

1D, 2D MEMS-Mikroscanner vektoriell (quasistatisch) oder resonant steuerbar mit integrierter Positionssensorik

Das Fraunhofer IPMS hat langjährige Erfahrung mit der kundenspezifischen Entwicklung von MEMS-Mikroscannern. Diese bestehen aus einer optisch aktiven Fläche – einem Spiegel oder einem Beugungsgitter – das entweder um eine oder zwei Drehachsen gekippt oder translatorisch bewegt werden kann. Dabei ist sowohl ein 2D vektoriell als auch ein 2D resonant scannendes Bauelement oder eine Kombination der beiden Ansteuerarten möglich.

Bei quasistatischen MEMS-Scannerspiegeln kann die Kippbewegung von einer statischen Auslenkung auf einen Winkel bis hin zu frei definierten Winkeländerungen (mit einer oberen Frequenz- und Amplitudengrenze) beliebig moduliert werden. Resonante Scannerspiegel werden in der Nähe ihrer durch das Design festgelegten Resonanzfrequenz betrieben um für die gewählte Antriebsspannung die maximale Auslenkung zu erreichen.

Die Palette der verfügbaren Scannerspiegel zeichnet sich durch einen großen optischen Scanbereich, eine große Breite realisierbarer Frequenzen, unterschiedliche Spiegelgeometrien und verschiedene Möglichkeiten der Ausführung der Spiegeloberfläche aus. Im Betrieb sind die Mikroscanner äußerst zuverlässig. Zur exakten Kontrolle und Regelung ihrer mechanischen Bewegung sind sie mit einer monolithisch integrierten Positionssensorik versehen. Die spiegelnde Oberfläche der MEMS-Scanner weist einen Reflexionsgrad von ca. 90 % im

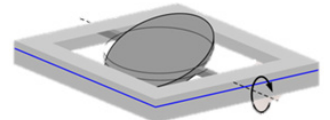
sichtbaren Bereich auf. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, eine kundenspezifische, hochreflektierende dielektrische Verspiegelung aufzubringen.

Die 1D- und 2D-Scannerbauelemente werden in Volumenmikromechanik aus einkristallinem Silizium in einem qualifizierten, CMOS-kompatiblen MEMS-Prozess serientauglich hergestellt. Die Technologie dieser Scannerspiegel wird kontinuierlich durch neuartige und patentierte Designlösungen sowie anwendungsspezifische Technologiemodule in ihrer Einsatzbreite erweitert. Am Fraunhofer IPMS wurden bereits mehr als 200 unterschiedliche Mikroscanner-Designs entwickelt und im eigenen Reinraum gefertigt.

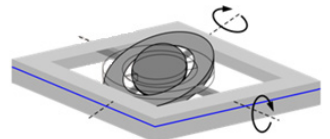
Die Unterstützung der Kunden bei der Entwicklung spezifischer Modulaufbauten, elektronische Lösungen zur geregelten und die Präzision der Scanner ausschöpfenden Ansteuerungen sowie Evaluation Kits ergänzen unser Portfolio im Bereich der MEMS-Scannerspiegel.

Auswahl von Ausführungen der MEMS-Mikroscanner

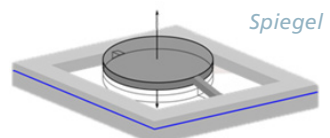
1D-Kippspiegel



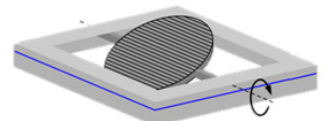
2D-Kippspiegel



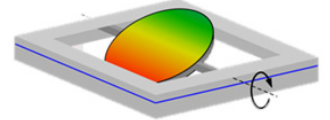
Translatorischer
Spiegel



Gitterspiegel



Hochreflektierend
beschichtet



Designräume und Parameterbeispiele von 1D- und kardanischnen 2D-MEMS-Mikroscannern

Kardanische MEMS-Scanner und Parameterbeispiele

Typ	Modus	Parameterbereiche verschiedener Designs			Parameter ausgewählter Beispieldesigns		
		Spiegelgröße (1)	Amplitude (2)	Frequenz (3)	Spiegelgröße (1)	Amplitude (2)	Frequenz (3)
Kippspiegel 1D	quasistatisch	1 ... 6 x 8 mm ²	bis 10,5°	bis 2,4 kHz	2 x 3 mm ²	9,5°	550 Hz
	resonant	0,5 ... 7 mm ²	bis 25°	bis 100 kHz	3 x 3 mm ²	9,5°	6,0 kHz
Kippspiegel 2D	quasistatisch resonant	bis 5 x 7 mm ²	bis 10° bis 22°	bis 1,2 kHz 37 kHz	2,5 x 1,8 mm ²	10° 17°	180 Hz 4,5 kHz
	resonant resonant	bis 3 x 4 mm ²	bis 28° bis 21°	bis 25 kHz bis 42 kHz	3,3 x 3,5 mm ²	11° 8°	150 Hz 110 Hz
Translation	resonant	bis D = 5 mm	bis 500 µm	12 kHz	2,0 x 2,0 mm ²	500 µm	12 kHz

- 1) Typische Spiegelgeometrie: rund/elliptisch, rechteckig bei ausgewählten Designs
- 2) Amplitude: **mechanische Scanamplitude** (mechanischer Scanbereich = 2x Amplitude, optisches Blickfeld = 4x Amplitude wegen Reflektion)
- 3) Frequenz: **Resonanzfrequenz** (die maximale Frequenz linearisierter Trajektorien bei quasistatischen Scannern beträgt ca. ein Fünftel dieses Wertes)

1D-Designräume für resonante und quasistatische Spiegel

Die Parameter Spiegeldurchmesser, Eigenfrequenz und Auslenkung sind wichtige und einander begrenzende Größen. Darüber hinaus sind weitere Parameter wie die optische Planarität, Schock- und Vibrationsfestigkeit sowie möglichst geringe Antriebsspannungen und Chipabmessungen während des Design- und Layoutprozesses zu erreichen.

