

Kompakte Einspiegel-Strahlableitung

T. Sidler¹, M. Hafez²

Laboratoire d'Optique Appliquée, EPFL, Lausanne, Schweiz

Zusammenfassung

Wir stellen einen kompakten Einspiegel 2D-Strahlableiter für Hochleistungs-Laser vor. Dieser Scanner ist für industrielle Anwendungen, wie zum Beispiel das hochpräzise Punktschweißen mit Lasern bis 5 kW Pulsleistung entwickelt worden. Er hat eine closed loop Bandbreite von typisch 700 Hz und über das ganze Scan-Feld eine maximale Stellzeit von weniger als 10 ms. Für eine nutzbare Spiegelfläche von (elliptisch) 30x40 mm² ist das Totalvolumen des Scanners nur 30x40x50 mm³ und das Gewicht nur 90g. Die maximalen Ablenkwinkel sind $\pm 3.5^\circ$ was bei einer Brennweite von 100 mm ein Scan-Feld von $\approx 10 \times 10$ mm² ergibt. Unter diesen Bedingungen kann mit einem Nd:YAG-Laser ein (beugungsbegrenzter) Spot-Durchmesser von weniger als 10 μm erreicht werden und eine Wiederholgenauigkeit von ungefähr 5 μm .

Schlagnworte: Strahlableitung, Tip-Tilt-Scanner, Materialbearbeitung.

1 Einleitung

Zweidimensionale Strahlableitung mit Galvanometer-Scannern ist ein gut etabliertes Gebiet mit vielen Anwendungen, sowohl zum Abtasten von Bildfeldern wie auch zum Bearbeiten, wie zum Beispiel Gravieren, Schweißen oder Schneiden. Das Ablenken von Hochleistungs-Lasern im kW-Bereich benötigt im

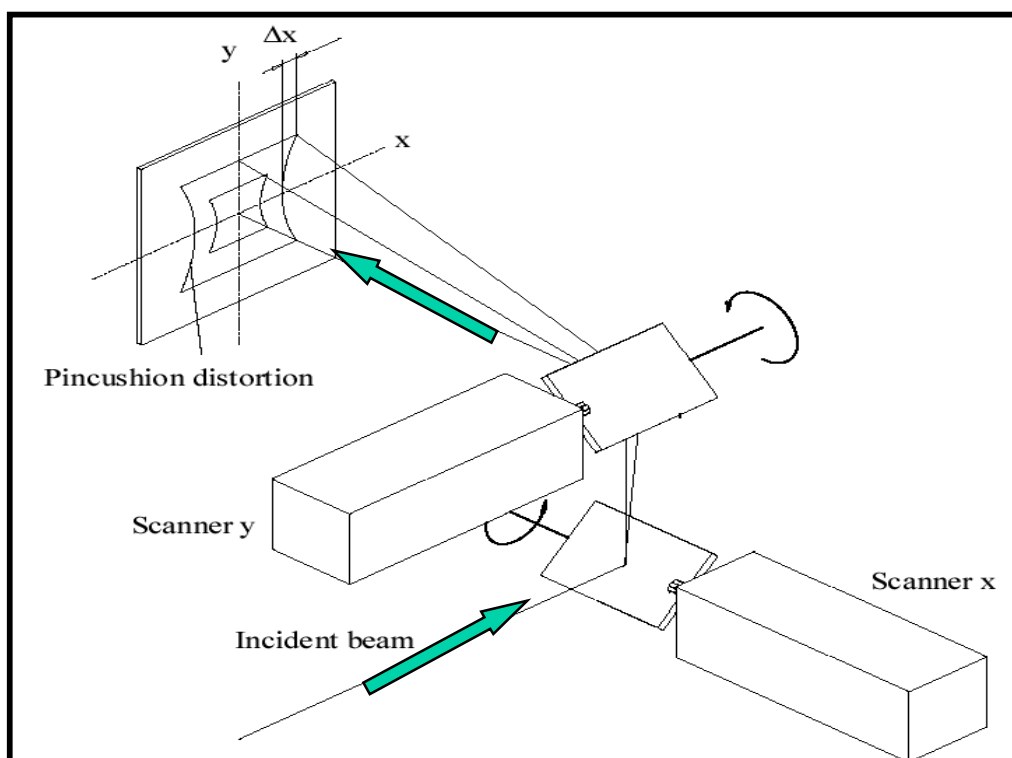
¹ Dr.T. Sidler:
Email: thomas.sidler@epfl.ch

² Dr. M. Hafez,
Email: HAFEZM@ZOE.CEA.FR ,

Allgemeinen relativ grosse Spiegeldurchmesser, da die Systeme mit Pre-Objektiv Scanning arbeiten und prozessbedingt sowohl hohe Auflösung wie auch grosse freie Arbeitsabstände erfordern. Unter diesen Bedingungen werden Systeme welche mit zwei Galvanometer-Scannern arbeiten, rasch ziemlich voluminös und langsam. Der Einsatz von Laser-Prozessen in industriellen Fertigungsstrassen bedingt ausserdem heutzutage hohe Flexibilität und minimalen Platzbedarf für die direkt eingesetzten Mittel. Der Einspiegel-Tip/Tilt-Scanner, welcher hier vorgestellt wird, ist genau für solche Anwendungen entwickelt worden. Sein sehr kleines Volumen von nur $30 \times 40 \times 50 \text{ mm}^3$, weniger als zwei Zigarrettenpackete, erlaubt zum Beispiel seine Verwendung in einem Hochleistungs-Laser Bearbeitungskopf, der nur 50 mm Tiefe benötigt (siehe Figur 16). Ausserdem kann dieser Einspiegel-Scanner auch vorteilhaft in optischen Geräten für Medizinanwendungen oder in der Mikroskopie verwendet werden.

