

Anforderungen an die Laserbearbeitungsköpfe beim Schweißen mit hoher Strahlqualität

Björn Wedel, Roman Niedrig

HIGHYAG Lasertechnologie GmbH, Stansdorf

1 *HIGHYAG* Lasertechnologie GmbH- Unternehmensvorstellung

Die *HIGHYAG* Lasertechnologie GmbH stellt Produkte her, die „die Schnittstelle zwischen dem Laser und der Bearbeitung“ darstellen. Dazu gehören zum einen Strahlführungssysteme und zum anderen Bearbeitungsköpfe, vor allem aber kundenspezifische Lösungen entsprechend der verschiedenen Laserapplikationen, die unterschiedliche oder neue Komponenten erfordern. Auf diesem Gebiet ist das Unternehmen bereits seit 10 Jahren tätig.

Die Produkteigenschaften der verschiedenen Komponenten sind auf die Bedürfnisse der fortgeschrittenen Produktionsindustrie ausgelegt und zeichnen sich durch die hohe Verfügbarkeit, einfache Bedienung, problemlose Integration in bestehende Systeme und die hohe Zugänglichkeit zum Werkstück aus.

2 Grundlagen der Fokussierung des fasergeführten Laserlichtes

2.1 Charakteristik von Faserlasern

Der Faserlaser und auch der Scheibenlaser sind Laser mit einer sehr hohen Brightness. Die Laserleistungen liegen im Bereich von 5-30 kW, wobei 5 kW typisch sind. Kennzeichnend sind sehr gute Strahlqualitäten, die bis in den Kilowatt-Bereich beugungsbegrenzt sein können, oder bei Leistungen bis 20 kW von ca. 10-20 mm*mrad liegen.

Typische oder neue Applikationen, die mit dem Faserlaser erschlossen werden können, sind größere Arbeitsabstände für Remote-Schweißverfahren, Schweißen von dicken Strukturen mit sehr hohen Laserleistungen oder der sehr guten Strahlqualität sowie Schweißen oder Schneiden von sehr feinen Strukturen.

2.2 Fokussierung des Laserlichtes

Das Laserlicht tritt unter einem bestimmten Winkel aus der Faser aus und wird über ein Linsensystem, üblicherweise bestehend aus einer Kollimation und einer Fokussierung, auf das Werkstück fokussiert. Die Vergrößerung, die wesentliche Beschreibung des optischen Systems, ergibt sich üblicherweise aus den Fokussierungs- und den Kollimationsbrennweiten. Der Fokusedurchmesser ist das Produkt aus Vergrößerung und Durchmesser des Faserkerns.

2.3 Vergleich konventioneller und faserlaserbedingter Anforderungen an Laserbearbeitungsköpfe

	konventionelle Anforderungen	Faserlaserbedingte Anforderungen
Laserleistung	1 - 5 kW	< 20 kW
Faserdurchmesser	200 – 1500 µm	(10) 50 – 400 µm
Vergrößerung	0,5 – 2 (typisch 1)	1 – 5 (typisch 2 – 3)
Strahlparameterakzeptanz	125 mrad (YAG Laser) 220 mrad Diodenlaser	125 - 220 mrad abhängig vom Lasertyp und Laserhersteller
LLK Schnittstelle	Standard LLK, QBH, LLK Auto	
fokusformende Elemente	einfacher Spot, Doppelfokus u.a.	
allgemeine Anforderungen	hohe Transmission – geringe Energieverluste bestmögliche Strahlqualitätserhaltung – bestmögliche Abbildungsqualität robust für den industriellen Einsatz einfache Wartung Modularität	
Zubehör	Kamerabeobachtungsmöglichkeiten, Prozessbeobachtung, Crossjet u.a.	

Nebeneffekte

Das Laserlicht kann Wechselwirkungen mit den abbildenden Elementen eingehen. Bedingt durch die starke Vergrößerung des Systems können Systemtoleranzen auftreten.