Die obige Tabelle mit den Mikroscanner-Designbeispielen und die Abbildungen zu resonanten und quasistatischen Designräumen geben eine erste Orientierung hinsichtlich der Umsetzbarkeit von Designvorstellungen. Es sind auch Spezialfälle außerhalb dieser skizzierten Designräume möglich. Diese sind typischerweise im Rahmen von Machbarkeitsstudien zu bewerten. Für den resonanten Designraum gilt, dass die Designfreiheiten für Eigenfrequenzen <2 kHz deutlich steigen. Außerdem kann eine quasistatische Rahmenachse mit einer resonanten Spiegelachse als kardanischnen 2D-MEMS-Scanner kombiniert werden. Für elektrostatische 2D-MEMS-Scanner mit zwei quasistatischen Achsen gelten die Informationen unter 2D-Vektorscannern auf Seite 6.

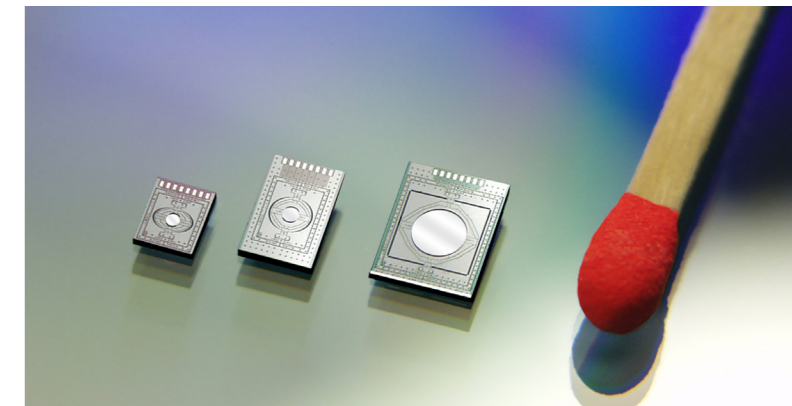


▲ 1D-MEMS-Scanner, identische Apertur 5 mm
links: 1D resonant, rechts: 1D quasistatisch

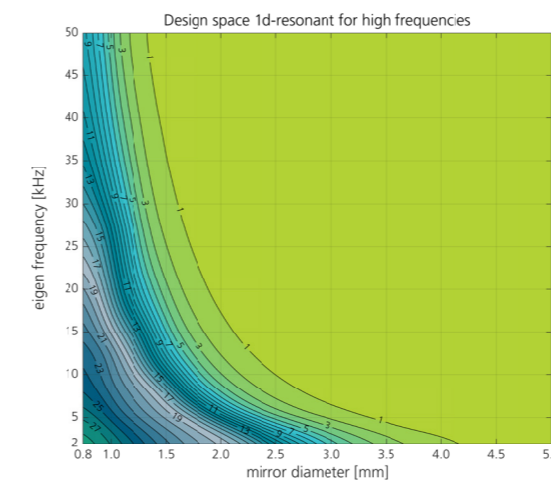
Sprechen Sie uns an!

Designräume für 1D resonante MEMS-Scanner

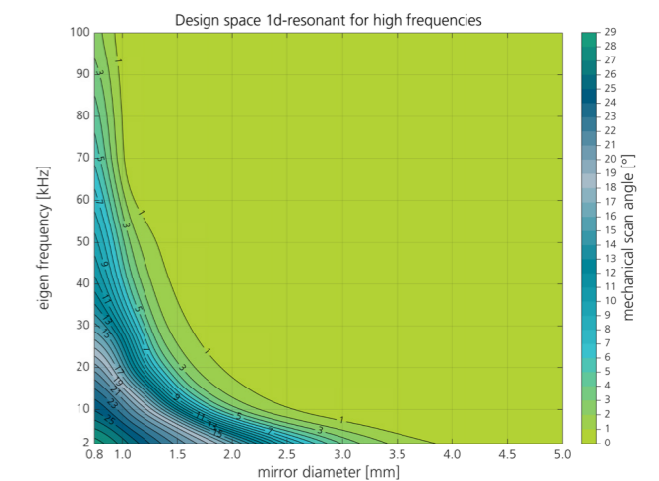
Bei höheren Eigenfrequenzen ist abhängig von der jeweiligen Anwendung und verwendeten Wellenlänge auf die dynamische Deformation der Spiegelplatte zu achten. Das heißt, die Verformung der Spiegelplatte muss ausreichend klein sein, um die Strahlqualität des reflektierten Lichtes nicht negativ zu beeinflussen. Damit die Designräume für die resonanten MEMS-Scanner dargestellt werden können, ist ein maximaler Wert von 100 nm für diese Verformung angenommen worden. Für ein konkretes Kundendesign berücksichtigen wir in den Designsimulationen den für die jeweilige Anwendung tolerierbaren Wert.