2 Strahlableitung

2.1 Strahlableitung mit zwei Galvanometer-Scannern



Figur 1 Ablenkung mit zwei getrennten Galvanometer-Scannern und resultierende Verzerrungen.

Die Strahlableitung mit zwei Galvanometer-Scannern wird heutzutage industriell standardmässig genutzt. Ihre Nachteile sind ein relativ grosses Volumen und besonders der Umstand, dass die zwei Umlenkspiegel sich in verschiedenen

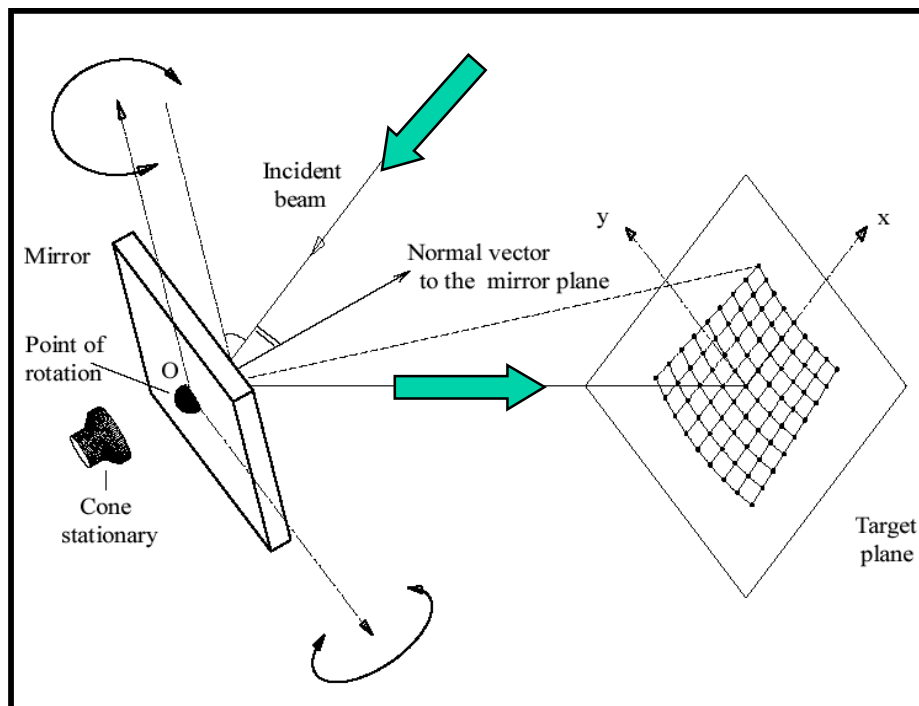
Ebenen befinden und somit zwei verschiedene Pupillen bilden. Das Fokussierobjektiv muss insofern diesen Gegebenheiten angepasst werden und kann gross und teuer werden (f - θ -Objektive). Dazu kommt noch, dass der zweite Spiegel eine grössere Oberfläche benötigt, da er ja schon von der ersten Ablenkung überstrichen wird.

2.2 Strahlableitung mit einem Einspiegel-Ablenker mit zwei Freiheitsgraden

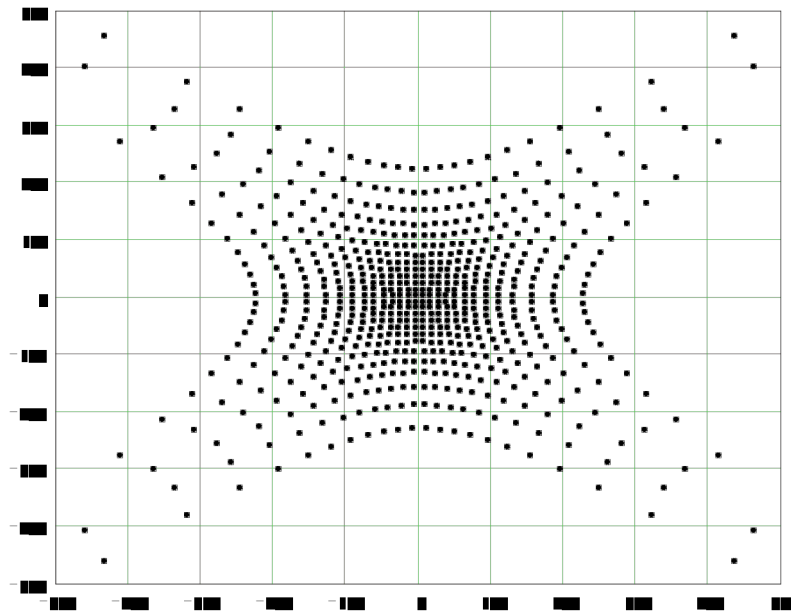
Der Einspiegel Ablenker mit zwei Freiheitsgraden hat den Vorteil, nur eine Pupille zu benötigen. Er kann ausserdem ein sehr gutes Verhältnis von Spiegeloberfläche zu Totalvolumen aufweisen. Der hier vorgestellte Einspiegel-Scanner ist ausserdem mechanisch extrem einfach aufgebaut, benötigt (ausser dem Spiegel selber) keine Präzisionsteile und kann ohne spezielle Präzisionsmassnahmen einfach zusammengebaut werden. Er hat somit die Möglichkeit einer relativ billigen industriellen Fabrikation.

