

8.1 Light-Pens

Ein Light-Pen ist eine Einheit aus einer Laserdiode und einem abbildenden optischen System. Die stark divergente Strahlung der Laserdiode wird von der abbildenden Optik so umgeformt (kollimiert oder fokussiert), daß das austretende Strahlenbündel parallel, konvergent oder divergent ist.

Light-Pens können in vielen Fällen Laser ersetzen. Sie finden darüber hinaus eine Vielzahl neuartiger Anwendungen. Beispiele dafür sind:

- Laserbelichter der Druckindustrie,
- Scanner,
- Bar-Code-Leser,
- optische Datenspeicher,
- Längen-, Dicken- und Entfernungsmeßgeräte (Triangulation),
- Oberflächen-Untersuchungsgeräte,
- Präzisions-Lichtschranken,
- medizinische Geräte,
- Datenübertragung.

Kompakte, leichte, effiziente und preiswerte Alternative

Light-Pens zeichnen sich durch eine besonders kompakte Bauweise, geringes Gewicht und hohen Wirkungsgrad aus. Je nach den gestellten Qualitätsanforderungen sind Light-Pens oft eine preisgünstigere Alternative zu herkömmlichen Lasern.

In den letzten Jahren hat Rodenstock bereits viele kundenspezifische Light-Pen-Lösungen entwickelt und realisiert. Beispiele sind Light-Pens mit Astigmatismuskorrektur, kreisförmigem Austrittsstrahlenbündel, integriertem Sensor, Temperaturkompensation und Systemabstimmung (z. B. in bezug auf Farbfehler).

Zur Unterstützung der Kunden bei der Erarbeitung individueller Spezifikationen und insbesondere für Funktionsnachweise im Laborbetrieb wurde ein modular aufgebauter Light-Pen entwickelt, der in mehreren Versionen für unterschiedliche Spezifikationsanforderungen zur Verfügung steht.

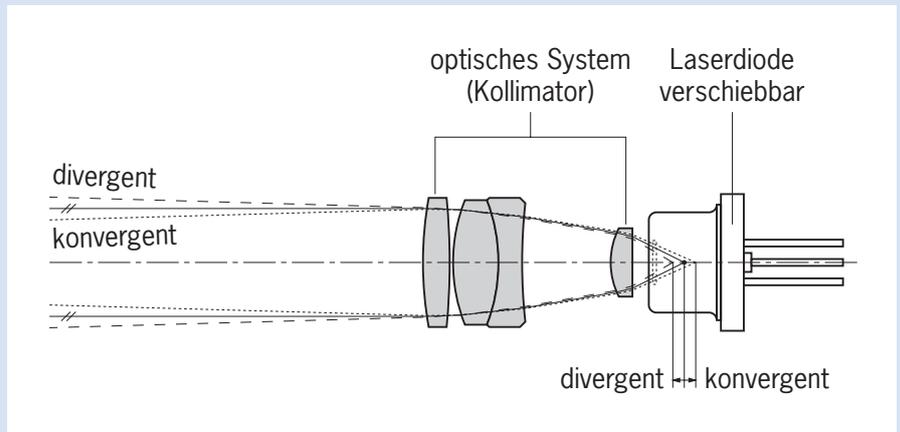


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines fokussierbaren Light-Pens. Je nach Abstand der Laserdiode zur Kollimatoroptik verläßt das Austrittsstrahlenbündel den Light-Pen divergent, parallel oder konvergent.

Spezifische Problematik von Laserdioden

Ein Light-Pen besteht in der einfachsten Form aus einer Laserdiode und einer kollimierenden Optik (→ Abb. 1).

Die unterschiedlichen Austrittsaperturen θ_{\parallel} (Theta parallel) und θ_{\perp} (Theta senkrecht) der Laserdiode führen bei maximaler Nutzung der Ausgangsleistung, d. h. bei geringstmöglicher Vignettierung des aus der Diode austretenden Strahlenkegels, zu elliptischem Strahlenbündelquerschnitt.

Im idealen Fall eines exakt kegelförmigen Austrittsbündels der Laserdiode liefert der Kollimator eine gleichmäßige Austrittsdivergenz. Der durch die Laserdiode in ein solches System eingebrachte Astigmatismus führt jedoch zu unterschiedlichen Divergenzen in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Schnittebenen.

Weitere spezielle Eigenschaften der Laserdioden, nämlich

- Temperaturverhalten,
- Wellenlängenänderungen und
- mechanische Toleranzen in der Lage der strahlenden Fläche,

machen darauf abgestimmte Justier- und Kompensationsverfahren nötig.

Der Empfindlichkeit der Laserdioden gegen Spannungsspitzen wird durch potentialfreie Anordnung (= Diode gegen Kollimator isoliert) begegnet.

Zwei Light-Pen-Serientypen für unterschiedliche Einsätze

Rodenstock bietet serienmäßig einen Light-Pen-Typ mit bereits exakt justierter, fest eingeklebter Laserdiode und einen zweiten, sehr preiswerten, flexibel einzusetzenden Typ mit wechsel- und fokussierbarer Laserdiode an.

Light-Pen mit fixierter Laserdiode

- Alle Komponenten sind untrennbar miteinander verbunden,
- der Light-Pen ist bereits präzise auf unendlich justiert,
- minimaler Schielwinkel ermöglicht Light-Pen-Austausch ohne Justage,
- die Diode ist nicht auswechselbar.

Diese Light-Pen-Version ist besonders leicht zu handhaben, liefert ohne Justage stets ein korrekt paralleles Ausgangsbündel, läßt aber nicht die Wahl beliebiger Laserdioden zu und gestattet bei einem Defekt der Laserdiode keinen Austausch.

Fokussierbarer Light-Pen

- Die einzelnen Komponenten und
- die Laserdiode sind austauschbar,
- das System ist farbkorrigiert.

Das vielseitige Angebot austauschbarer Komponenten macht die individuelle Anpassung an spezielle und bei Bedarf auch an geänderte Aufgabenstellungen möglich. Die Umrüstung ist einfach, da die Komponenten nur mit Schrauben fixiert sind.

Das reichhaltige Marktangebot an Laserdioden kann genutzt werden (Farbkorrektur im Wellenlängenbereich 580 ... 870 nm). Die Laserdiode läßt sich im Falle eines Defekts austauschen und ist ohne Werkzeug spielfrei auf 0,5 µm genau fokussierbar.

Kundenspezifische Lösungen statt Serienausführung

Der modular aufgebaute Light-Pen ist in erster Linie für Laborversuche (z. B. für Funktionsnachweise) und für Kleinserien vorgesehen. Aufgrund der damit gewonnenen Erfahrungen kann in der Zusammenarbeit mit den Spezialisten von Rodenstock eine optimale kundenspezifische Lösung erarbeitet werden. Dabei stehen mehrere Gesichtspunkte im Vordergrund.

Optisches Gesamtsystem

Bei der Anpassung an das optische Gesamtsystem werden folgende Kriterien besonders beachtet:

- Abstimmung der Farbfehler der einzelnen Komponenten,
- Berücksichtigung der Wellenlängenänderungen der Laserdiode bei Temperatureinwirkung,
- Austauschbarkeit des Light-Pens,
- Minimierung des Aufwandes für die einzelnen Komponenten im optischen Gesamtsystem,
- optimale Leistungsverteilung im austretenden Bündel,
- optimale Leistungsausbeute,
- beugungsbegrenzte Abbildung.

Mechanische Einbauverhältnisse

Die mechanische Ausführung, insbesondere die Gestaltung der Aufnahmeflächen, kann nach Kundenwunsch konstruiert werden. Zur Kühlung der

Laserdiode können wahlweise mechanische Kühlkörper integriert oder Anschlüsse für andere Kühleinrichtungen vorgesehen werden.