▲ Resonante MEMS-Scanner mit kleiner Spiegelapertur



▲ 1D resonant für Frequenzen bis 50 kHz

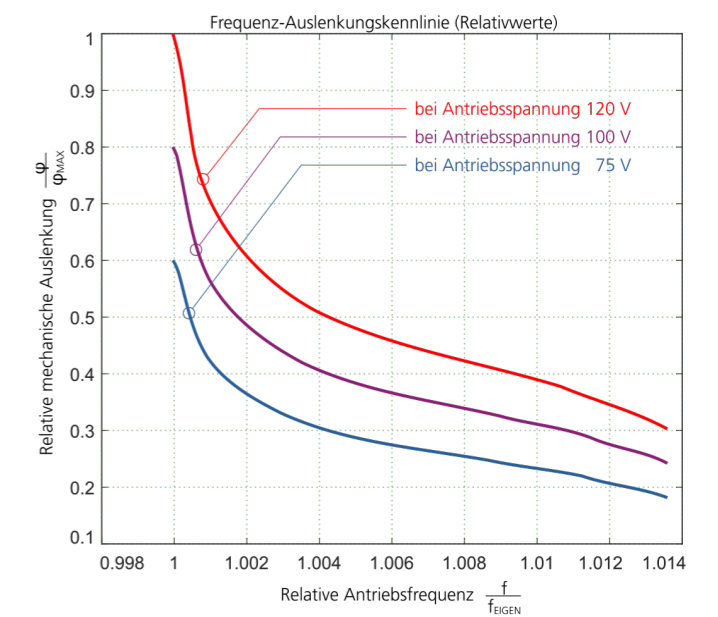


▲ 1D resonant für Frequenzen bis 100 kHz

Spezifika resonanter Mikroscannerspiegel

Die Spiegelplatte der Mikroscanner-Demonstratoren wird durch elektrostatische, planar gefertigte Kammantriebe zu einer resonanten Schwingung angeregt. Durch Anpassung der Antriebsspannung oder der Anregungsfrequenz wird die Schwingungsamplitude eingestellt. Bei den 2D-Mikroscannern ist der Spiegel kardanischnen aufgehängt. Die Frequenz der beiden Schwingungen wird im Design unabhängig voneinander festgelegt. Jede der beiden Achsen wird individuell angeregt, so dass die Amplitude jeder Schwingung unabhängig von der anderen eingestellt und kontrolliert werden kann.

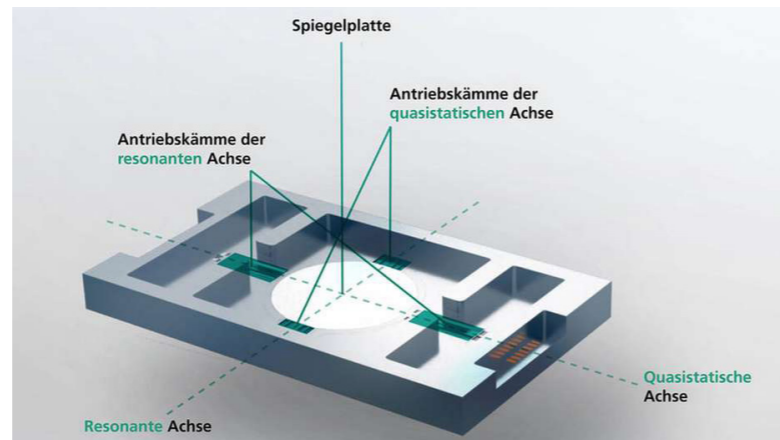
Resonante Scannerspiegel werden mit einer Rechteckspannung betrieben, die beispielsweise von einem handelsüblichen Funktionsgenerator, gegebenenfalls mit Verstärker, zur Verfügung gestellt werden kann. Alternativ bieten wir Ihnen gerne eine entsprechende Elektronik – auch mit Triggergeneration und Amplitudenregelung – an.



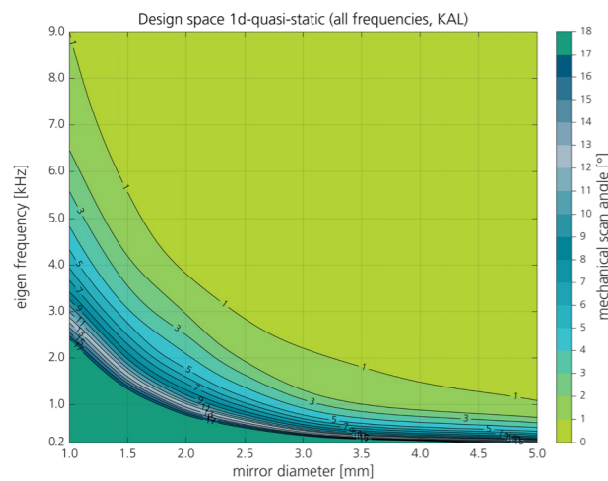
▲ Typische Frequenz-Auslenkungskennlinien resonanter Scannerspiegel

Designräume für 1D quasistatische MEMS-Scanner

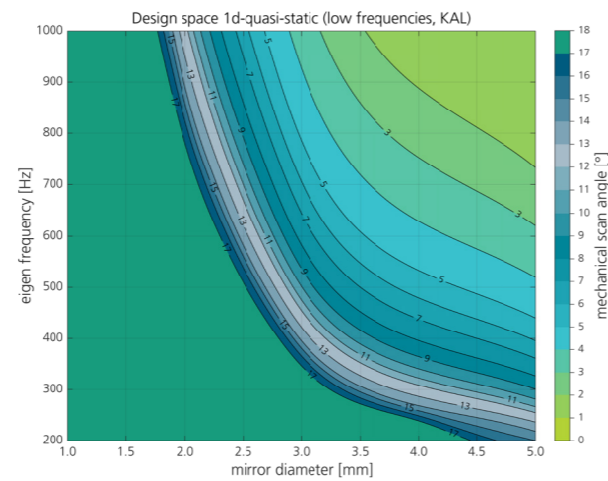
Auch bei quasistatischen MEMS-Scannern ist die Eigenfrequenz ein sehr wichtiger Parameter. Im Gegensatz zu den resonant schwingenden Scannern, die nahe an ihrer Eigenfrequenz betrieben werden, soll das quasistatische Scannen deutlich unter der Eigenfrequenz liegen, um die Einschwingzeiten für die adressierten Sollpositionen gering zu halten und beliebige Scantrajektorien mit hoher Genauigkeit steuern bzw. regeln zu können.