2.4 Unterschiedliche Laserleistungen und unterschiedliche Fokuspositionen

Das Laserlicht wird im Linsensystem absorbiert. Der Brechungsindex des verwendeten Linsenmaterials ist temperaturabhängig. Hinzu kommt ein radialer Verlauf des Brechungsindex in den optischen Elementen, den man auch als thermische Linse bezeichnet, sowie eine zusätzliche Deformation. Dies zeigt sich in einer Veränderung der Brechkraft des kompletten Systems und einer Veränderung der Fokusposition. Zusammenfassend können diese Prozesse als laserinduzierter Shift des Fokus betrachtet werden.

Bereits eine Temperaturerhöhung von nur 3-10 Grad Kelvin im Zentrum der optischen Elemente kann einen ganz wesentlichen Effekt als thermische Linse verursachen, selbst wenn ein Linsenmaterial mit einem sehr geringen Absorptionskoeffizienten eingesetzt wird. Die Zeitkonstanten bis zur Stabilisierung des Systems im Prozess liegen im Bereich von wenigen 10 Sekunden bis zu

einer Minute und beeinflussen die Bearbeitungsergebnisse. Das bereitet den Anwendern Schwierigkeiten, ist aber gleichzeitig eine Grenze der Physik.

Der laserinduzierte Fokusshift ist sehr stark von der Vergrößerung des eingesetzten Bearbeitungskopfes abhängig, genauer ausgedrückt, der Fokusshift ist proportional zum Quadrat der Vergrößerung. Das heißt, je größer die Vergrößerung des Bearbeitungskopfes, je kleiner die Faser, die man auf das Werkstück mit einem größeren Fokus fokussieren möchte, desto größer ist der Fokusshift. Die Brennweite des Systems hat dagegen nur einen relativ kleinen Einfluss. Der Vorteil der großen Rayleigh Länge eines solchen Systems wird somit oft relativiert.

3 Spezielle Anforderungen für die Fokussierung von Lasern mit sehr hoher Brightness

3.1 Möglichkeiten zur Reduzierung des laserinduzierten Fokusshift

Vermeiden der Absorption von Laserlicht im Material

1. Vermeiden der Absorption von Laserlicht im Material durch die Auswahl optischen Materials, das am besten geeignet ist.
2. Verhindern zusätzlicher Absorption der Laserleistung durch z.B. Schmutz oder Staub auf den optischen Elementen und damit einhergehend Reduzierung, der für den Anwender sichtbaren Schnittstellen.
3. Schutz der Schnittstellen durch z.B. leicht zu wechselnde und zu überprüfende Schutzgläser, Cross Jets oder in Frage kommende Komponenten zur Überwachung der Verschmutzung.

Reduzierung der Anzahl der verwendeten optischen Elemente

3.2 Einfluss der Optik-Bauart auf die Fokus-Qualität

Wie allgemein bekannt ist, weisen optische Systeme aus sphärischen Elementen Abbildungsfehler auf, die die Fokussierung des Laserstrahls beeinflussen und auch beeinträchtigen. Darum werden optische Systeme aus mehreren Elementen aufgebaut, um diesen Einfluss zu minimieren. Man spricht dann von korrigierten Systemen. Bei „einfachen“ Laserbearbeitungsoptiken besteht die Korrekturaufgabe üblicherweise lediglich darin, den sog. Öffnungsfehler zu beseitigen. Dies im Unterschied z.B. zu Scanner-Objektiven, wo man nicht nur mit dem Öffnungsfehler, sondern auch mit Bildfeldwölbung, Astigmatismus, Koma und Verzeichnung zu kämpfen hat.

Weniger einfach ist die Frage zu beantworten, wie der Einfluss eines optischen Systems quantitativ bewertet werden kann, und wie eine solche Bewertung für ein konkretes optisches System ausfällt. Dies wird im Folgenden an praxisnah gewählten Beispielen gezeigt.

Die vom Lichtleitkabel austretende Strahlung wird in der Winkel-Dimension mit einer Gauß-Funktion modelliert, die bei der maximalen Apertur des optischen Systems abgeschnitten wird. Abbildung 1 zeigt den entsprechenden Verlauf der in der Rechnung benutzten Parameter und Abbildung 2 die zugehörigen Leistungseinschlüsse.