Die Verzeichnungen in der Bildebene, welche ein solcher Einspiegel-Scanner erzeugt, können mathematisch genau berechnet werden [3], und, je nach Anwendung, per Computer beliebig genau kompensiert werden, oder annähernd mit Analogelektronik relativ schnell ausgegletzt werden.

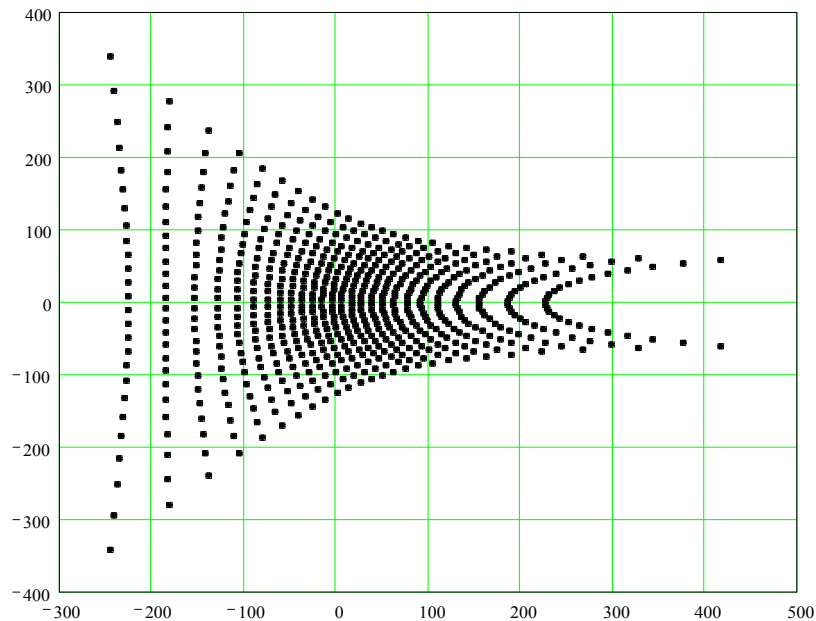
Betreffend die geometrischen Grundlagen, existiert eine Publikation welche die Probleme exakt löst [3]



Figur 2 Ablenkung mit dem Einspiegel-Scanner und resultierende Verzeichnungen.

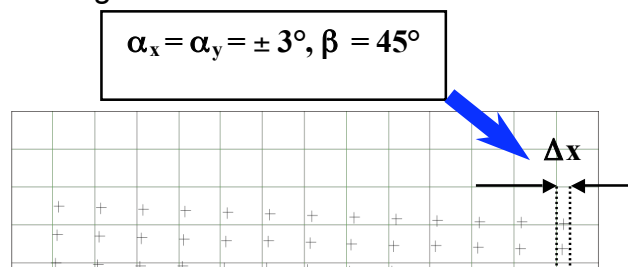


Figur 3 Verzeichnungen für $\beta = 90^\circ$, $\alpha_x = \pm 30^\circ$, $\alpha_y = \pm 30^\circ$, $D = 3.5 \text{ mm}$, $d = 120 \text{ mm}$.

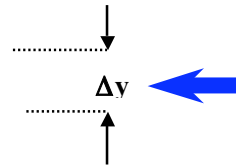


Figur 4 Verzeichnungen für $\beta = 45^\circ$, $\alpha_x = \pm 30^\circ$, $\alpha_y = \pm 30^\circ$, $D = 3.5 \text{ mm}$, $d = 120 \text{ mm}$.

Der Einfallswinkel β , das heisst der Winkel zwischen der Längsachse des Spiegels und der Einfallsrichtung des Strahles spielt die wichtigste Rolle betreffend der Verzeichnungen. Im oberen Bild fällt der Eingangsstrahl senkrecht auf den Spiegel, die Figur ist vollkommen symmetrisch, im unteren Bild fällt der Eingangsstrahl unter 45° auf die Spiegelfläche, was meistens der Normalfall für eine praktische Anwendung wäre.