▲ Aufbau eines LinScan-Mikroscanners mit zweiter resonanter Achse



▲ 1D-quasistatisch für Eigenfrequenzen bis 9 kHz

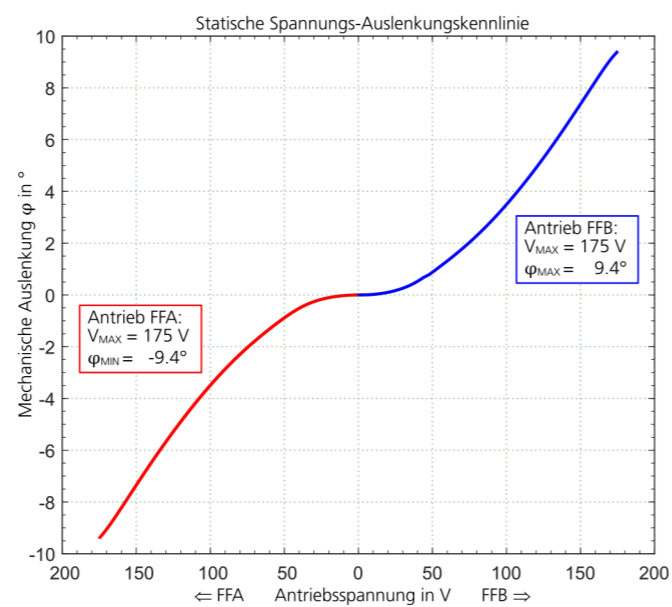


▲ 1D-quasistatisch für Eigenfrequenzen bis 1 kHz

Spezifika quasistatischer »LinScan«-Mikroscanner

LinScan-Mikroscanner verfügen über eine elektrostatisch betriebene Antriebsachse, die über vertikale Kammantriebe realisiert wird. Je nach Anwendung und Spezifikationen kommen abgewinkelte (AVC bzw. CAVC) oder geschichtete (SVC) vertikale Kammantriebe zum Einsatz. Bei 2D-Mikroscannern wird die innere kardanisch aufgehängte Spiegelachse über einen resonanten Antrieb realisiert. Hierzu werden planare Kammantriebe verwendet.

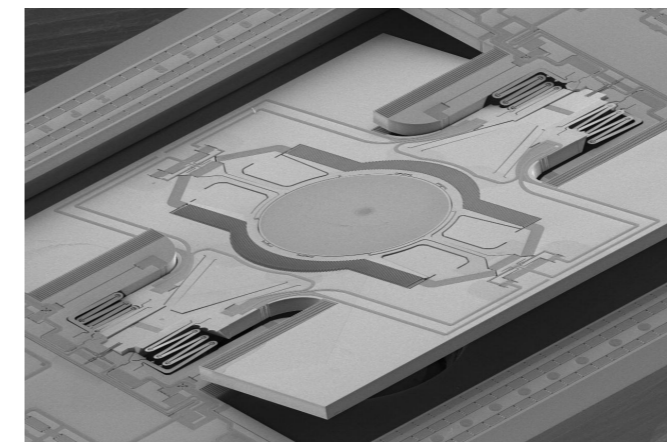
Alle mechanischen Komponenten entstehen als zwei-dimensionale Strukturen in einer Schicht aus einkristallinem Silizium. In einem adhäsiven Waferbondprozess mit einem zweiten, planar strukturierten Silizium-Wafer entstehen die vertikalen Kammelektroden durch Vorauslenkung aus dem Substrat und anschließender Fixierung durch den Waferbond. Die vertikalen Verschiebung der Elektroden wird hierbei durch mechanische Festkörpermechanismen ausgeführt. Dadurch wird eine mechanische Entkopplung von Fertigungstoleranzen erreicht, was in einer sehr genauen Ausrichtung der Elektroden zueinander resultiert.



▲ Typische statische Spannungs-Auslenkungskennlinie quasistatischer Scanner

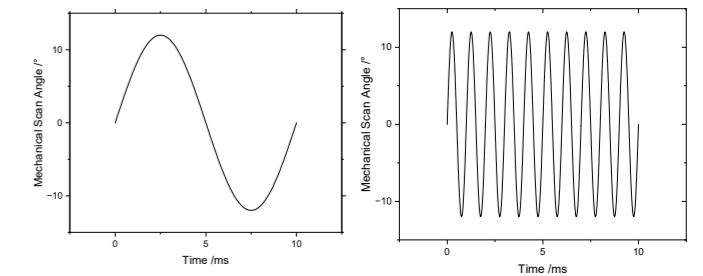
Kardanische 2D-MEMS-Scanner

Die beschriebenen 1D-MEMS-Scanner lassen sich auf dem Chip mit kardanischer Aufhängung, also mechanisch entkoppelten Achsen, zu 2D-Scannern kombinieren. Dabei stehen zwei Optionen zur Verfügung: Zum einen die Kombination einer quasistatischen Rahmenachse mit einer resonanten inneren Spiegelachse oder zwei resonant schwingenden Spiegelachsen.