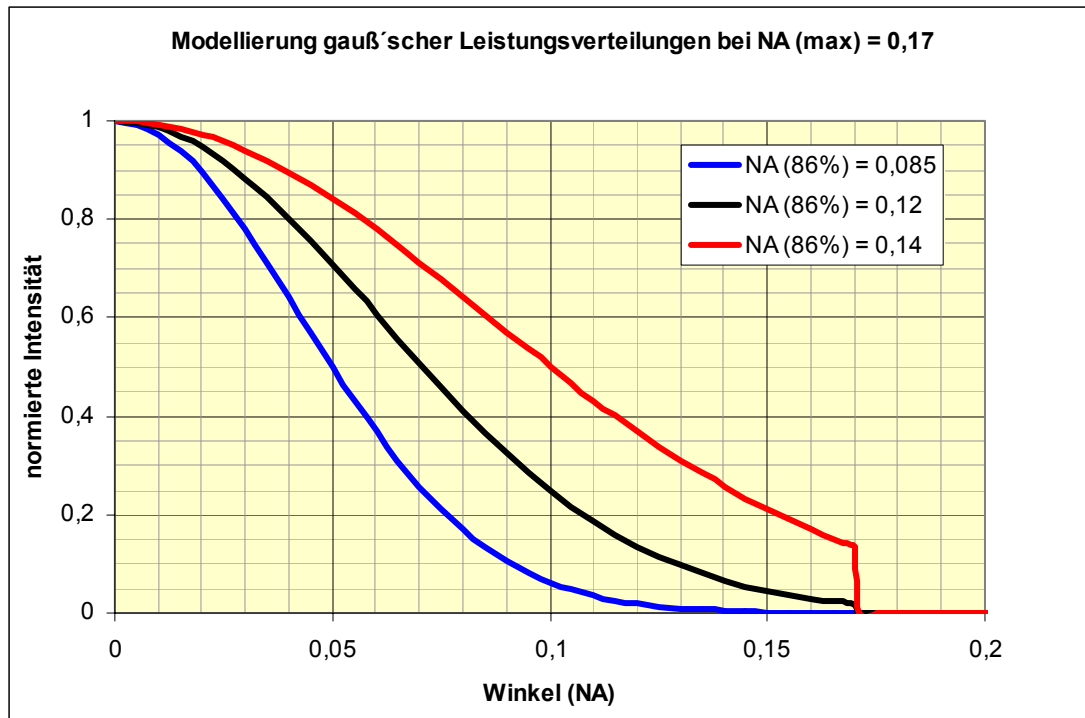


Bild 1: Modellierung Gauß'scher Leistungsverteilungen bei NA (max) = 0,17

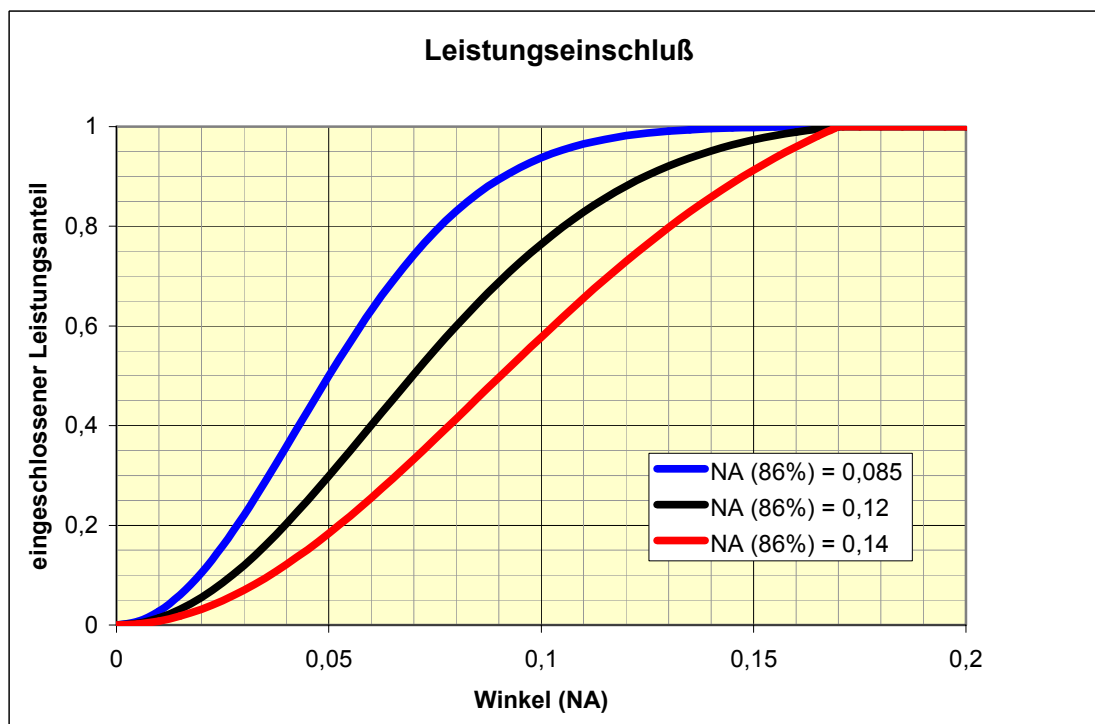


Bild 2: Leistungseinschluß

Als Beispiel für optische Systeme werden 3 unterschiedliche Konzepte mit jeweils identischen optischen Grunddaten betrachtet:

1. Ein simples unkorrigiertes System aus zwei identischen Plankonvexlinsen.
2. Ein symmetrisch aus Kollimator und Fokussierung aufgebautes System, wobei Kollimator und Fokussierung jeweils aus einem identischen optimal korrigierten zweilinsigen System bestehen, d.h. insgesamt vier Linsen.
3. Ein aus wenigen Linsen aufgebautes optimal korrigiertes System.

Die optischen Grunddaten sind:

Vergrößerung = 1

Maximale Apertur = 0,17

Nomineller Arbeitsabstand bzw. Brennweite der Fokussierung = 150 mm. (Daraus folgt ein Durchmesser der Linsen von mindestens 50 mm).