Dank dem bei Rodenstock entwickelten Montageverfahren ist die Potentialfreiheit der Laserdiode gegenüber dem Kollimator und damit auch gegenüber dem Kundengerät gewährleistet.

Preis-Leistungs-Verhältnis

Unter Berücksichtigung der geforderten Qualität kann beim kundenspezifischen Light-Pen eine minimale Komponentenzahl angestrebt werden. Bezüglich eines Gesamtsystems kann das sogar bedeuten, daß Spezifikationen einzelner anderer Komponenten weniger eng gefaßt werden müssen. Dadurch sind eventuell erhebliche Kosteneinsparungen möglich.

Auch Komplett-Baugruppen mit Light-Pen sind möglich

Rodenstock entwickelt und produziert nicht nur die Komponenten, sondern auch komplette Baugruppen.

Im Verbindung mit Light-Pens werden oft folgende Komponenten benötigt:

- Beam-Expander,
- Strahlenteiler,
- Umlenkeinheiten (wie Prismen, Spiegel, Polygonräder usw.),
- F-Theta-Objektive,
- Planfeldobjektive,
- Fokussierobjektive,
- astigmatisch wirkende Komponenten,
- Filter.

Vorteil einer Baugruppenentwicklung bei Rodenstock ist, daß die einzelnen Komponenten genau aufeinander abgestimmt sind.

Die Montage aller Baugruppen, die Justierung der Komponenten sowie die Baugruppenprüfung nach Kundenspezifikationen können ebenfalls von Rodenstock durchgeführt werden.

8.1.1 Fokussierbarer Light-Pen als Baukastensystem

Mit dem fokussierbaren Rodenstock-Light-Pen läßt sich der stark divergierende Strahlenkegel eines Diodenlasers zu einem einstellbar divergenten, konvergenten oder parallelen Strahlenbündel (Divergenz ab 0,16 mrad) von hoher Wellenfrontqualität umformen. Das modulare Konzept kommt besonders den Anforderungen in der Entwicklungs- und Prototypenphase entgegen. Ein günstiger Preis macht den fokussierbaren Light-Pen auch als OEM-Produkt interessant.

Die Austauschbarkeit der Laserdiode dieser Light-Pen-Version ermöglicht eine freie Wahl der Laserdiode zur Abstimmung auf die gewünschte Leistung, auf die elektrooptischen Eigenschaften und sogar auf die gewünschte Wellenlänge. Bei einem Defekt ist die Laserdiode problemlos ersetzbar. Kundenspezifisch ist die Laserdiodenaufnahme auch an andere Gehäuseformen als in Abb. 2 anpaßbar.

Nach jedem Wechsel der Laserdiode kann die axiale Toleranz der Diode (in Richtung der optischen Achse) mit einer Einstellgenauigkeit von besser als 0,5 µm ausgeglichen und so der Light-Pen optimal eingestellt werden.

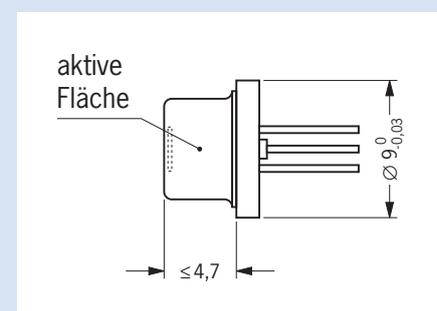


Abb. 2: Von der auswechselbaren Laserdiode einzuhaltende Abmessungen. Das Maß 4,7 mm darf überschritten werden, wenn vorsichtig fokussiert wird (weil dann der mechanische Endanschlag unwirksam ist – Beschädigungsgefahr bei Gewaltanwendung!).

8.1 Light-Pens (Fortsetzung)

Die Grundversion dieses modularen, fokussierbaren Light-Pens (→ Abb. 3) besteht aus einem hochwertigen vierlinsigen Kollimator, der Laserdioden-Halterung und der Fokussiermechanik.

Beugungsbegrenzte Abbildung

Der mehrschichtvergütete Kollimator bildet innerhalb seines Bildfeldes von $\pm 0,1$ mm (Toleranzbereich für die Zentrierung der Laserdiode zur optischen Achse des Kollimators) im Wellenlängenbereich von 580 ... 870 nm beugungsbegrenzt ab. Dies bedeutet, daß die geometrisch-optischen Abbildungsfehler wie z.B. sphärische Aberration oder Coma so gut korrigiert sind, daß sie praktisch keine Auswirkung auf die Abbildungsqualität haben. Die gute Übereinstimmung meßtechnischer Qualitätsuntersuchungen mit den rechnerischen Ergebnissen belegt die hohe Fertigungsqualität und die optimale Montage- und Justage-technologie.

Präzise, potentialfreie Halterung

Die präzise Laserdioden-Aufnahme gewährleistet eine sehr genaue Zentrierung der Laserdiode zur optischen Achse des Kollimators und damit geringe Schielwinkel von weniger als 10 mrad (= Abweichung des Laserstrahls von der Senkrechten zur mechanischen Basis [B] in Abb. 3).

Die elektrische Isolation der Dioden-Halterung sorgt bei vorschriftsmäßiger Light-Pen-Montage für Potentialfreiheit der spannungsempfindlichen Laserdiode auch zum Gerät.

Exakte, spielfreie Fokussierung

Zum optimalen Zusammenspiel von Optik und Mechanik trägt ferner die exakte Führungsmechanik mit Feingewinde und Geradföhrung bei. Sie ermöglicht das spielfreie Fokussieren der Laserdiode mit einer Einstellgenauigkeit von besser als $0,5 \mu\text{m}$ ohne Werkzeug und verhindert das Drehen der Laserdiode beim Fokussieren (wichtig bei Astigmatismuskorrektur und Strahlumformung).

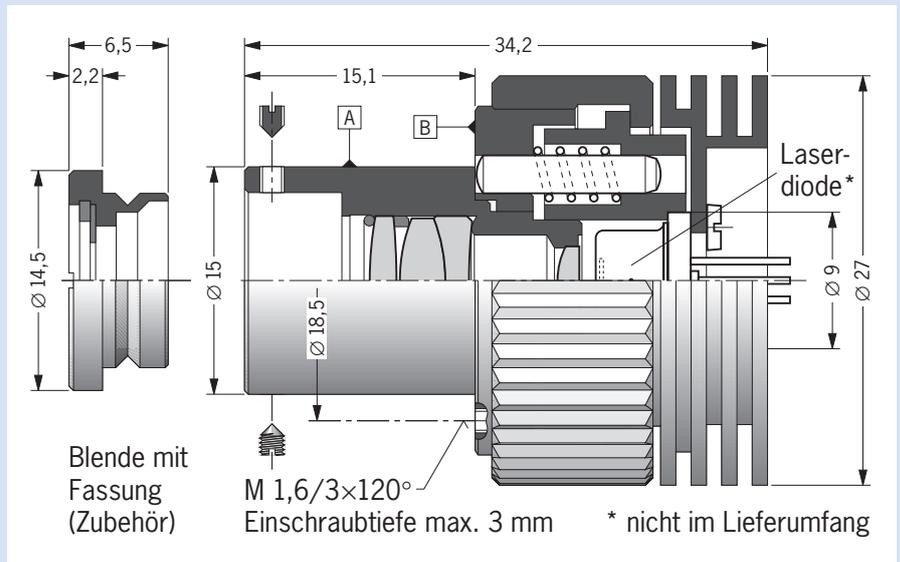


Abb. 3: Fokussierbarer Light-Pen mit auswechselbarer, potentialfrei gehaltener Laserdiode. Ein griffiger Einstellring gestattet das präzise, spielfreie Fokussieren (die Laserdiode dreht sich nicht!). Das umfangreiche Zubehörprogramm erlaubt vielseitige Einsatzmöglichkeiten.