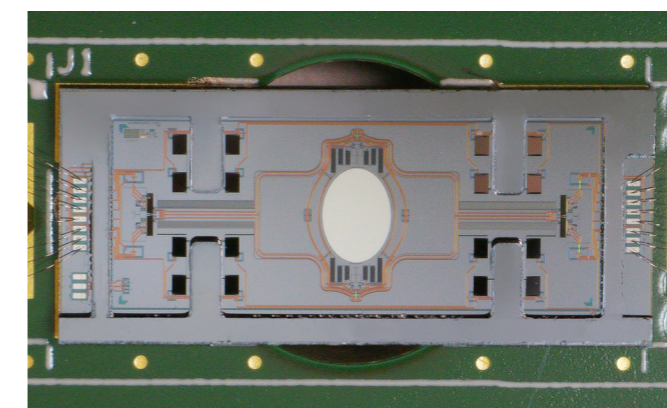


▲ MEMS-Scanner 2D resonant: Rahmenfrequenz 100 Hz, Spiegelfrequenz 27.600 Hz

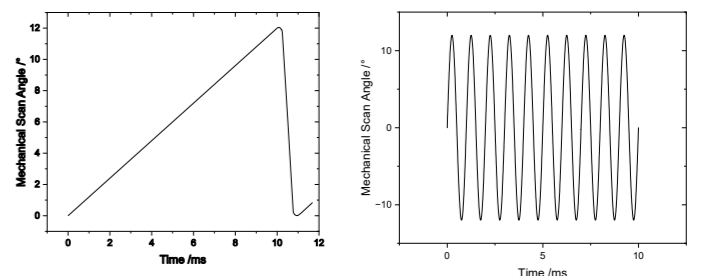
Die Auswirkung auf die 2D-Scantrajektorie für die Kombinationsmöglichkeiten wird beispielhaft in den folgenden Abbildungen dargestellt. Bei doppelresonanten Scannern ist eine langsame, resonante Achse mit einer schnellen, resonanten Achse kombiniert. Eine langsame, quasistatische Achse in Kombination mit einer schnellen, resonanten Achse führt zu einem quasistatisch resonanten Scanner.



▲ Doppelresonanter Scanner (links) mit Trajektorien einer langsamen, resonante Achse (Mitte) und einer schnellen, resonanten Achse (rechts).



▲ MEMS-Scanner 2D quasistatisch / resonant: Rahmenfrequenz 170 Hz, Spiegelfrequenz 4.500 Hz

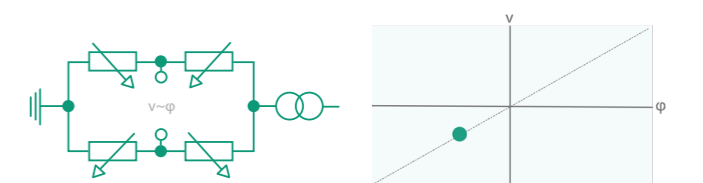


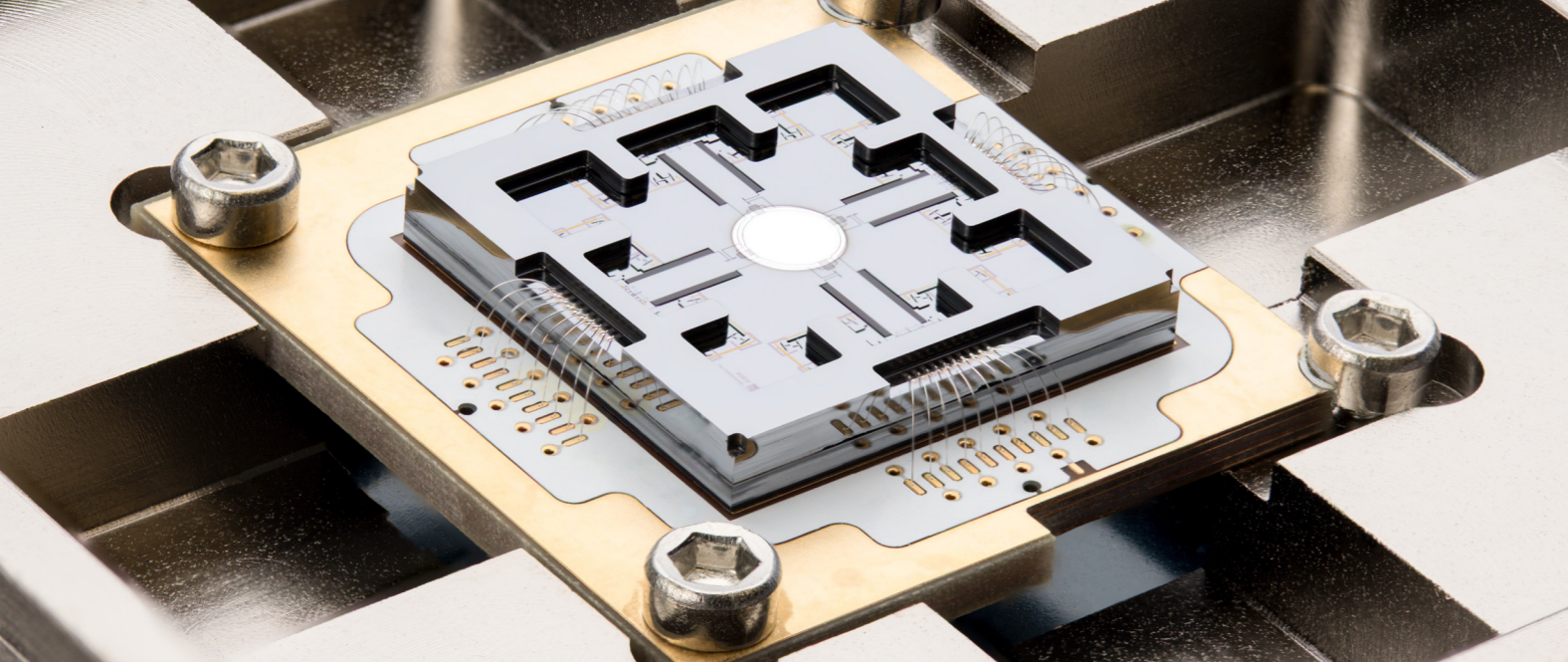
▲ Quasistatisch resonanter Mikroscanner (links) mit Trajektorien einer langsamen, quasistatischen Achse (Mitte) und einer schnellen, resonanten Achse (rechts)