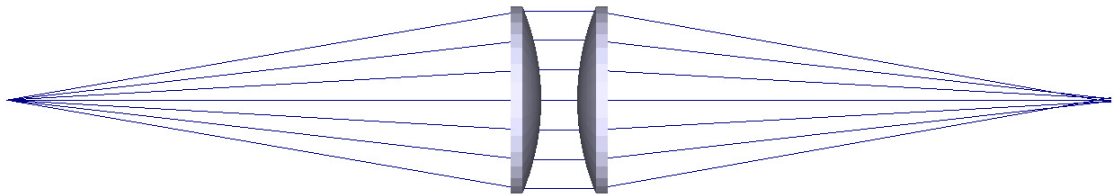


Bild 3: Linsensystem

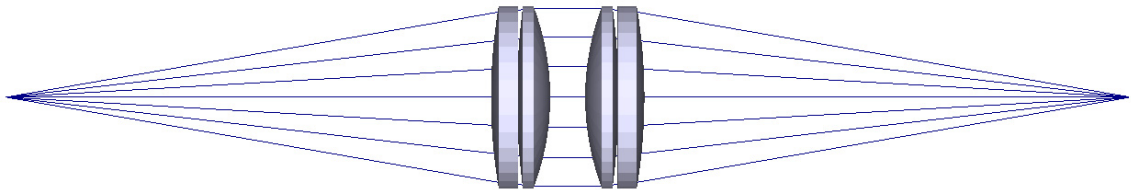


Bild 4: Linsensystem

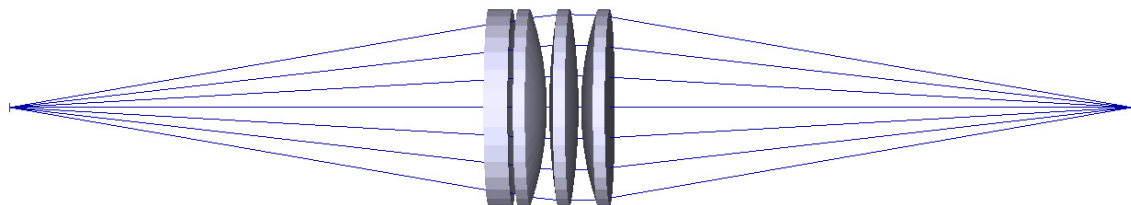


Bild 5: Linsensystem

Zur Beurteilung der Abbildungsqualität wird in den folgenden Abbildungen gezeigt, wie der Fokusbereich durch das reale optische System verschlechtert wird im Verhältnis zu dem Fokusbereich, der mit einem idealen System erzielt würde. Als Kriterium für den Fokusbereich wird ein Leistungseinschluss von 86% gewählt. Dieses Verhältnis wird über dem Durchmesser des Lichtleitkabels aufgetragen. Eine hervorragende Optik würde also Linie bei 1 zeigen, wohingegen reale Systeme, bedingt durch ihre Rest-Abbildungsfehler, zu kleinen Durchmesser hin einen ansteigenden „Verschlechterungsfaktor“ zeigen.