Die Fokussierung ist nicht nur auf unendlich (= paralleles Strahlenbündel) möglich, sondern erlaubt in einem weiten Einstellbereich auch die Erzeugung eines divergenten oder konvergenten Strahlenbündels. Der bei konvergentem Bündel reelle Fokuspunkt kann einen minimalen Abstand von nur 50 mm erreichen. Die Abbildungsqualität ist dann zwar nicht mehr beugungsbegrenzt, oft aber noch hoch genug. Ein Vorteil ist, daß dafür keine Zusatzoptik nötig ist und die Spotanpassung kontinuierlich erfolgen kann.

Intensitätsverteilung im Bündel

Wie bereits eingangs als spezifische Problematik dargestellt, haben Laserdioden in zwei zueinander rechtwinkligen Hauptschnitten unterschiedliche Abstrahlungswinkel ($\theta_{||}$ und θ_{\perp}).

Da der Light-Pen für hohen Wirkungsgrad ein hochgeöffnetes Kollimatorobjektiv hat, wird der Bündelquerschnitt kaum vignettiert. Daher führen die unterschiedlichen Abstrahlungswinkel $\theta_{||}$ und θ_{\perp} zu stark elliptischer Intensitätsverteilung im Laserstrahlenbündel und beim Fokussieren auch im Spot zu elliptischem Intensitätsprofil.

In vielen Anwendungsfällen wird aber ein kreisförmiger Bündelquerschnitt benötigt, der durch zwei verschiedene Maßnahmen erzielt werden kann.

Runder Querschnitt mit Blenden

Am einfachsten läßt sich ein kreisförmiger Bündelquerschnitt, allerdings mit einem gewissen Leistungsverlust, durch Vorschalten einer kreisförmigen Blende erzielen. Rodenstock liefert als Zubehör einen Blendensatz aus drei Blenden mit den Durchmessern 6,3, 5 und 3,5 mm sowie einer auf den Light-Pen aufsteckbaren Fassung mit Blendenhalterung (→ Abb. 3).

Umformung mit Zylinderafokal

Bei höheren Ansprüchen, vor allem an eine hohe Intensität mit gleichmäßiger Verteilung, ist eine optische Umformung des Strahlenbündelquerschnitts möglich. Rodenstock verwendet hierzu anstelle des klassischen Prismenanamorphoten ein exakt gefertigtes und justiertes Zylinderlinsen-Afokal (Fernrohr). Dessen Vorteile liegen in der wesentlich kleineren Bauform, in einem zentrisch zur Fassung ein- und austretenden Laserstrahl und nicht zuletzt im günstigeren Preis.

Gegenüber der Querschnittsbegrenzung durch Blenden liefert die korrekt angepaßte optische Umformung, z. B. mit Zylinderafokal, neben höchstmöglichem Leistungswirkungsgrad eine annähernd rotationssymmetrische Intensitätsverteilung. Beim Fokussieren auf endliche Entfernung (mit nachgeschalteter Optik) ergibt sich dann auch ein kreisrunder Spot.

Rodenstock bietet im modularen System des fokussierbaren Light-Pens zwei Zylinderafokale an: mit 2facher (umgekehrt aufgesteckt 0,5facher) und 3facher (umgekehrt 0,33facher) Aufweitung des Strahlenbündels in einer Schnittebene. Je nach Orientierung und Drehung des Afokals kann damit ein Strahlenbündel von elliptischem Querschnitt in vierfacher Weise umgeformt werden (→ Abb. 4):

- a in ein (annähernd) kreisförmiges Bündel mit der großen oder
- b der kleinen Ellipsen-Halbachse als Radius oder
- c mit noch stärker gestreckter langer Halbachse oder
- d mit noch stärker gestauchter kurzer Halbachse.

Durch Kombination zweier Afokale ist z. B. 1,5fache (umgekehrt 0,67fache) oder 4fache (0,25fache) Vergrößerung erzielbar (Vignettierung möglich!).

Damit läßt sich für alle Anwendungsgebiete, in denen ein kreisförmiger Querschnitt des Laserstrahlenbündels gefordert wird, z. B. bei Leitstrahlwendungen auf größere Entfernungen zur Vermessung oder Justage, und für alle gängigen Laserdioden eine optimale Umformung erzielen. Ebenso kann in anderen Anwendungen, die einen stark elliptischen oder linienförmigen Spot erfordern, z. B. bei Barcode-Lesern, durch Einengung des Spots in der anderen Richtung die gewünschte Wirkung erzielt werden.

Die Rodenstock-Zylinderafokale beeinträchtigen nicht die Abbildungsqualität

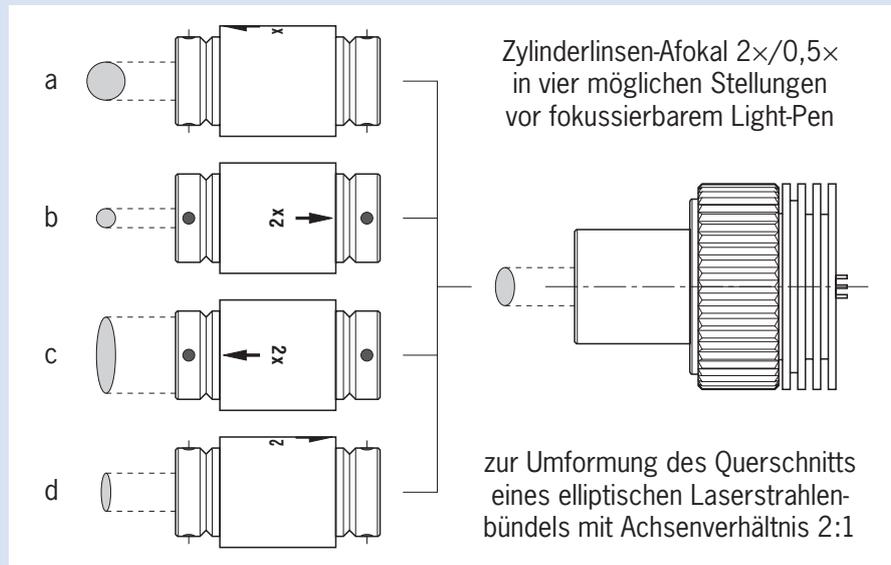


Abb. 4: Umformung des elliptischen Strahlenbündelquerschnitts (hier mit dem Achsenverhältnis 1:2) durch Vorschalten eines Zylinderlinsen-Afokals. Je nach Orientierung und Drehung ergeben sich unterschiedliche Austrittsbündelquerschnitte (zu a, b, c, d siehe linke Textspalte).

des Light-Pen-Kollimators. Das gilt sogar für die Farbfehler: Während die Querschnittsumformung mit Prismenanamorphoten wegen der spektralen

Dispersion optischer Gläser meist nur für eine bestimmte Wellenlänge möglich ist, ließen sich die Farbfehler beim Rodenstock-Zylinderafokal durch opti-