Monolithisch integrierte piezoresistive Positionsdetektion

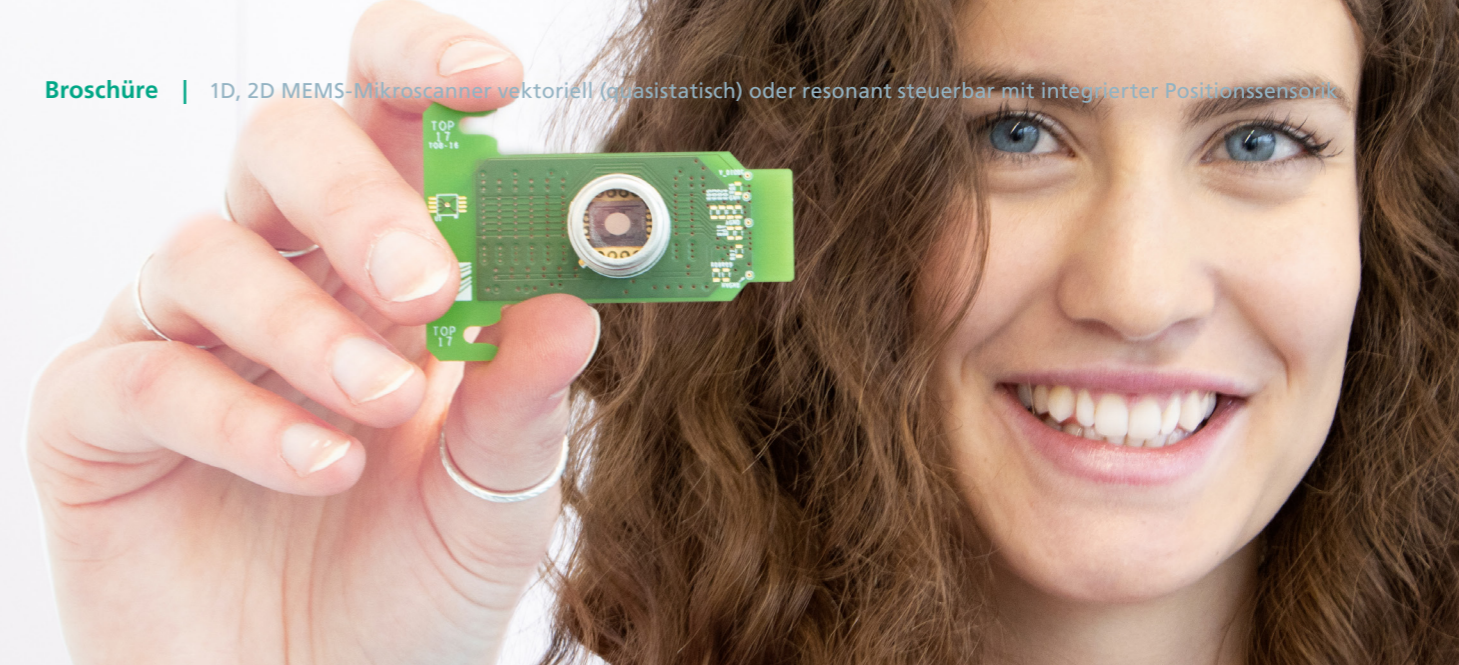
Alle 1D- und 2D-MEMS-Scanner besitzen eine Chip immanente monolithisch integrierte piezoresistive Positionsdetektion für jede vorhandene Torsionsachse. Diese werden über die Verschaltung einer Wheatstoneschen Messbrücke linearisiert und die Sensitivität erhöht, so dass die mechanischen Auslenkungen von Spiegel und Rahmenachse kontinuierlich messbar sind.