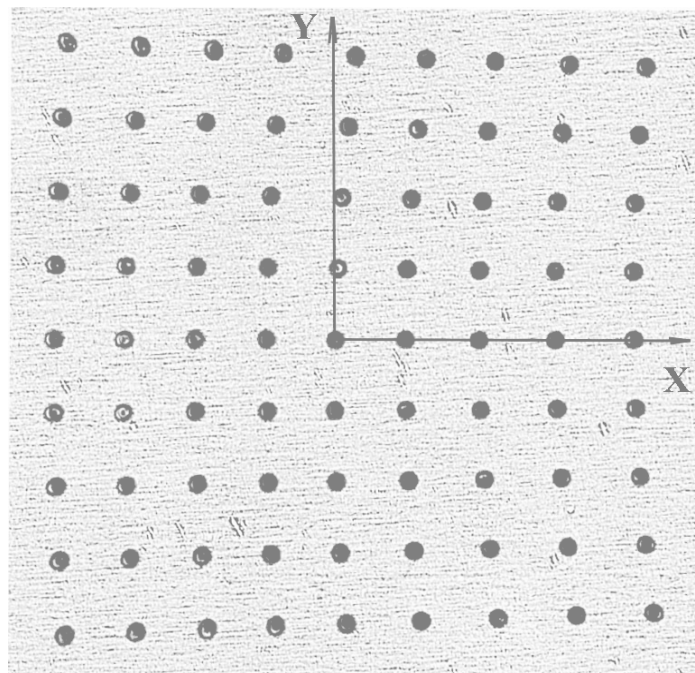


$\alpha_x = -3^\circ, \alpha_y = 3^\circ$



$\alpha_x = 0^\circ, \alpha_y = -3^\circ$

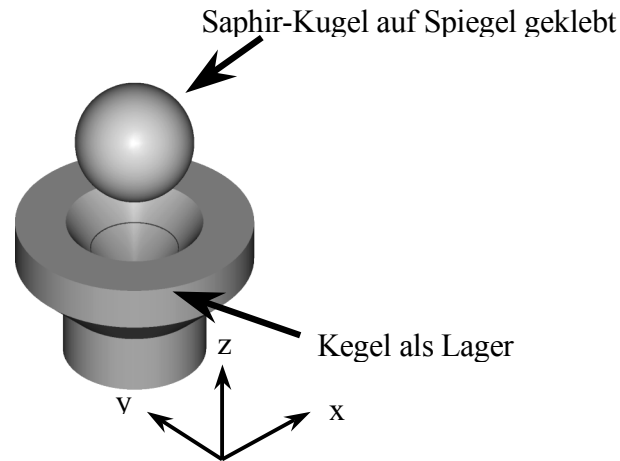
Figur 5 Berechnete Verzeichnungen in einem Ablenkbild von $\pm 3^\circ$,
D = 3.5 mm, d = 120 mm.



Figur 6 Experimentelle Bestätigung der obigen Berechnungen, es wurden
Blind-Schweisspunkte auf ein Stahlblech gesetzt.

3 Konstruktion

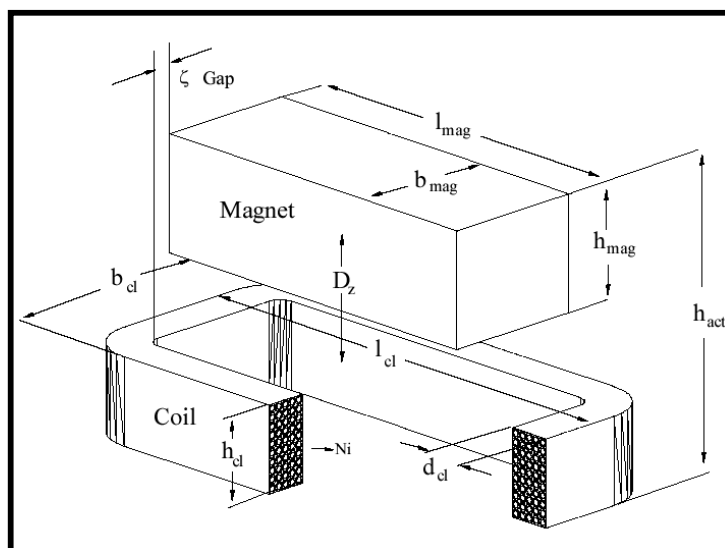
3.1 Lagerung des Scanners mittels Kugel in Konus



Figur 7 Scanner-Drehlager

Die Saphir-Halbkugel, auf die Rückseite des Spiegels geklebt, wird durch zwei Haltemagnete ins Lager gedrückt, wobei diese Haltemagnete auch die Drehposition um die Achse senkrecht zur Spiegelfläche fixieren. Die Haltekraft soll minimal sein, um die Lagerabnutzung möglichst klein zu halten.

3.2 Die Moving-Magnet Linear-Motoren



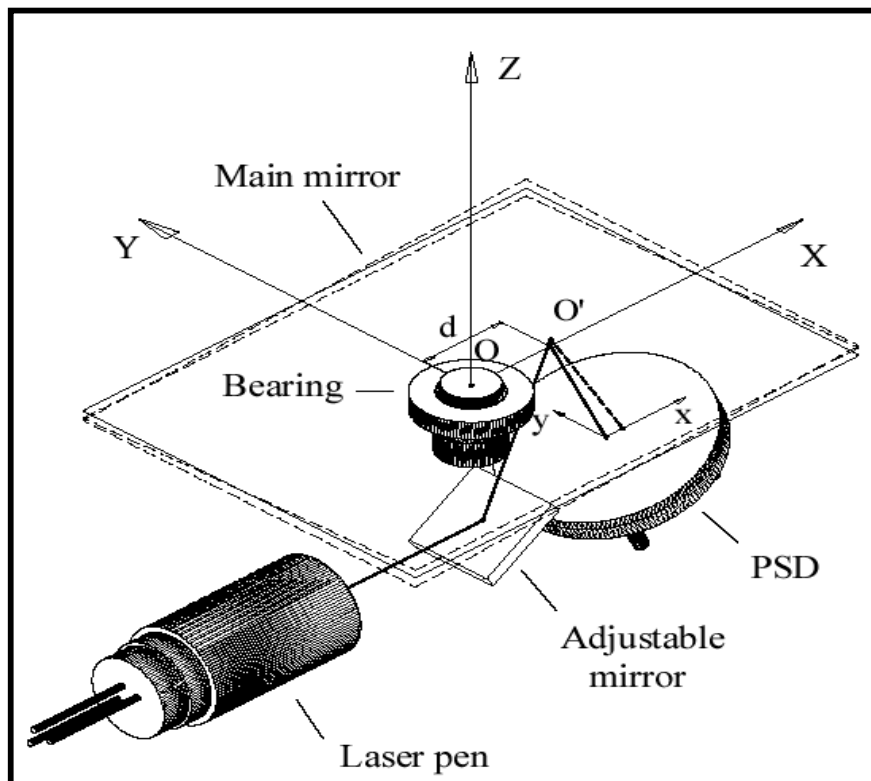
Magnet : $4 \times 5 \times 13 \text{ mm}^3$
 Spule: $3 \times 9 \times 17 \text{ mm}^3$
 Spulendicke: 1.5 mm

Figur 8 Optimierung der Moving-Magnet Linear-Motoren.