Systemübersicht des fokussierbaren Light-Pens

Optische Daten (Light-Pen-Grundversion)	Mechanische Daten (Light-Pen-Grundversion)
Brennweite = 9 mm Numerische Apertur = 0,4 max. Strahlenbündeldurchmesser = 7,2 mm Wellenfrontdeformation _{rms} ≤ 0,045 λ nahezu beugungsbegrenzte Abbildung Wellenlängenbereich 580... 870 nm	Schielwinkel ≤ 10 mrad Fassung aus Stahl Präzisions-Feingewinde zum Fokussieren mit 0,5 μm Einstellgenauigkeit Abmessungen → Abb. 3 Gewicht 50 g
Optische Daten (Zylinderafokal)	Mechanische Daten (Zylinderafokal)
Aufweitungsfaktor 2x/0,5x oder 3x/0,33x max. Strahlenbündeldurchmesser = 7,2 mm Wellenfrontdeformation _{rms} ≤ 0,045 λ Wellenlängenbereich 580... 870 nm	Fassung aus Stahl Abmessungen → Abb. 4 Gewicht 16 g bzw. 26 g
Bestellnummer	
Fokussierbarer Light-Pen (Grundversion)	1404-043-822-00
Blendensatz aus Fassung, Haltering und 3 Blenden Δ 3,5, 5 und 6,3 mm für Light-Pen-Ende (Kurzversion mit einseitiger Befestigung)	1404-043-828-00
Blendensatz wie oben für Einbau zwischen Komponenten (zweiseit. Befest.)	1404-043-833-00
Zylinderlinsen in Fassung zur Korrektur des Laserdioden-Astigmatismus mit astigmatischer Differenz von 12, 15, 20, 32 oder 40 μm	1404-043-823-00 ... -827-00
Zylinderafokal zur Bündelquerschnitts-Umformung (Aufweitung 2x/0,5x)	1404-043-830-00
Zylinderafokal zur Bündelquerschnitts-Umformung (Aufweitung 3x/0,33x)	1404-043-832-00
Adapterhülse zur Befestigung weiterer Komponenten nach Zylinderafokal	1404-043-829-00
Fokussierlinsen für Schnittweite < 250 mm mit	Brennweite 50 mm 1404-043-834-00 Brennweite 100 mm 1404-043-838-00 Brennweite 200 mm 1404-043-835-00
Zylinderlinse (f = 6,3 mm) für Linien-Spot in einstellbarer Entfernung	1404-043-836-00

8.1 Light-Pens (Fortsetzung)

male Konstruktion und Verwendung spezieller Gläser extrem reduzieren. Die beugungsbegrenzte Abbildungsqualität bleibt mit ein und demselben Zylinderfokal im gesamten Wellenlängenbereich 580 ... 870 nm erhalten.

Astigmatismuskorrektur

Der „Astigmatismus“ der Laserdiode ergibt sich aus den unterschiedlich tief unter der Abstrahlfläche liegenden Schnittpunkten des divergierenden Strahlenbündels für zwei rechtwinklig zueinander stehende Schnittebenen. Mit anderen Worten: Die aus der Laserdiode tretenden Strahlen scheinen je nach betrachteter Ebene von zwei verschiedenen Punktlichtquellen zu kommen. Diese astigmatische Differenz kann bei gewinngeführten („gain-guided“) Laserdioden eine nicht mehr vernachlässigbare Größe annehmen.

Rodenstock bietet zur Behebung des Astigmatismus Zylinderlinsen an, die eine astigmatische Differenz von 12, 15, 20, 32 oder 40 μm korrigieren. Sie werden in einer Fassung geliefert, die (wie die der vorschaltbaren Blenden) auf den Light-Pen gesteckt und über einen Adapter auch mit dem Zylinderfokal kombiniert werden kann. Eine Nut an der Zylinderlinsenfassung erleichtert die azimutale Lageorientierung zur korrekten Astigmatismuskorrektur: Die Nut ist senkrecht zur Ebene des PN-Übergangs der Laserdiode zu drehen; die Lage des PN-Übergangs ist den technischen Daten der Laserdiodenhersteller zu entnehmen.

Fokussierlinsen für kurze Distanz

Beim Fokussieren auf kurze Schnittweiten unter 250 mm kann die optische Qualität (Spotbild) mit Hilfe der lieferbaren Fokussierlinsen entscheidend verbessert werden. Rodenstock hat Fokussierlinsen für 50, 100 und 200 mm Schnittweite im Programm.

Weitere Unterlagen über Light-Pens können bei Rodenstock, Geschäftsfeld Industrieoptik, angefordert werden.

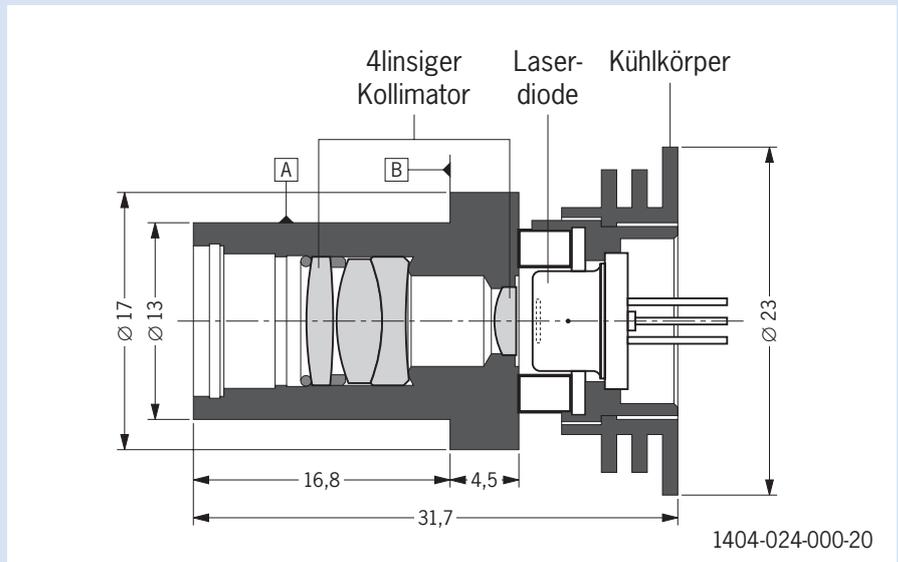


Abb. 5: Light-Pen-Grundversion mit 4linsiger Kollimatoroptik und fixierter Laserdiode. Breitbandige Farbkorrektur von 650 nm bis 830 nm ermöglicht den Einsatz verschiedener Laserdioden. Der maximale Austrittsbündeldurchmesser ist 7 mm; er kann abgeblendet werden.

8.1.2 Fix auf unendlich fokussierter modularer Light-Pen

Der von Rodenstock für Laborzwecke entwickelte, präzise auf unendlich justierte Light-Pen mit fest eingeklebter Laserdiode besitzt zwar auch einen gewissen modularen Aufbau, der eine werkseitige Abstimmung auf unterschiedliche Anwenderforderungen ermöglicht. Aber er kann weder anders als auf unendlich fokussiert, noch nachträglich in eine andere Version umgebaut werden. Sein Vorteil liegt in besonders einfacher Handhabung und Kompaktheit.

Dieser Light-Pen enthält als Basisteil einen hochwertigen vierlinsigen Kollimator mit folgenden Daten:

- numerische Apertur = 0,4,
- Brennweite = 9 mm,
- farbkorrigiert für 650 ... 830 nm,
- Wellenfrontdeformation_{rms} $\leq 0,045\lambda$,
- minimaler Schielwinkel $\leq 0,5$ mrad.

Dank der breitbandigen Farbkorrektur des optischen Systems können so gut wie alle gängigen Laserdioden

mit diesem Kollimator zu einem Light-Pen komplettiert werden. In der Regel werden die Laserdioden vom Kunden ausgewählt und an Rodenstock zum Einbau (mit exakter Justage) geliefert.

Damit die kompakte Bauweise des Light-Pens als Vorteil gegenüber anderen Laser-Lichtquellen nicht nur im optischen Aufbau, sondern auch in den Befestigungsmöglichkeiten erhalten bleibt, wurde der für leistungsstarke Laserdioden erforderliche Kühlkörper abnehmbar ausgeführt.

Der Light-Pen sollte an den in Abb. 5 mit [A] und [B] gekennzeichneten Flächen aufgenommen und mit einem Überwurfring gehalten werden, weil die Justage bei Rodenstock relativ zu den Flächen [A] und [B] erfolgt und bei diesem Einbau die Potentialfreiheit der Laserdiode relativ zur Kollimatorfassung erhalten bleibt.

Grundversion des Light-Pens

Der Light-Pen mit fixierter Laserdiode besteht in der Grundversion (\rightarrow Abb. 5) aus dem beschriebenen Kollimator, der Laserdiode und dem abnehmbaren Kühlkörper.

