

# Herausforderungen bei der Messung von Hochleistungslasern

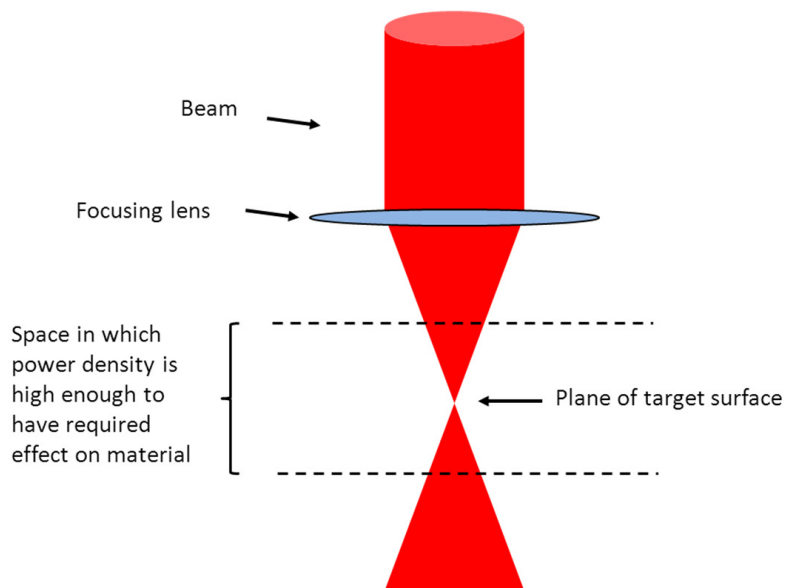
Mark Slutzki

Hochleistungslaser ermöglichen es uns heute Komponenten zu fertigen, die mit rein mechanischen Mittel kaum oder gar nicht hätten entstehen können. Die Möglichkeit, einen Laserstrahl mit enormer Leistung auf einen sehr kleinen, präzise definierbaren Wirkungsbereich zu fokussieren, eröffnete zahlreichen Industrien neue Fertigungsmöglichkeiten.

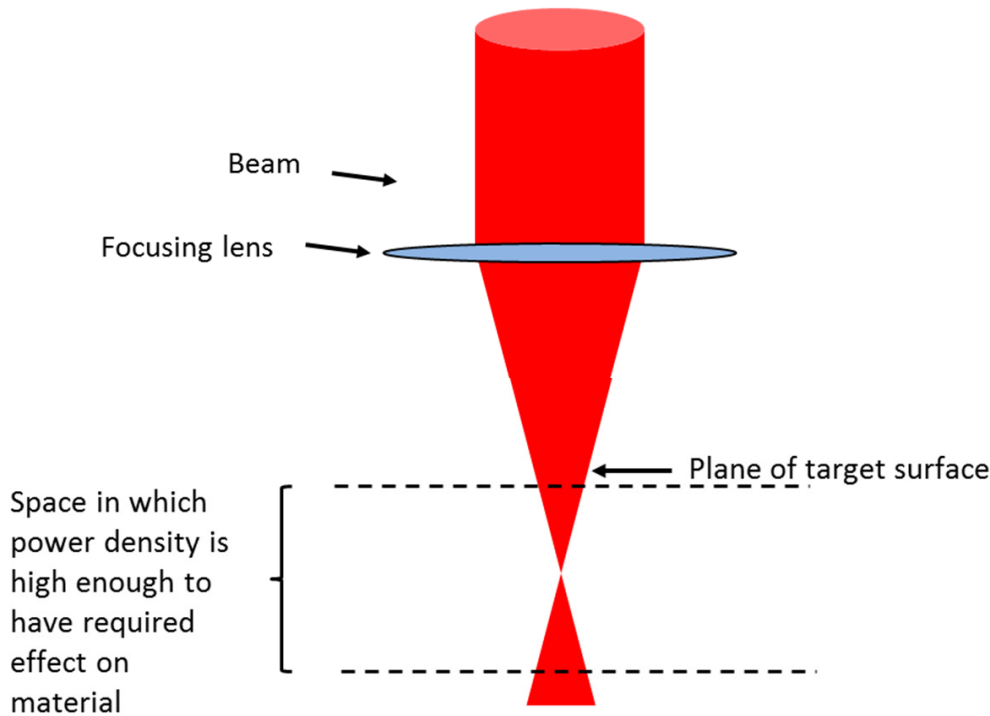
Mittlerweile finden sich selbst im industriellen Umfeld dank der weit verbreiteten Faserlaser und deren Skalierbarkeit Laseranlagen mit Leistungen von 50kW oder 75kW. Militärische Anwendungen nutzen heute schon Laserleistungen von 100kW und mehr.