Der Spiegel wird durch Linear-Motoren bewegt welche aus auf den Spiegel geklebten Magneten und feststehenden Spulen bestehen. Dieses Prinzip erlaubt eine effiziente Minimalisierung der Trägheit des sich bewegenden Teiles (des Spiegels) und somit ein optimales dynamisches Verhalten.

3.3 Positionsbestimmung mittels PSD-Detektor

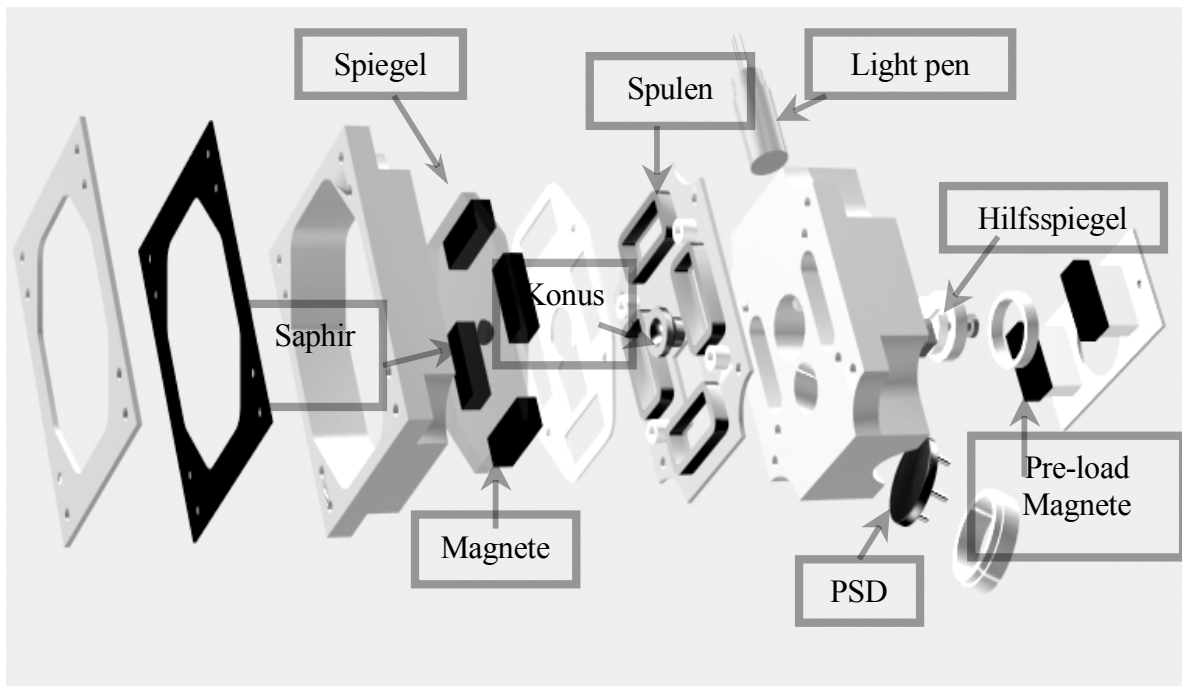
Die exakte Drehlage des Ablenkspiegels wird mittels einem Laser Light-Pen der auf der Spiegel-Rückfläche reflektiert wird und auf einen 2-dimensionalen PSD-Detektor fällt, bestimmt. Der PSD-Detektor ist ein optoelektronisches Element welches zwei Spannungssignale abgibt, welche proportional zu der x-Lage und der y-Lage sind.



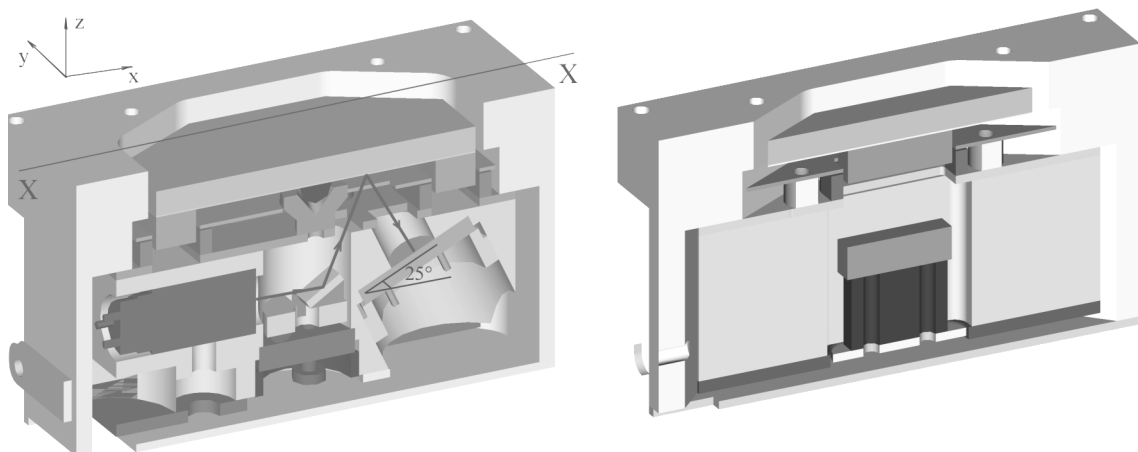
Figur 9 Schema des Positionssensors für die Spiegellage.