► Monolithisch integrierte Positionssensorik



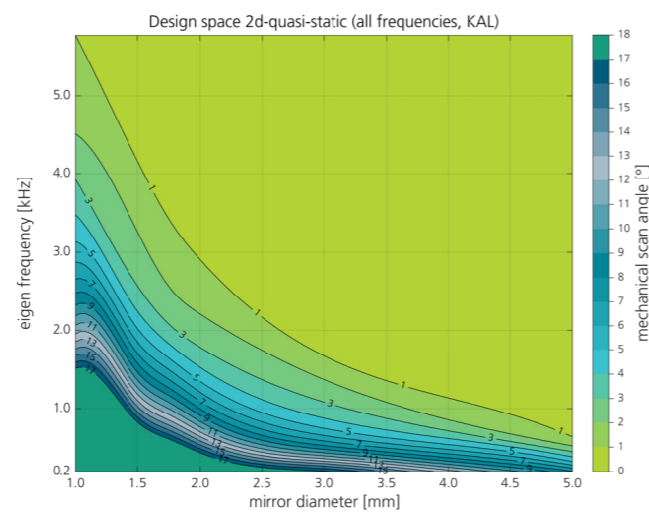


▲ Multilase-Bauelement

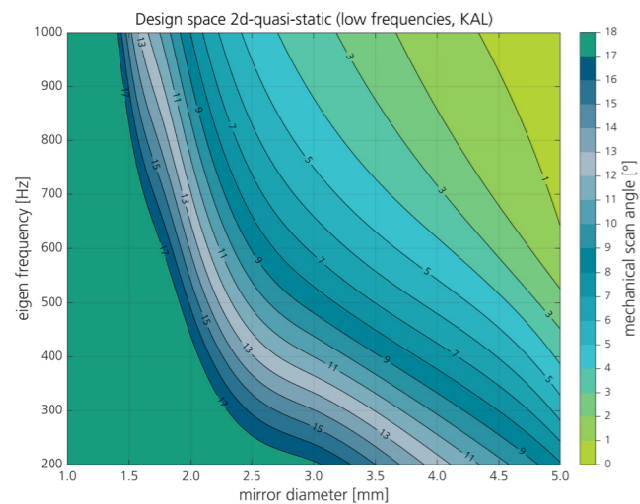


2D-Vektorscanner (nicht kardanisch)

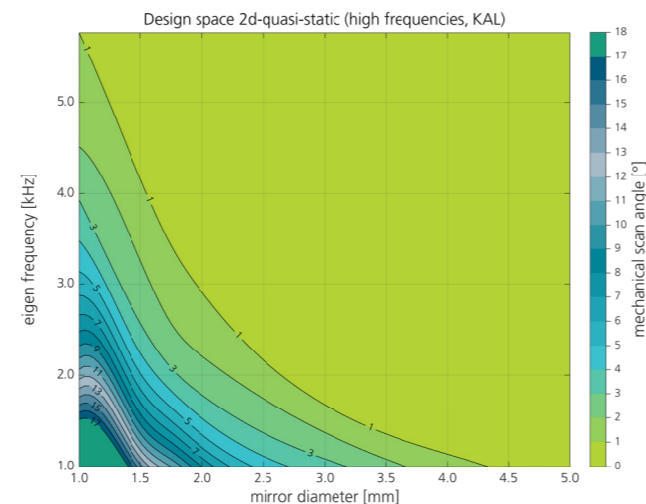
Neu in der Familie der Fraunhofer IPMS-Technologie AME75 basierten MEMS-Mikroscanner sind nicht kardanische vektorielle 2D-Scanner mit integrierter Positionssensorik. Auf der Grundlage von zwei bereits realisierten Designpunkten sind die unteren Designräume erstellt worden. Diese geben auf der Basis sinnvoll angenommener Parametereinschränkungen die Bereiche für Auslenkung, Eigenfrequenz und Spiegeldurchmesser an, in denen kundenspezifische Scannerdesigns definitiv erstellt und hergestellt werden können. Darüber hinaus sind andere hier nicht auffindbare Parameterkombinationen ebenfalls möglich, aber ob ein Design erstellt werden kann, muss dann im Rahmen einer Machbarkeitsstudie bewertet werden.



▲ Designraum mit konstanter Antriebskapazität



▲ Designraum für Eigenfrequenzen bis 1 kHz



▲ Designraum für Eigenfrequenzen von 1 kHz – 5 kHz

Evaluation Kits (kardanische Scanner)

Das Fraunhofer IPMS bietet verschiedene Evaluation Kits an, die es insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen ermöglichen, MEMS-Scannerbauelemente des Fraunhofer IPMS ohne die aufwendige Eigenentwicklung einer Ansteuerelektronik spezifikationsgemäß zu betreiben. Zusätzlich benötigt wird lediglich eine Stromversorgung sowie ein Computer, auf dem die bereitgestellte Ansteuersoftware laufen kann.

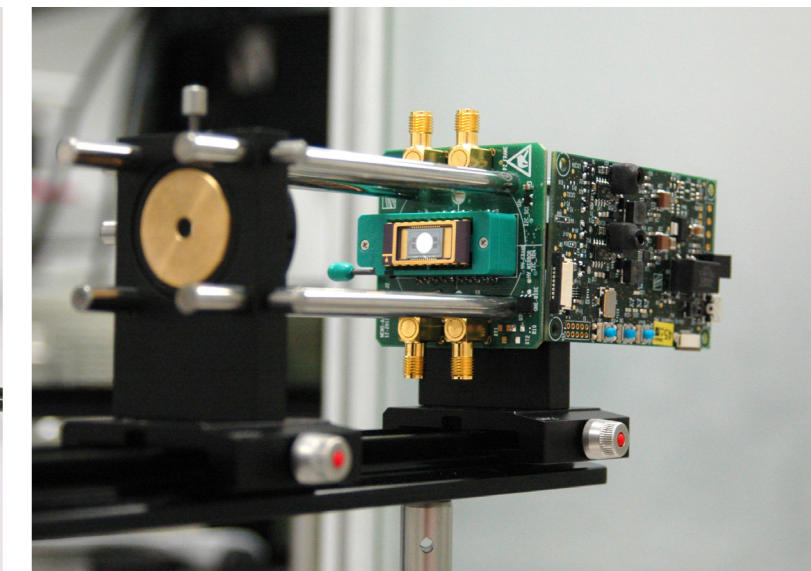
QSDrive Scan Kit für quasistatische MEMS