## Messen – Wie und Warum

In einem vorgegebenen Prozess wird der Laserstrahl mit der erforderlichen Leistungsdichte exakt an einer Stelle geliefert. Dazu die folgende Skizze:



Laserleistung und Lage der Fokusebene ändern sich zwangsläufig mit der Zeit und über die Nutzungsdauer hinweg. Gründe dafür können die Alterung der Komponenten, die Verunreinigung der Linse durch Prozessstaub, die fehlerhafte Ausrichtung der Strahlführung usw. sein. Findet eine solche Veränderung statt, beeinflusst das den Bereich, in dem die Leistungsdichte hoch genug ist, um das Material zu bearbeiten. Es kann zu einer Verschiebung oder einer Änderung der Strahlform kommen:



Das Ergebnis: Ein fehlerhaftes Teil oder zumindest ein ineffizienter Prozess.

Werden die Parameter nicht geprüft, nehmen sie unerwartet Einfluss auf den Prozess. Der Laserstrahl bringt nicht mehr die gewünschte Leistungsdichte oder bringt sie an einer falschen Stelle. Der Prozess wird unvorhersehbar, und lässt bei einer kommerziellen Anwendung die Profitabilität durch Ineffizienz schnell sinken.

Um das zu verhindern, gilt es die relevanten Prozessparameter mit einer angemessenen Präzision zu überwachen. Auf diesem Weg lässt sich eine Verschiebung rechtzeitig erkennen und proaktiv dagegen wirken. Vorbeugen ist auch in diesem Fall besser als heilen.

### **So viel zum Thema „Warum“ muss man messen. Doch wie lassen sich die Messungen durchführen?**

Die zwei kritischsten Laserparameter in Hochleistungsprozessen sind die Laserleistungsdichte und die Fokusslage. Zusätzlich können Parameter wie Pulsenergie, aktuelles Strahlprofil (das die Fokussierbarkeit des Strahl bestimmt), Strahlposition oder -größe (weniger als ein volles Profil) wichtig sein.

Leistung – hier sprechen wir von mehreren hundert Watt bis zu mehreren Dutzend Kilowatt – wird in der Regel mit einem thermischen Sensor gemessen. Das absorbierte Laserlicht wandelt sich in Wärme; der daraus resultierende Wärmestrom wird gemessen und ist proportional zur Leistung des Strahls. Als Ergebnis wird ein numerischer Wert auf einem Display oder einem mobilen Anzeigegerät geliefert, oder die Daten werden über eine Schnittstelle direkt an ein angeschlossenes Hostsystem übertragen. Die Fokusposition wird mit unterschiedlichen Arten der Strahlanalyse durchgeführt, diese steht allerdings nicht im Mittelpunkt dieses Artikels.

## **Die fünf Herausforderungen bei den Messungen**

Bei der Messung von Hochleistungslasern gibt es einige zentrale Herausforderungen, denen man sich stellen muss:

### **1. Kühlung**

Die hohe Laserleistung von mehreren Dutzend kW, die auf den Sensor treffen, müssen genauso schnell abgeführt wie sie eingebracht werden; anderenfalls staut sich die Hitze im Sensor und verursacht erhebliche (teure) Schäden.

### **2. Beschädigung**

Selbst wenn das Sensorgehäuse der erwarteten Gesamtleistung standhalten kann, muss die Oberfläche des Sensor in der Lage sein, die Leistungsdichte (kW/cm<sup>2</sup>) zu verkraften. Bei hohen Leistungen ist dies um ein Vielfaches schwieriger als bei geringeren Leistungen. Die Zerstörschwelle (maximale Leistungsdichte, die ein Absorber aushalten kann) hängt vom Leistungsbereich ab. Je höher die Leistung geht, desto kritischer wird es für den Sensor.