Diese optische Lagebestimmung des Ablenkspiegels muss natürlich sehr effizient gegenüber dem Laser-Nutzstrahl abgeschirmt werden, was erstens durch konstruktive Massnahmen (mechanische Blenden) und zweitens auch durch optische Filterung durchgeführt werden kann.

3.4 Mechanischer Aufbau



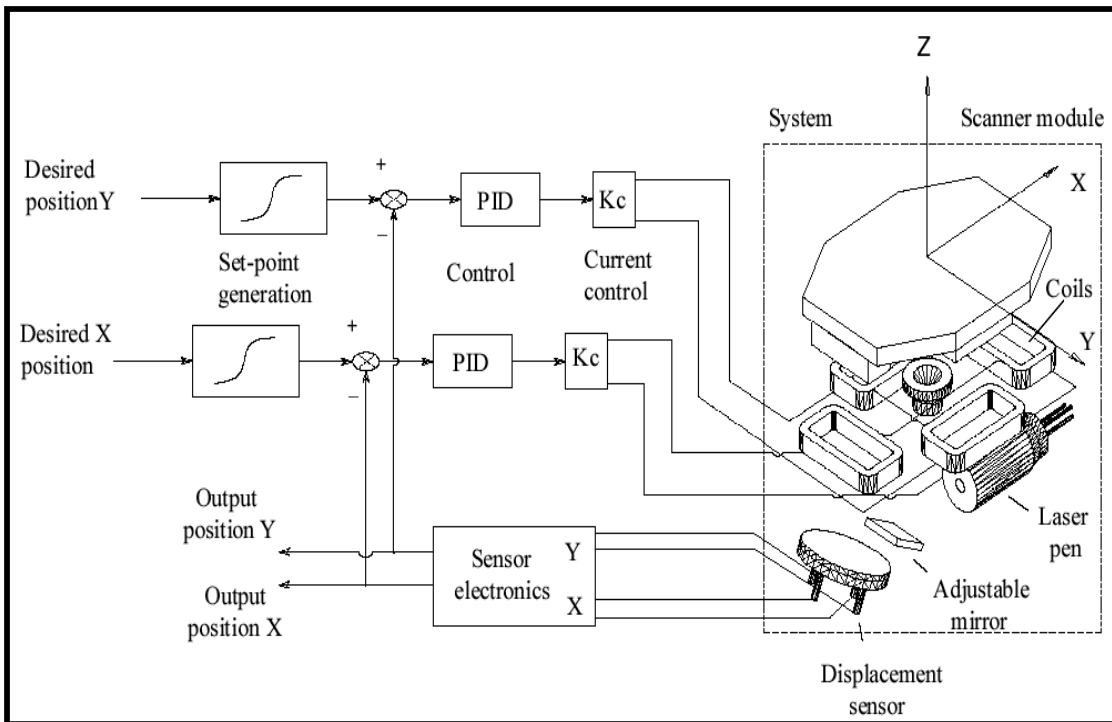
Figur 10 Detaillierter Aufbau des Scanners.



Figur 11 Querschnitt durch den Scanner, links durch das Zentrum, wobei der Light-Pen und der Strahlengang des Positions-Messsystemes sichtbar ist, rechts Querschnitt auf der Höhe eines Haltemagnetes.