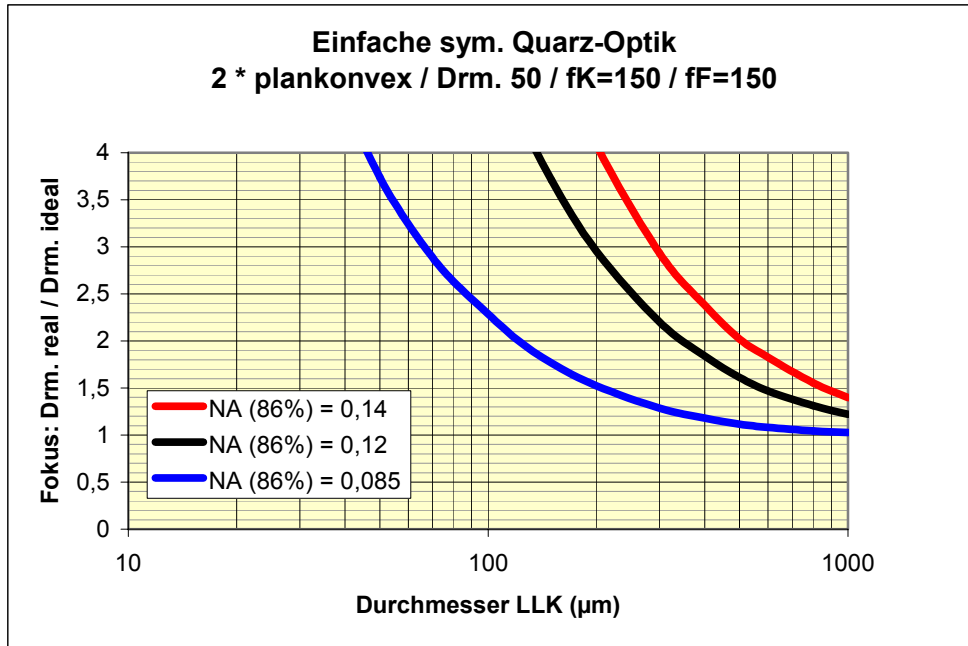


Bild 6: Einfache sym. Quarz-Optik

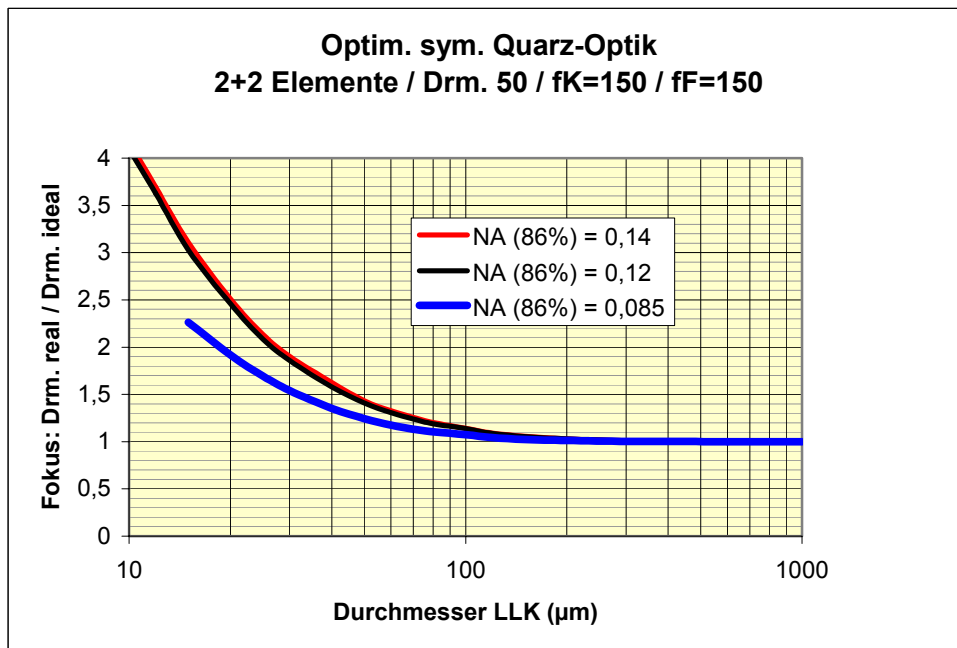


Bild 7: Einfache sym. Quarz-Optik

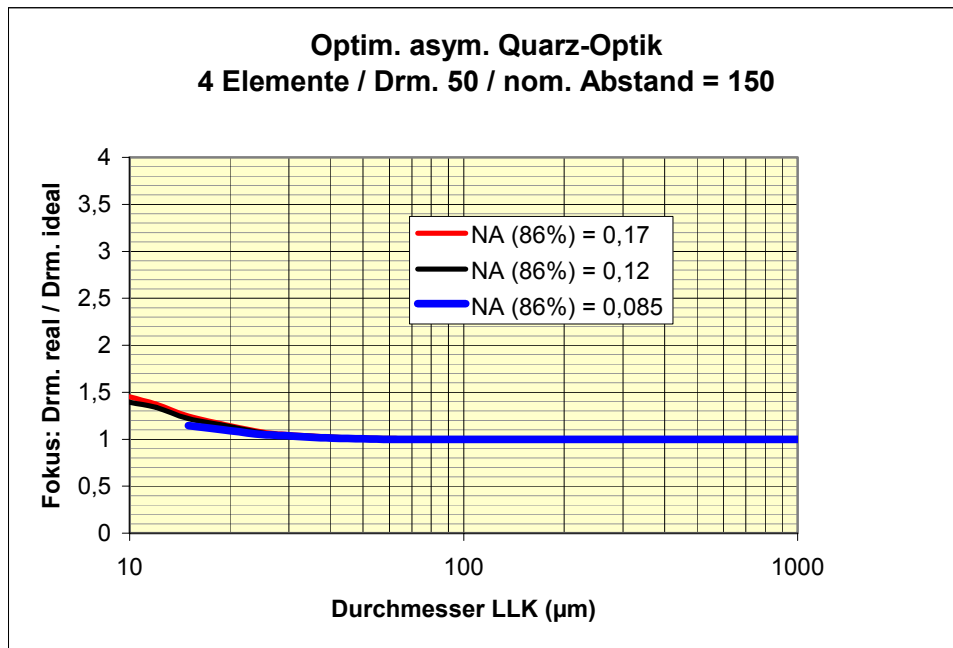


Bild 8: Einfache sym. Quarz-Optik

Wie nicht anders zu erwarten, zeigt sich beim unkorrigierten Zweilinsler eine deutliche Erhöhung des Fokusdurchmessers. Dennoch kann so ein einfaches System seine Berechtigung haben, wenn mit großen Lichtleitkabel-Durchmessern und geringer Apertur gearbeitet wird, z.B. liegt die Fokus-Verbreiterung bei Lichtleitkabeln über 600 μm und effektiven Aperturen unter 0,085 bei weniger als 10%.

Interessant wird es bei den korrigierten Systemen, bei denen man unwillkürlich davon ausgeht, dass der Einfluss der Rest-Abbildungsfehler vernachlässigbar sein sollte. Tatsächlich zeigt sich aber beim symmetrischen Vierlinsler schon bei Lichtleitkabeln unter 100 μm eine deutliche Erhöhung des Fokusdurchmessers. Bei Grundmode-Strahlung würde, je nach Apertur, der Fokusdurchmesser auf das ca. 2,5 bis 4-fache anwachsen, gleichbedeutend mit einem Absinken der Leistungsdichte auf ca. 16% bis 6%.