Der maximale Durchmesser des Austrittsbündels von 7 mm kann mit Standardblenden von 5, 4,5 oder 4 mm Durchmesser abgeblendet werden. Je nach Apertur der verwendeten Laserdiode tritt dabei ein mehr oder weniger großer Leistungsverlust auf.

Astigmatismuskorrektur

Wenn der Astigmatismus der Laserdiode stört, kann der Light-Pen in einer Version mit einer entsprechenden fest eingebauten Zylinderlinse zur Astigmatismuskorrektur geliefert werden (→ Abb. 6). Die obengenannten Blenden sind auch bei diesem Light-Pen einsetzbar, wenn der dadurch bewirkte Leistungsverlust in Kauf genommen werden kann.

Kreisförmiger Bündelquerschnitt

Wie schon beim fokussierbaren Light-Pen dargestellt, ist die Austrittsapertur der Laserdiode nicht rotations-symmetrisch und der Querschnitt des Light-Pen-Austrittsbündels deshalb zunächst elliptisch. Auch beim Light-Pen mit fixierter Laserdiode kann der elliptische Querschnitt durch einen – hier fest eingebauten – Zylinderlinsen-Korrekturvorsatz ohne die durch Blenden entstehenden Leistungsverluste

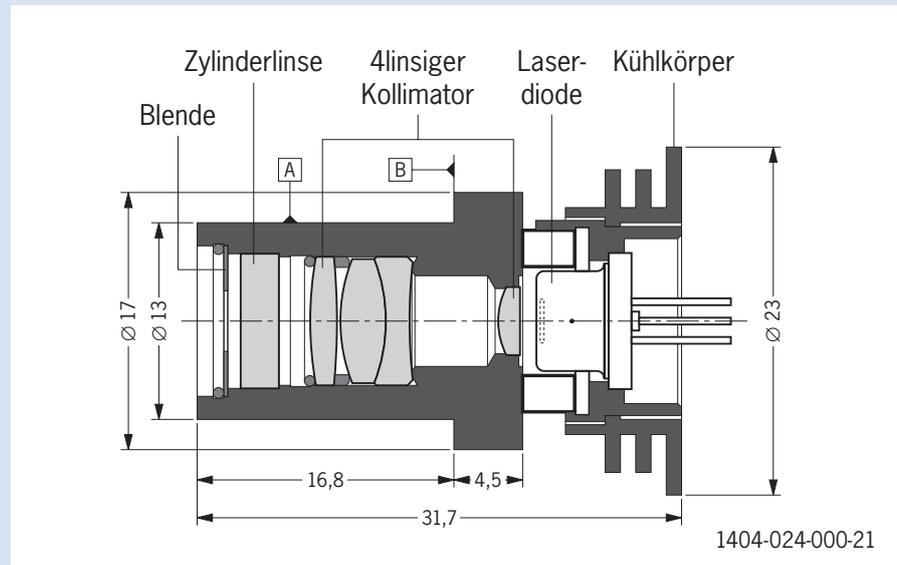


Abb. 6: Light-Pen mit fixierter Laserdiode und Zylinderlinse zur Astigmatismuskorrektur für minimale Divergenz des austretenden Strahlenbündels in beiden Schnittebenen. Der abgebildete Light-Pen ist ferner mit einer Blende zur Begrenzung des Bündelquerschnitts ausgestattet.

kreisförmig gemacht oder zumindest der Kreisform stark angenähert werden (→ Abb. 7). Der Korrekturvorsatz ist nicht nachrüstbar.

Die Umformung mit Zylinderlinsen verhindert den Versatz der optischen Achse, wie er bei Prismenanamorphoten entsteht. Außerdem kann mit den

Zylinderlinsen auch der Astigmatismus der Laserdiode behoben werden.

Entsprechend den Abstrahlwinkeln $\theta_{||}$ und θ_{\perp} der gegenwärtig verfügbaren Laserdioden ist der Light-Pen in dieser Version mit justiertem Zylinderlinsen-Korrektursystem für die Achsenverhältnisse 1:2 und 1:3 lieferbar.

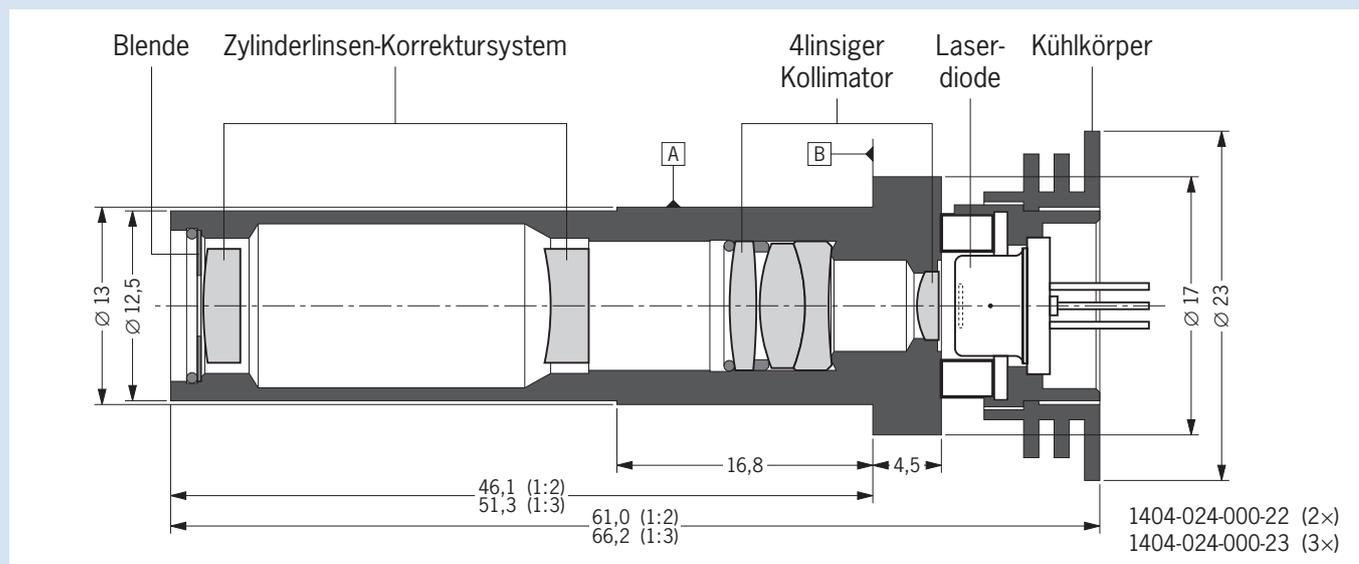


Abb. 7: Light-Pen mit fixierter Laserdiode und Zylinderlinsen zur Annäherung des Austrittsstrahlenbündel-Querschnitts an die Kreisform und zugleich zur Astigmatismuskorrektur. Die verschiedenen angegebenen Längen ergeben sich je nach dem zu korrigierenden Achsenverhältnis 1:2 oder 1:3 im Bündelquerschnitt.

8.2 Beam-Expander

Ein Beam-Expander ist ein afokales optisches System aus mindestens zwei optischen Gliedern. Er dient primär zur Aufweitung des Querschnitts paralleler Strahlenbündel, beispielsweise von Lasern. Die Strahlendivergenz (= Abweichung von der idealen Parallelität) verhält sich dabei umgekehrt proportional zum Aufweitungsfaktor. Daher vermindert der Beam-Expander außerdem die Strahlendivergenz. Im Aufbau entspricht der Beam-Expander einem umgekehrt eingesetzten Fernrohr (→ Abb. 1); der Aufweitungsfaktor entspricht dem Fernrohr-Vergrößerungsverhältnis Γ' .

Zwei Bauprinzipien: nach Galilei und nach Kepler

Beam-Expander können sowohl nach dem galileischen als auch nach dem keplerschen Prinzip aufgebaut sein.