4 Dynamisches Verhalten

4.1 Kontroll-Elektronik

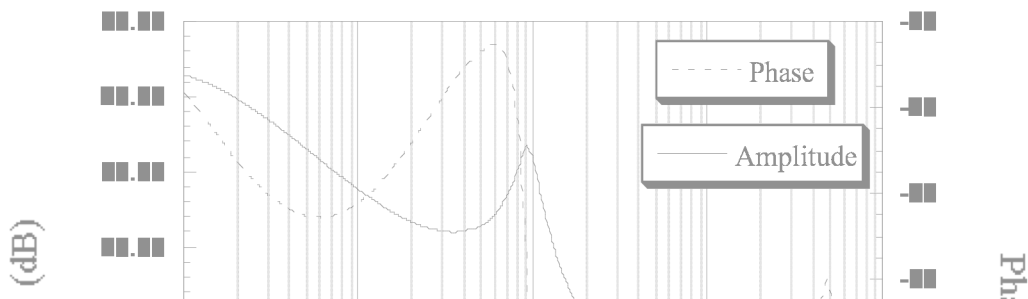


Figur 12 Block-Diagramm des gesamten Systemes

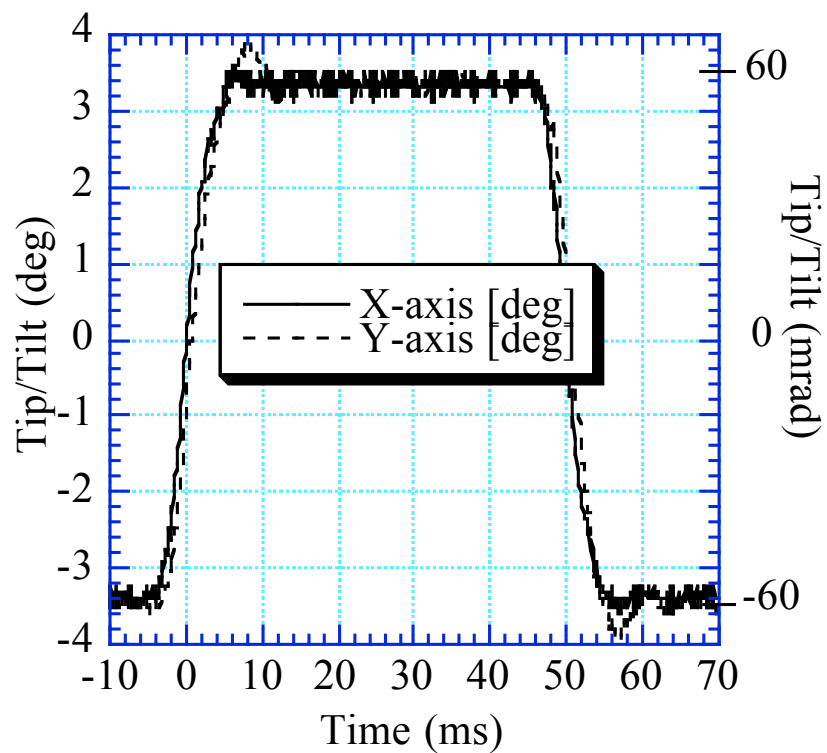
4.2 Dynamisches Verhalten

Beide Drehachsen werden über zwei geschlossene Regelkreise permanent kontrolliert. Das gesamte Regelverhalten ist sorgfältig ausgemessen und optimiert worden und ist charakterisiert durch die verschiedenen dynamischen Verhalten, wie das Open-loop Frequenzverhalten (OLFR), das closed-loop Frequenzverhalten (CLFR), sowie das Restfehler Frequenzverhalten (FEFR) [2].

Das dynamisch Verhalten des Scanners ist von ausschlaggebender Wichtigkeit für den Anwender. Parasitäre Resonanzen, verursacht zum Beispiel durch zu dünne und somit flexible Siegel, können das dynamische Verhalten komplett stören und eine zuverlässige schnelle Positionierungsregelung verunmöglichen. Die folgenden Figuren zeigen das Frequenzverhalten bei offenem Regelkreis (OLFR) sowie das Einschwingen nach einem Full-Scale Step (bei geschlossenem Regelkreis).



Figur 13 Experimentelle OLFR.



Figur 14 Step-response für einen Sprung von 7° (full-scale).

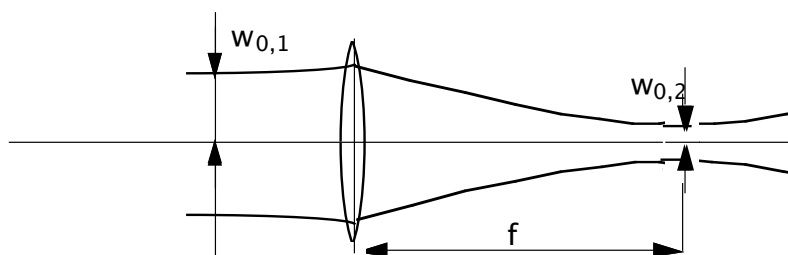
4.3 Spezifikationen

Gesamtvolumen	30 x40 x50 mm ³
Spiegelfläche	28 x 38 mm
Maximale Ablenkung	± 3.5 °
Gewicht	90 g
Reproduzierbarkeit	< 50 µrad, 0.08%
Auflösung	≈ 2.5 µrad, 0.004%
Stellzeit für max. Ablenkung	9 - 13 ms
Stellzeit für kleine. Ablenkung	6 ms
CL Bandbreite	700 Hz
OL Bandbreite	350 Hz
Maximale Winkelgeschwindigkeit	18 rad/s
x-y Uebersprechen	0.01 -0.3 %

Tabelle 1: Spezifikationen des Einspiegelscanners

5 Optiküberlegungen und Anwendungen

5.1 Laserstrahl-Ausbreitung

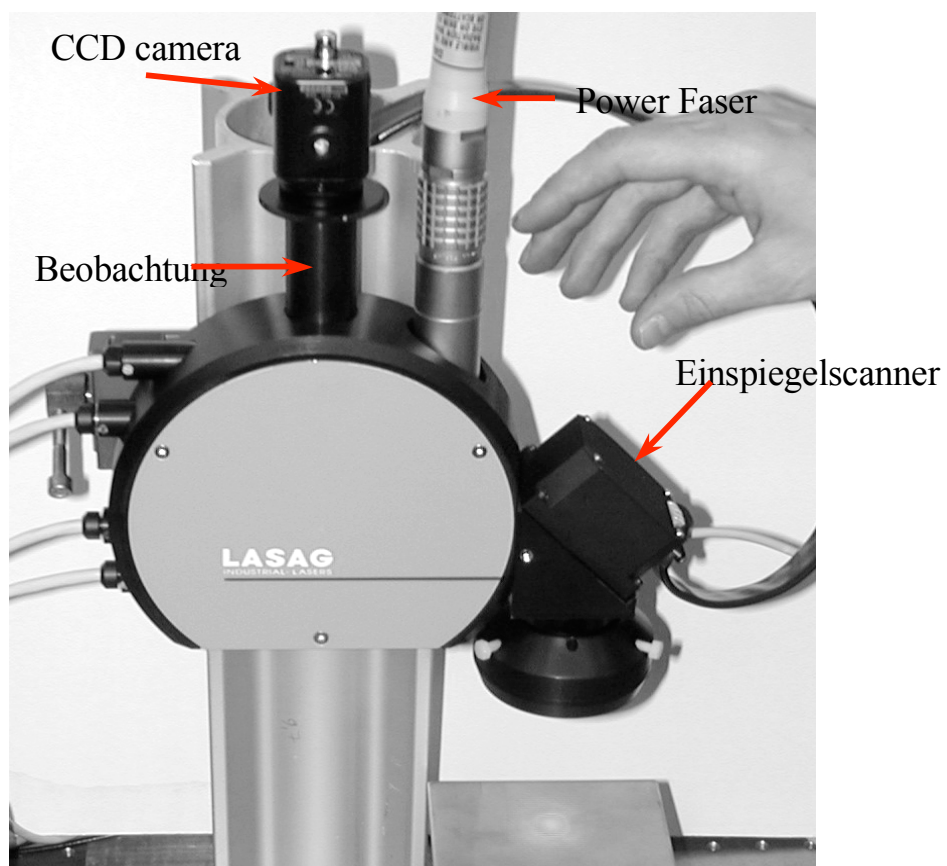


Figur 15 Ausbreitung und Fokussierung eines Gaus-Strahles von gegebener Strahlqualität M^2 .