Hier zeigt sich die Leistungsgrenze eines möglichst universell verwendbaren Objektivs, denn eine bessere Korrektur ist mit zwei Elementen aus Quarz jeweils für Kollimation und Fokussierung bei dieser maximalen Apertur prinzipiell nicht erreichbar!

Für ausreichende Abbildungsqualität bis in den Grundmode-Bereich müsste man bei diesem symmetrischen Design-Konzept jeweils 3 Linsen für Kollimator und Fokussierung verwenden, insgesamt also 6 Linsen. Dies will aber im Hinblick auf Kosten und Fokusshift bei hohen Leistungen gut überlegt sein.

Eine Lösung des Dilemmas wird mit dem von *HIGHYAG* verfolgten Design-Konzept aufgezeigt: Obwohl wenige Linsen verwendet werden, zeigt ein derart optimiertes System eine gleichmäßig hohe Abbildungsleistung bis in den Grundmode-Bereich bei allen Aperturen.

Diese hohe Abbildungsleistung wird dadurch erkaufte, dass das System auf seine optischen Grunddaten speziell angepasst werden muss. Diese Anpassung erscheint aber auch im Hinblick auf minimierte Fokusshift zunehmend sinnvoll. Eine Modularität ist in eingeschränktem Maße dennoch möglich.

Focus Head M = 3,8, NAeff = 0,11 , ØFibre = 100µm

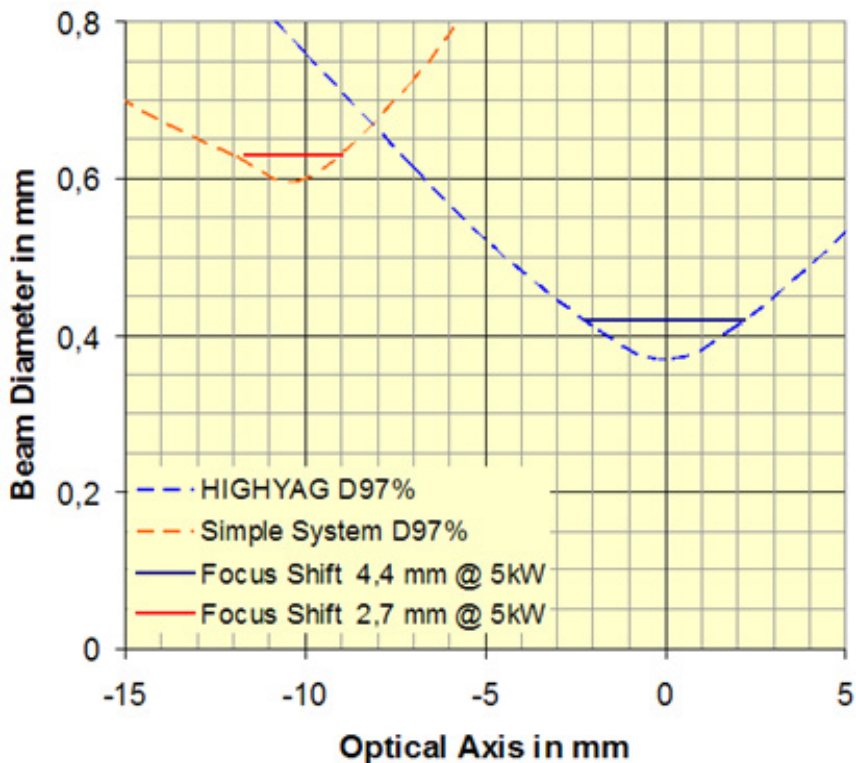


Bild 9: Imaging Quality vs. Focus Shift Comparison Beam Propagation and Focus Shift

Die Abbildung zeigt den Strahldurchmesserverlauf entlang der optischen Achse in der Fokussnähe für ein gut korrigiertes System und für ein Zweilinsensystem. Anhand dieser Abbildung wird deutlich, dass man schon mit einem gut korrigierten System eine wesentlich bessere Energiedichte im Fokus erzielen kann. Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten können dementsprechend erzielt werden. Bei einem besser korrigierten System kann trotz des größeren Fokusshifts ein schmalerer Fokus erzielt werden. Der Erhalt der Strahlqualität ist entscheidender als der Fokusshift. Eine optische Korrektur ist daher von Vorteil.