- Beim **galileischen Prinzip** tritt das Strahlenbündel erst durch ein negatives Glied, wird dadurch divergent, und gelangt dann (aufgeweitet) durch ein positives Glied, von dem es wieder parallelgerichtet wird. Die Brennpunkte F_1' der negativen und F_2 der positiven Linse(ngruppe) müssen zusammenfallen. Der Abstand zwischen beiden Linsen(gruppen) errechnet sich aus der Differenz der Brennweiten-Absolutbeträge. Das galileische Prinzip ergibt daher eine kurze Baulänge.

- Beim **keplerschen Prinzip** dagegen haben beide Glieder eine positive Brechkraft. Zwischen beiden Gliedern ergibt sich ein reeller Brennpunkt F_1' ($= F_2$), und es findet eine Bildumkehrung statt. Die Baulänge resultiert aus der Summe beider Brennweiten.

Am Brennpunkt zwischen beiden Gliedern bildet das Bündel eine extrem enge Taille, so daß es dort zu einer hohen Strahldichte kommt. Dies kann bei Anwendungen mit sehr hoher Leistung (z. B. in der Materialbearbeitung) wegen der starken Hitzeentwicklung problematisch werden.

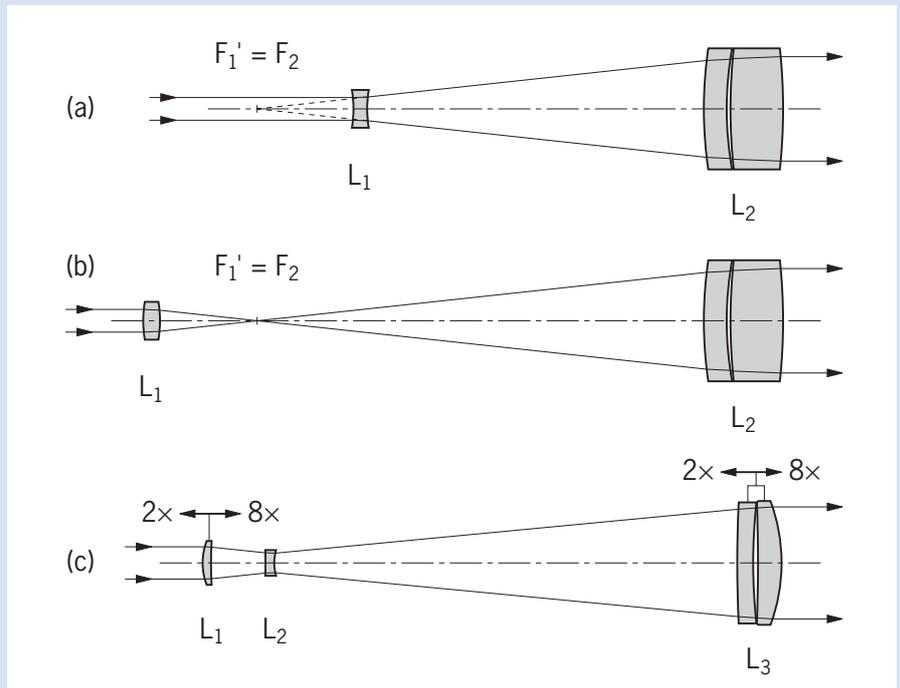


Abb. 1: Aufbau eines Beam-Expanders nach dem Prinzip des galileischen (a) und des keplerschen Fernrohrs (b). Das galileische Prinzip führt zu einer kürzeren Baulänge und ist daher weiter verbreitet. Das keplersche Prinzip kehrt das Bild um und liefert einen reellen Brennpunkt F_1' , was bei manchen Anwendungen zu beachten ist. Die Vario-Beam-Expander von Rodenstock (c) entsprechen weitgehend dem galileischen Prinzip, haben aber nach der ersten bis zur zweiten Linse einen konvergenten Strahlengang wie beim keplerschen Prinzip.

Anwendungsbereiche des Beam-Expanders

Beam-Expander werden häufig in Verbindung mit Gas- oder Festkörperlaser eingesetzt, um das austretende Strahlenbündel im gewünschten Maße aufzuweiten. Bei manchen Anwendungen kann im Vordergrund stehen, die Strahlendivergenz zu vermindern.

Mit einem entsprechend ausgelegten Beam-Expander lassen sich in einem optischen System darüber hinaus auch Fokussierung, Temperaturkompensation sowie – bei modifizierter Bauart – auch Formänderungen des Strahlenbündelquerschnitts erreichen.

Ein besonders wichtiges Einsatzgebiet sind **Laser-Scanner**, die mit einem HeNe-Laser als Strahlenquelle arbeiten (→ Abb. 2). Das Strahlenbün-

del des Lasers wird von einem Beam-Expander aufgeweitet, dann mit einer Umlenkeinheit (z. B. einem Polygonrad oder Galvospiegel) abgelenkt und mit einem oder mehreren Objektiven auf die Bild-(Scan-)Ebene fokussiert. Die Aufweitung hat dabei den Sinn, die Eintrittspupille des fokussierenden Objektivs mit dem Strahlenbündel möglichst vollständig auszufüllen, um die Beugung zu minimieren und beste Punktbildqualität zu erzielen.

Werden im optischen System **Laserdioden** als Strahlenquelle benutzt, sind Beam-Expander im allgemeinen einem Kollimator nachgeschaltet, der das divergente Austrittsbündel der Laserdiode parallel ausrichtet. Der Kollimator kann bei hohen Qualitätsansprüchen Korrektur Elemente enthalten, z.B. zur Behebung des Laserdioden-Astigmatismus, zur Annäherung

eines elliptischen Bündelquerschnitts an die Kreisform, zur Temperaturkompensation sowie zur Systemabstimmung (→ Kapitel 8.1). Es ist aber auch möglich, **Korrektur Elemente** (Bündelquerschnittsformung mit Zylinderfokal → Seite 8.2.4) im Beam-Expander zu integrieren.

Werden in optischen Systemen zur **Laser-Materialbearbeitung** (oder Beschriftung) Beam-Expander mit variablem Aufweitungsfaktor eingesetzt, kann durch Änderung des Bündelquerschnitts vor der Pupille des fokussierenden Objektivs der **Wärmebedarf** zur Anpassung an die zu bearbeitenden Materialien gesteuert werden.

Bei Kombination mit **Hochleistungs-Lasern** liegt ein weiterer Vorteil der Bündelquerschnitts-Aufweitung in der geringeren **thermische Belastung** des folgenden optischen Systems.

Die typischen Eigenschaften des Beam-Expanders

Wenn zur Lösung einer bestimmten Aufgabe ein Beam-Expander benötigt wird, sind die im folgenden genannten optischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Von den Anforderungen an diese Eigenschaften hängt ab, ob serienmäßige Beam-Expander eingesetzt werden können (→ tabellarische Übersicht auf Seite 8.2.4) oder ob dafür spezielle Entwicklungen kostengünstiger oder gar nötig sind.

Bauprinzip: Das optische Bauprinzip (nach Galilei oder nach Kepler) ist vor allem für die Baulänge entscheidend. Ob daneben die Bildumkehrung und die Existenz eines reellen Brennpunktes (mögliche Hitzeentwicklung!) beim keplerschen Typ eine Rolle spielen, hängt von der Anwendung ab.