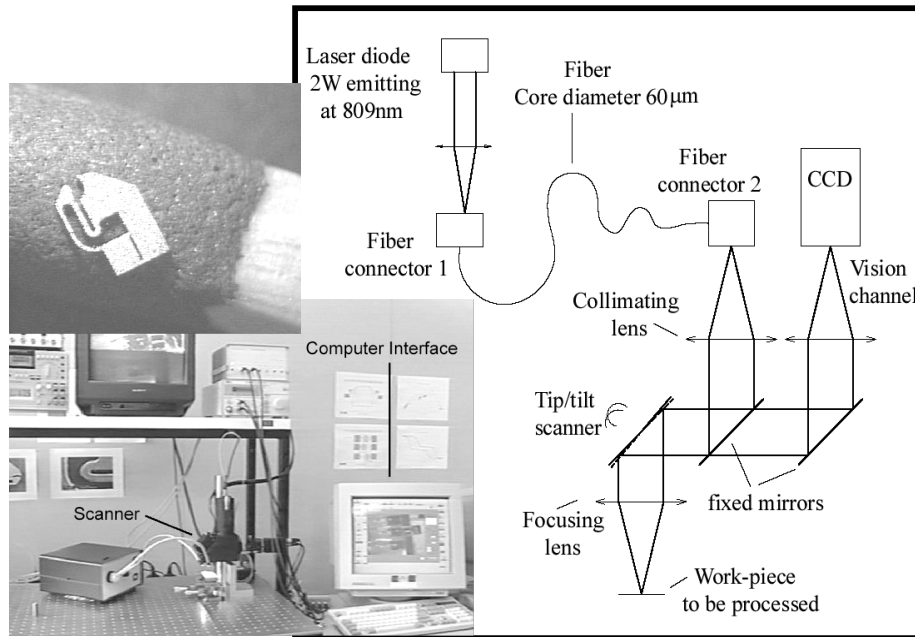
Der Strahldurchmesser im Fokus ist näherungsweise gegeben durch $w_{2,0} = M^2(1/w_{1,0})(\lambda f/\pi)$. Wenn wir nun einen nutzbaren Spiegeldurchmesser von 24 mm nehmen und unter den Voraussetzungen eines Grundmode-Laserstrahles von $M^2 = 1$ mit $w_{0,1} = 8$ mm und eines Fokussier-Objektives ohne Aberrationen mit der Brennweite $f = 100$ mm, ergibt sich somit ein Gauscher Fokussdurchmesser von $2w_{0,2} = 8.5$ µm (für einen Nd:YAG Laser bei Wellenlänge 1.064 µm).

Viele industrielle Scanner Anwendungen benützen jedoch obligatorisch einen Strahltransport mit optischer Faser. Dies bietet die Vorteile eines flexiblen Einsatzes mit abgesetztem Lasergerät und auch ein homogenes und reproduzierbares Flat-Top Strahlprofil (zum Beispiel für Laser Punktschweissen). In diesem Falle ist der Ablenkspiegeldurchmesser von grosser Wichtigkeit, um die Optik in vernünftigem Rahmen zu halten, ein kollimierter Strahldurchmesser von 22mm ist typisch für industrielle Anlagen. Die Fokussieroptik muss in diesem Falle nicht unbedingt beugungsbegrenzt sein und kann somit auf andere Parameter optimiert werden. So ist für diesen Scanner ein einfaches Fokussierobjektiv entwickelt worden, welches über das gesamte Scan-Feld eine gleichmässige Abbildung der optischen Faser ergibt.

5.2 Anwendungen



Figur 16 Kompakter Laser-Punktschweisskopf mit Faserzuführung und Sensoren zur Prozesscharakterisierung [4].



Figur 17 Computergesteuerte Laser-Wärmebehandlungsanlage für Gedächtnislegierungen (shape memory alloys) [5].

6 Literatur

- [1] M. Hafez, **Compact Fast-Steering Tip/Tilt Laser Scanner For High Power Material Processing Applications**, Doctoral thesis nr. 2247, EPFL, Lausanne, 2000.
- [2] M. Hafez, T. Sidler, R. P. Salathe, G. L. M. Jansen, J. C. Compter.; **Design, simulation and experimental investigations of a compact single mirror tip/tilt laser scanner**, Mechatronics 10,(2000), p741.
- [3] M. Hafez, T. Sidler, R. P. Salathe, **Study of the beam path distortion profiles generated by a two-axis tilt single mirror laser scanner**, Opt.. Eng., vol 42 nr, 4, p 1048-1057, 2003.
- [4] M. Hafez et al. **A compact multi-sensor laser scanning head for processing and monitoring micro-spot welding**, LPM 2000, Omiya, Tokyo, in Proc. SPIE, vol 4088, 2001.
- [5] M. Hafez, Y. Bellouard, T. Sidler, R. Clavel, R. P. Salathe, **Local annealing of shape memory alloys using laser scanning and computer vision**, LPM2000, Tokyo, in Proc. SPIE, vol 4088, p160-163, 2001.