Darüber hinaus muss der Bearbeitungskopf so gut wie möglich an den Laserstrahl angepasst werden. Das heißt zum einen, dass der Laserbearbeitungskopf an die gewünschte Applikation angepasst werden sollte. Auf der anderen Seite ist eine Standardisierung des Strahloutputs hinter der Faser für die Faserlaser oder Laser mit hoher Brightness generell erforderlich.

Je geringer das optische System ausgefüllt wird, desto stärker ist der laserinduzierte thermische Shift. Die Abhängigkeit ist wiederum fast quadratisch. Die Anpassung des Laserbearbeitungskopfes ist somit so zu verstehen, dass im Vorfeld der Fokus festzulegen ist und die Linsen entsprechend auszuwählen sind, dass sie fast vollkommen ausgefüllt werden.

Alternativ können statt Linsen auch reflektive optische Komponenten verwendet werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch metallische Materialien absorbieren und sich deformieren können. Außerdem muss die Genauigkeit um den Faktor 10 höher sein, als bei CO₂ Optiken.

Eine weitere Möglichkeit liegt zudem in der adaptiven oder aktiven Kompensation des Fokusshifts.

4 Beispiele für entsprechende Bearbeitungsköpfe

4.1 Laserbearbeitungskopf BIMO

- modulares optisches System
- Fokussierung mit einem Arbeitsabstand von 100 – 500mm
- Kollimation für eine Strahlakzeptanz von 125 und 220 mrad
- Fokusformungsmodul
- Prozessbeobachtungs –und Strahlumlenkungsmodul

Geeignet für Anwendungen mit YAG-, Faser- und Diodenlaser bis 6 kW Laserleitung. Die Integration weiterer Komponenten wie Kamerabeobachtung und Beleuchtung ist möglich.

Zoomkollimation

Eine Zoomkollimation empfiehlt sich bei Applikationen, bei denen der Fokusbereich noch nicht feststeht. Die Brennweite des Kollimationssystems kann mit diesem System gewählt und variiert werden, sodass der Fokusbereich auf dem Werkstück frei einstellbar ist.

4.2 Laserbearbeitungskopf BIMO HP

- ausgelegt für eine Leistung von 20 kW
- Verwendung großer optischer Systeme
- Strahlparameterakzeptanz bis 200 mrad (bzw. bis $NA= 0,2$)
- Vergrößerungen zwischen 1 – 3

Durch den Austausch wesentlicher Komponenten des Systems können kundenspezifische Vergrößerungen erzielt werden.

Zusätzliche Eigenschaften:

- verbesserte Kühlung des Systems
- stark gekühlte Cross Jet Blende
- Komponenten zur Überwachung der Verschmutzung einzelner Bauteile

4.3 Laserbearbeitungskopf BIMO HQ

- ausgelegt für Strahlqualitäten nahe der Beugungsgrenze bei Verlust freier Übertragung der Strahlqualität auf das Werkstück
- Strahlparameterakzeptanz 125 mrad
- Laserleistungen bis zu 1 kW
- Erzielung unterschiedlicher Vergrößerungen (1 – 5) durch den Austausch großer Teile des kompletten Systems

5 Zusammenfassung

Faserlaser sind Laser mit hoher Brightness. Die meisten Applikationen erfordern wegen des sehr geringen Faserdurchmessers einen starken Vergrößerungsfaktor. Das wiederum generiert einen verstärkten laserinduzierten Fokushift, der durch die Absorption der Laserleistung in den optischen Elementen bedingt wird.

Die Vergrößerung hat, wie im Vorangegangenen beschrieben, eine große Bedeutung.

Die Physik ist hier leider der limitierende Faktor.

Eine gute optische Korrektur eines solchen Systems ist wichtiger als ein geringer Restanteil des Fokushifts. Zudem muss der Laserbearbeitungskopf so gut wie möglich an die gewünschte Bearbeitung des Kunden angepasst werden.