Farbkorrektur: Dadurch wird festgelegt, für welche Wellenlänge – und damit zugleich, für welche Laserart – sich der Beam-Expander einsetzen läßt. Rodenstock liefert serienmäßig

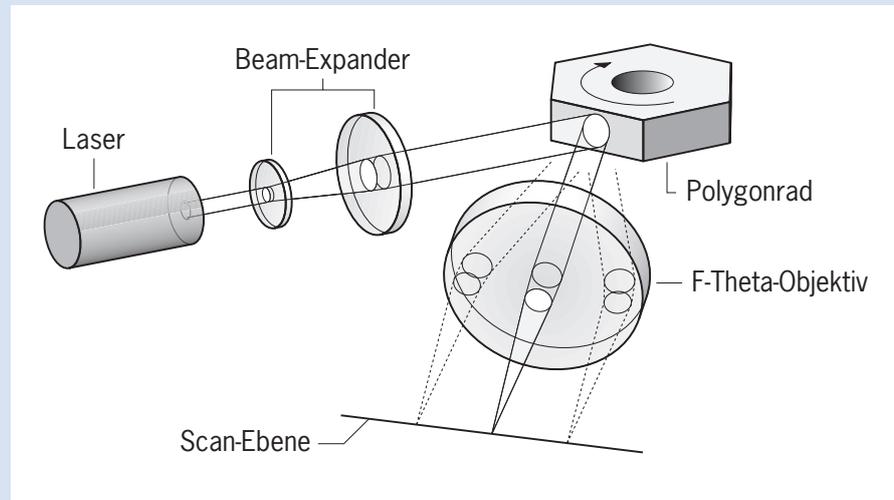


Abb. 2: Beam-Expander im schematisch dargestellten Strahlengang eines Laser-Scanners mit HeNe-Laser als Strahlquelle. Durch die Aufweitung des Strahlenbündelquerschnitts wird die Eintrittspupille des F-Theta-Objektivs optimal ausgefüllt. Wegen der dadurch reduzierten Beugung und Verminderung der Strahlendivergenz kann ein kleinerer Punktdurchmesser in der Scan-Ebene erreicht werden.

Beam-Expander, die für die Wellenlängen 532 nm (frequenzverdoppelter YAG-Laser), 633 nm (HeNe-Laser) und 780 bis 860 nm (Laserdioden) oder 1064 nm (YAG-Laser, Materialbearbeitung) einzusetzen sind. Zur Erhöhung der Transmission und Reduzierung von Streulicht sind die Linsen dieser Beam-Expander mit einer auf ihre Nennwellenlänge abgestimmten reflexionsmindernden Vergütung vom Typ V beschichtet; beim Laserdioden-Beam-Expander (780 nm bis 860 nm) handelt es sich um eine Breitbandvergütung für 630 nm bis 1070 nm.

Optische Qualität: Der Beam-Expander bestimmt die optische Qualität des Gesamtsystems mit. Seine optische Qualität darf deshalb nicht vernachlässigt werden. Alle Beam-Expander von Rodenstock liegen bei ihrer Nenn-Wellenlänge qualitativ an der unüberschreitbaren Beugungsgrenze.

Aufweitungsfaktor: Der Beam-Expander weitet den Durchmesser eines Strahlenbündels um einen Faktor auf, der dem Vergrößerungsverhältnis Γ' des (umgekehrten) Fernrohrbaus entspricht. Durch geeignete Wahl des

Aufweitungsfaktors kann eine optimale Anpassung des Bündeldurchmessers an die Eintrittspupille einer nachfolgenden Optik, beispielsweise eines F-Theta-Objektivs, erfolgen. Ein variabler Aufweitungsfaktor ermöglicht exakte Anpassung bei wechselnden Einsatzbedingungen. Der Gewinn liegt in verminderter Beugung und Divergenz, also in einer höheren Abbildungsqualität. Bei Vario-Beam-Expandern ist zu beachten, daß der Bündelquerschnitt je nach gewähltem Aufweitungsfaktor durch die Eintritts- oder durch die Austrittspupille begrenzt werden kann.

Alle serienmäßigen Rodenstock-Beam-Expander erlauben die Einstellung des Aufweitungsfaktors zwischen $2\times$ und $8\times$; dazu sind der Fokussier- und der Zoomring nach einem mitgelieferten Diagramm einzustellen (→ Abb. 4). Der maximal nutzbare Eintrittsbündeldurchmesser E beträgt je nach Modell 4 oder 8 mm, der maximal nutzbare Austrittsdurchmesser 31 mm.

Divergenzverminderung: Eine unmittelbare Konsequenz des im Beam-Expander verwendeten umgekehrten Fernrohrprinzips ist die Verminderung

8.2 Beam-Expander (Fortsetzung)

der Strahlendivergenz umgekehrt proportional zum Aufweitungsfaktor (bei Umkehrung des Fernrohrs wird dessen Vergrößerungsfaktor Γ' zum reziproken Verkleinerungsfaktor).

Bildwinkel: Mechanische Einbautoleranzen können die Beam-Expander-Achse gegenüber der Achse des einfallenden Strahlenbündels verkippen. Das erfordert einen von Null verschie-

denen Bildwinkel. Die serienmäßig lieferbaren Rodenstock-Beam-Expander bieten mit $0,2^\circ$ genügend Spielraum zur mechanischen Anpassung innerhalb des Gesamtsystems.

Fokussierung: Wird der Abstand der beiden optischen Glieder des Beam-Expanders verstellbar ausgeführt, so kann damit die Schnittweite des gesamten optischen Systems verändert

werden. Eine variable Afokalität erlaubt darüber hinaus das Nachfokussieren zum Ausgleich von Brennweitertoleranzen weiterer optischer Komponenten. Alle Rodenstock-Beam-Expander bieten diese Möglichkeit. Ein Überhub der Fokussierschnecke von (je nach Modell) mindestens 1,4 mm gewährleistet die variable Afokalität auch in der Aufweitungsfaktor-Extrem-einstellung $8\times$ (Skalenwert $0 \hat{=} 20$).

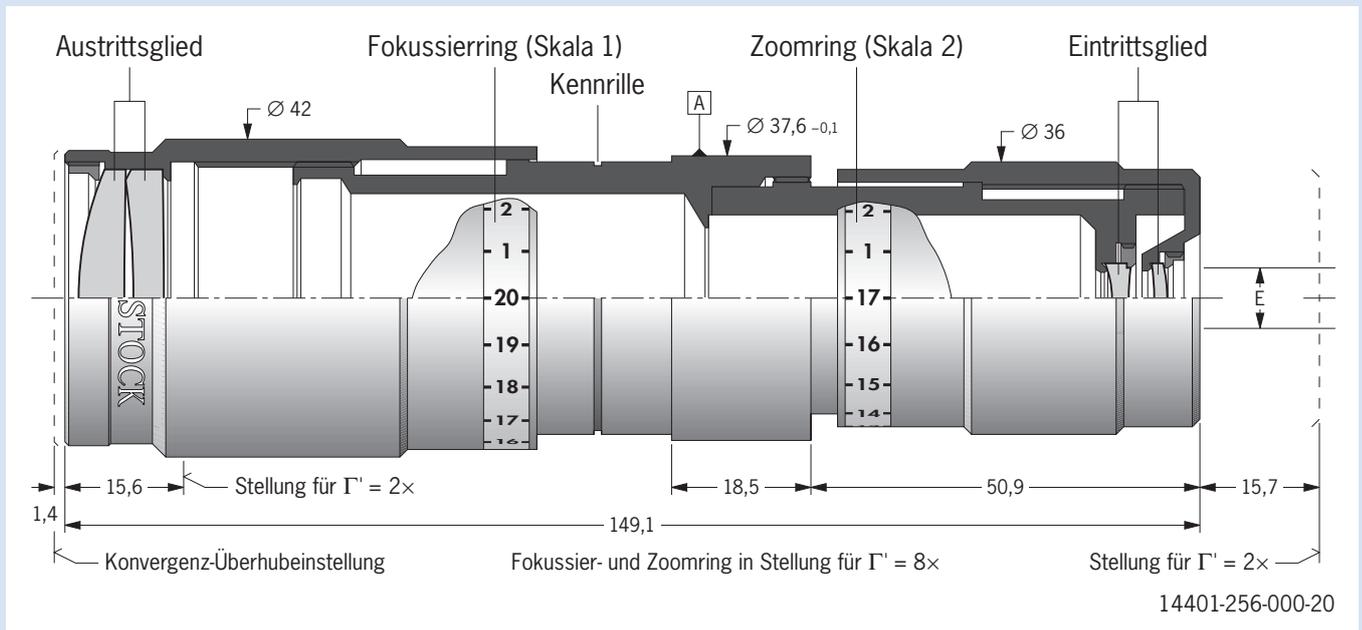


Abb. 3: Beam-Expander in vierlinsigem Aufbau mit variablem Aufweitungsfaktor 2x bis 8x für Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Mit dem rechten Einstellring wird der Abstand der beiden Linsen des Eintrittsglieds und damit dessen Brennweite verändert. Mit dem linken Einstellring wird das positive Austrittsglied so verschoben, daß dessen eingangsseitiger reeller Brennpunkt F_2 mit dem ausgangsseitigen virtuellen Brennpunkt F_1' des insgesamt negativen Eintrittsglieds zusammenfällt. Ferner kann damit bei Bedarf das optische Gesamtsystem nachfokussiert werden. Der Beam-Expander ist an Fläche [A] in der Gerätehalterung aufzunehmen.

