PLine<sup>®</sup> Ultraschallmotoren. Sie zeichnen sich durch extreme hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigung bei gleichzeitig sehr kompakten Abmessungen aus.

Das patentierte Antriebsprinzip (Abb. 5) macht sie selbsthemmend im Ruhezustand. Linearmotoren und Antriebe sind zur Integration in ein Kundensystem vorgesehen und im Allgemeinen ungeführt.

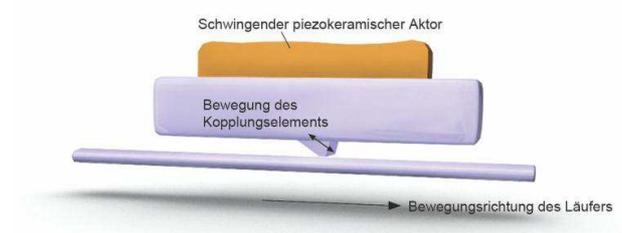


Abb. 5 Patentiertes Funktionsprinzip der PLine<sup>®</sup> Aktoren: Schwingungen mit Ultraschallfrequenzen eines piezokeramischen Aktuators werden entlang einer Reibschiene in lineare Bewegung umgewandelt und treiben so den beweglichen Teil eines mechanischen Aufbaus an (Bild:PI)

Es gibt jedoch auch Komplettlösungen, die sich einbaufertig in viele Applikationen integrieren lassen. Der Präzisions-Mikrolineartisch M-663 (Abb. 6), der sich bei Bedarf auch für XY-Kombinationen eignet, liefert ein gutes Beispiel dafür. Er bietet Geschwindigkeiten von bis zu 400 mm/s und Stellwege bis 19 mm bei Auflösungen bis zu 0,1  $\mu$ m.



Abb. 6 PLine<sup>®</sup> Mikropositioniertisch mit Linearencoder zur direkten Positionsauswertung (Bild:PI)

Ein berührungslos messender optischer Linearencoder garantiert hohe Linearität und Wiederholgenauigkeit. Außerdem ist nach einem Stillstand keine Referenzfahrt erforderlich. Mit 15 mm Höhe, 30 mm Breite und 35 mm Länge baut der Mikrostelltisch sehr kompakt, lässt sich also gut in die jeweilige Anwendung integrieren. Dazu trägt sicherlich auch bei, dass der gleiche Hersteller auch die passenden Treiberelektroniken und Controller anbietet, die perfekt auf den Mikrolineartisch abgestimmt sind. Für Laserstrahlsteuerung und -fokussierung erschließen sich durch solche Positionierlösungen interessante Möglichkeiten, von denen auch die Patienten profitieren.

## Über PI

In den letzten vier Jahrzehnten hat sich Physik Instrumente (PI) mit Stammsitz in Karlsruhe zum führenden Hersteller von Positioniersystemen mit Genauigkeiten im Nanometerbereich entwickelt. Das privat geführte Unternehmen ist mit vier Sitzen in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und Serviceniederlassungen international vertreten.

Über 850 hochqualifizierte Mitarbeiter rund um die Welt versetzen die PI Gruppe in die Lage, fast jede Anforderung aus dem Bereich innovativer Präzisionspositioniertechnik zu erfüllen. Alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt. Dadurch kann jede Phase vom Design bis hin zur Auslieferung kontrolliert werden: die Präzisionsmechanik und Elektronik ebenso wie die Positionssensoren.

Die dafür benötigten piezokeramischen Elemente werden bei der Tochterfirma PI Ceramic in Lederhose gefertigt, einem der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktorischer und sensorischer Piezoprodukte.

Die PI miCos GmbH in Eschbach bei Freiburg ist spezialisiert auf flexible Positioniersysteme für Ultrahochvakuum-Anwendungen sowie parallelkinematische Positioniersysteme mit sechs Freiheitsgraden und Sonderanfertigungen.

## Autoren



Doris Knauer, Fachredakteurin bei Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG

Ellen-Christine Reiff, M.A., Redaktionsbüro Stutensee