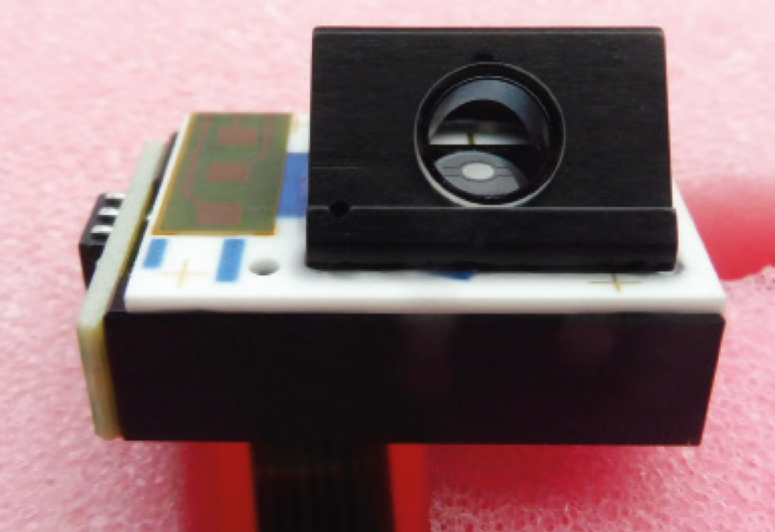
Das Evaluation-Kit »QSDrive Scan Kit« besteht aus einem ResoLin- Bauelement – einem kardanischen MEMS-Scanner mit einer linearen Achse und einer optionalen,

orthogonal orientierten resonanten Achse – sowie einer Ansteuerelektronik, die den Betrieb der Bauelemente mit einer mitgelieferten optimierten Trajektorie ermöglicht. Das Bauelement wird von einem ebenfalls im Lieferumfang enthaltenen Scankopf gehalten, der dank seiner speziellen Konstruktion leicht in gängige optische Versuchsaufbauten integriert werden kann. Je nach Ausführung des MEMS-Bauelements sind auch der geregelte Betrieb des Bauelements sowie ein synchronisierter Betrieb der resonanten Achse möglich. Die Funktionssteuerung erfolgt durch eine Software, die mit der Elektronik über USB kommuniziert.

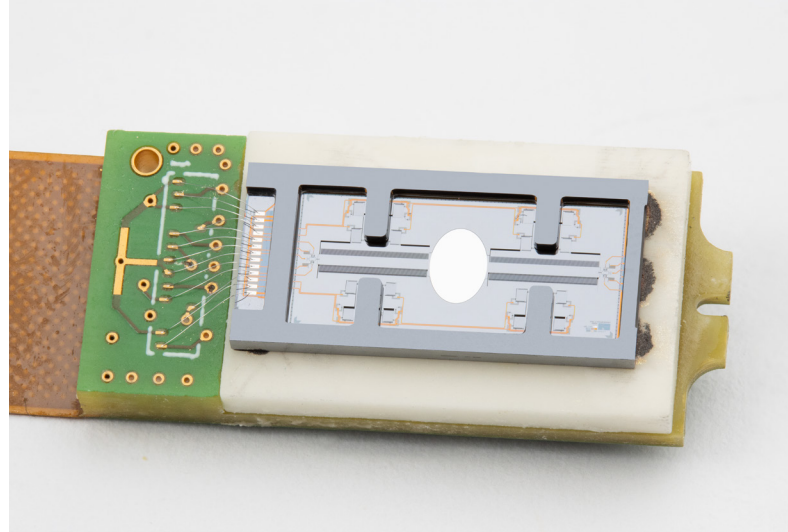
SiMeDri für resonante MEMS-Scanner

Das SiMeDri Evaluation Kit ist eine Antriebselektronik für die Ansteuerung von resonanten 1D- und 2D-Mikroscannerspiegeln. Es besteht aus einem Treiberboard und einem MEMS-Board, die direkt zusammengesteckt werden können.





▲ Scanmodul mit 1D resonanten Fraunhofer IPMS-Scanner, eingesetzt im Lichtblattmikroskop ZEISS Lightsheet 7



▲ Quasistatischer Scanner in einem Modul für Head-Mounted Displays

Anwendungsgebiete von MEMS-Mikroscannern

- Bildaufnahme z. B. für technische und medizinische Endoskope
- Konfokale Mikroskopie/OCT
- Fluoreszenzmikroskopie
- Strichcodelesen
- Objektvermessung/Triangulation
- 3D-Kameras, LIDAR
- Objekterkennung/1D- und 2D-Lichtvorhang
- Spektroskopie
- Lasermarkierung und Bearbeitung von Materialien
- Laserwellenlängenmodulation
- Laserprojektion/Display
- Lineares Scannen
- Optische Schwingungskompensation, z. B. handgeführtes Laserkraniotom
- Strahlpositionierung/Bahnverfolgung
- Materialmarkierung/Materialbearbeitung

Hervorragende mechanische und optische Eigenschaften

Alle mechanisch beanspruchten Elemente werden in einer einkristallinen Silizium-Funktionsschicht definiert und in einem volumenmikromechanischen Fertigungsprozess auf einem BSOI-Substrat gefertigt. Dieses Material zeichnet sich durch exzellente elastische und bruchmechanische Eigenschaften aus. Insbesondere treten aufgrund der Einkristallinität im Betrieb keine Ermüdungserscheinungen auf. Der Standardfertigungsprozess und der durch FEM-Simulationen begleitete Entwurfsprozess garantieren folgende Eigenschaften:

- Hohe mechanische Stabilität (> 2500 g Schockfestigkeit)
- Hohe statische Planarität (Krümmungsradius > 5 m)
- Hohe dynamische Planarität (typisch besser $\lambda / 20$)

Kontakt

Dr. Christine Ruffert
 Aktive Mikrooptische
 Komponenten und Systeme
 Business Development
 +49 355 69-4763
 christine.ruffert@
 ipms.fraunhofer.de

Dr. Ulrich Todt
 Aktive Mikrooptische
 Komponenten und Systeme
 +49 351 8823-134
 ulrich.todt@
 ipms.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS
 Maria-Reiche-Straße 2, 01109 Dresden
 www.ipms.fraunhofer.de