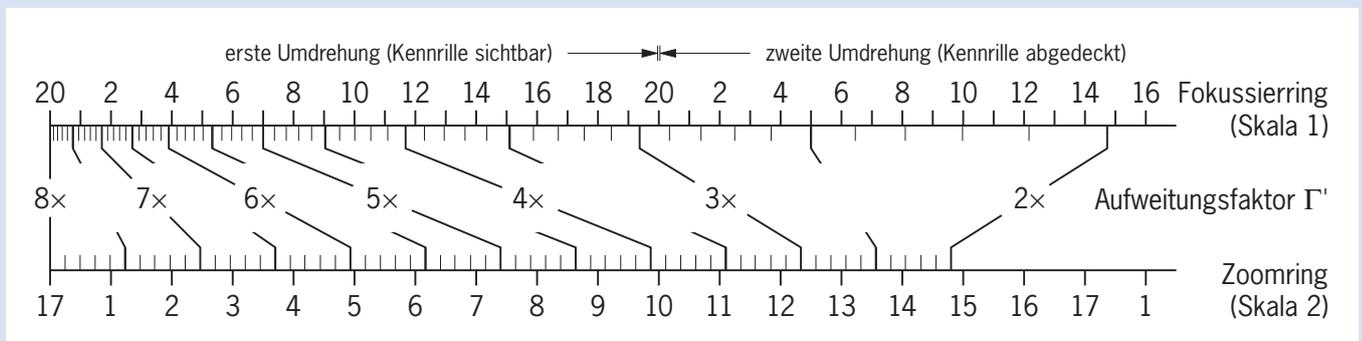


Abb. 4: Einstellwerte für den Fokussiering (1) und Zoomring (2) zur Erzielung der Aufweitungsfaktoren 2x bis 8x des oben abgebildeten Beam-Expanders mit variablem Aufweitungsfaktor. Bei der zweiten Umdrehung des Fokussierings (über 20 beginnt die Skala wieder von vorn) ist die Kennrille abgedeckt. Die Einstellwerte bei den anderen Vario-Beam-Expandern von Rodenstock sind ähnlich, aber nicht gleich.

Übersicht über die serienmäßig lieferbaren Beam-Expander von Rodenstock

Beam-Expander-Modell (Bestellnummer)	Linsenzahl	korrigiert für Wellenlänge (auch verwendbar für den Wellenlängenbereich)	reflexionsmindernd beschichtet für Wellenlänge (Beschichtungstyp) bzw. für den Wellenlängenbereich	Aufweitungsfaktor	max. Eintrittsbündel- Δ	max. Austrittsbündel- Δ	max. Fassungs- Δ
14401-205-000-20 ^{A)}	4	532 nm	532 nm (Typ V)	2x...8x	4 mm	31 mm	42,0 mm
14401-181-000-20 ^{A)}	4	1064 nm	1064 nm (Typ V)	2x...8x	4 mm	31 mm	42,0 mm
14401-257-000-20	4	532 nm	532 nm (Typ V)	2x...8x	8 mm*	31 mm	42,0 mm
14401-258-000-20	4	633 nm (780 nm ... 860 nm)	630 nm ... 1070 nm	2x...8x	8 mm*	31 mm	42,0 mm
14401-256-000-20	4	1064 nm	1064 nm (Typ V)	2x...8x	8 mm*	31 mm	42,0 mm

^{A)} = Auslaufmodell (auf Anfrage); * bei Aufweitungsfaktor 2x...3,9x – darüber hinaus gilt max. Eintrittsbündel- Δ = 31mm/Aufweitungsfaktor

Vorteile kundenspezifischer Beam-Expander

Über das serienmäßig lieferbare Programm an Beam-Expandern (→ obige Tabelle) hinaus entwickelt und fertigt Rodenstock seit langem kundenspezifische Beam-Expander, die neben optimaler qualitativer und mechanischer Anpassung an das Gesamtsystem bei größeren Stückzahlen auch Kostenvorteile bringen. Darüber hinaus können kundenspezifische Beam-Expander in ihren optischen Eigenschaften erheblich variiert werden.

Erfahrung: Rodenstock verfügt über ein reiches Know-how in der Entwicklung und im Bau von Beam-Expandern verschiedenster Art für nahezu alle denkbaren Anwendungsbereiche sowie in der Systementwicklung.

Mechanische Anpassung: Die mechanische Ausführung kann die Einbauverhältnisse und Kundenwünsche, z. B. nach Kompensationseinrichtungen und speziellen Verstellmöglichkeiten, berücksichtigen.

Eine Temperaturkompensation kann optisch oder mechanisch erfolgen und so ausgelegt werden, daß dabei

auch die Einflüsse des Kundengeräts mit kompensiert werden.

Die optische Kompensation wird durch die Auswahl von Gläsern mit entsprechenden Wärmeausdehnungskoeffizienten und Brechungsindizes erreicht. Allerdings können aufgrund der wenigen optischen Glieder des Beam-Expanders damit nur kleine Schnittweitenkorrekturen durchgeführt werden.

Ein weitaus stärkerer Einfluß läßt sich mit einer mechanischen Temperaturkompensation erzielen (→ Kap. 3.1). Durch Auswahl geeigneter Materialien für den Tubus des Beam-Expanders oder durch eine sogenannte „Trompetenkonstruktion“ kann das Temperaturverhalten einer kompletten Baugruppe korrigiert werden.

Optische Anpassung: Die optischen Parameter wie Aufweitungsfaktor, Ein- und Austrittsbündel-Durchmesser oder Farbkorrektur (Wellenlänge) können weit über die mit den serienmäßigen Modellen gebotene Bandbreite hinaus individuellen Kundenwünschen angepaßt werden. So kann z. B. mit einem Zylinderfokal der Querschnitt des Strahlenbündels verformt werden. Damit lassen sich

die verschieden großen Halbachsen eines von einem Light-Pen mit Laserdiode ausgesandten Strahlenbündels den Erfordernissen des folgenden optischen Systems anpassen, falls dies nicht durch das Kollimatorobjektiv erreichbar war oder geschehen ist.

Kostenminimierung: Unter Berücksichtigung des Gesamtsystems kann die optische Qualität der einzelnen Komponenten an die Kundenspezifikationen angepaßt werden. Wenn für die geforderte Qualität des Gesamtsystems eine Minimalkonfiguration der darin verwendeten Komponenten angestrebt wird, läßt sich das Preis-Leistungs-Verhältnis verbessern.

Zusatzleistungen: Rodenstock entwickelt und fertigt nicht nur Komponenten, sondern auch komplette Baugruppen. Ein wichtiger Vorteil der Baugruppenentwicklung bei Rodenstock ist, daß alle einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften und im Interesse der oben genannten Kostenminimierung aufeinander abgestimmt sind.

Rodenstock führt ferner die Montage, die Justierung sowie die Prüfung der Komponenten und Baugruppen durch.