### **3. Backscatter**

Ein typischer Thermosensor absorbiert ungefähr 90 % (mit geringen Abweichungen abhängig von der Wellenlänge). Die 10% Rückreflektion sind üblicherweise sehr diffus, so dass ihnen in mittleren Leistungsbereichen keine Beachtung geschenkt werden muss. Bei 50kW sieht das allerdings anders aus: Hier sind 10% immerhin noch 5kW!

### **4. Eignung für industrielle Umgebungen**

Sensoren, die sich für hohe Laserleistungen eignen, sind in der Regel sehr groß, um die entstehende Wärme entsprechend abzuleiten. In modernen Produktionsumgebungen ist Platz ein teures Gut! Der Platzbedarf eines Messgeräts muss trotz der Wärmeentwicklung möglichst gering sein. Darüber hinaus ist der Grad der Automatisierung in der Fertigung heute sehr hoch. Auch dies muss bei der Entwicklung der Messgeräte berücksichtigt werden.

### **5. Stetig zunehmende Leistung**

Die Leistung industrieller Laser steigt immer weiter an. Wie skalierbar ist die verwendete Messtechnik?

## **Die passenden Lösungen**

Wenden wir uns jetzt den Lösungen zu:

### **1. Kühlung**

Bei Leistungen im Bereich von Dutzenden Watt wird in der Regel ein Ventilator zur Kühlung genutzt. Selbst bei für Laserleistungen von 1,1 kW bietet Ophir noch Sensoren mit Ventilatoren. Steigt die Laserleistung auf mehrere Hundert Watt, erfolgt die Kühlung üblicherweise mit Wasser. Um eine Überhitzung zu vermeiden, verfügen einige Sensoren über ein zusätzliches Überwachungsmodul mit Alarm- und Inter-Lock Funktion (z.B. der 16K-W-BB-55).

Einige Sensoren nutzen das Wasser aber nicht nur zur Kühlung, sondern zur Messung: Der Temperaturanstieg des Kühlwasser und die Durchflussgeschwindigkeit werden kombiniert und ermöglichen so die Leistungsmessung. Hier zwei Beispiele für Sensoren, die das Wasser auch zu Messzwecken nutzen:



Abb. 1: Der grossformatige 6kW Sensor links und ein einzigartiger Sensor zur Messung von bis zu 120 kW Laserleistung.

Erwähnt werden sollte dabei auch, dass die Faseradapter, die für die hohen Leistungen verwendet werden, ebenfalls gekühlt werden müssen. Ophir entwickelte dazu den QBH Fiber Adapter, der in zwei Varianten verfügbar ist. Der wassergekühlte Adapter kann mit den Ophir Sensoren mit 1500 W und 5000 W kombiniert werden. Die Faser lässt sich mittels des Adapters direkt mit den Ophir Sensoren verbinden, so dass eine Verunreinigung durch Staub und Partikel ausgeschlossen werden kann. Gleichzeitig werden Rückreflektionen vermieden und der Laserschutz wird sichergestellt.

## 2. Beschädigungen

Wie schon erwähnt, muss ein Sensor nicht nur der Gesamtleistung standhalten, sondern auch der entstehenden Leistungsdichte. Um Schäden zu vermeiden, gilt es einige grundlegende Dinge zu beachten:

- a. Meiden der Fokusebene - Auf der Fokusebene werden Werkstücke gebohrt und geschweißt – und gegebenenfalls auch Sensoren. Um Schäden am Sensor zu vermeiden, sollte so weit außerhalb des Fokus gemessen werden, dass die Zerstörschwelle kein Problem mehr darstellt. Diese Lokation zu finden, gestaltet sich allerdings nicht immer einfach (Unterschiede zwischen Gauß'schem Strahl und Flattop-Strahl vor und nach dem Fokus ...). Die Ophir Experten geben dazu gerne im Einzelfall Auskunft.
- b. Sensor mit geeigneter Zerstörschwelle verwenden – Nutzen Sie einen Absorber, der für die erwartete Leistungsdichte ausgelegt ist. Ophir hat einige Absorber mit sehr hohen Zerstörschwellen entwickelt; die „LP2“ Beschichtung hält bis zu 10kW/cm<sup>2</sup> bei einer Leistung

von 1.000 Watt stand und ist bei einer Pulsdauer von 10ms auf 400J/cm<sup>2</sup> ausgelegt. Der Absorber verfügt darüber hinaus über ein spektral gleichförmiges Ansprechverhalten und eine geringe Winkelabhängigkeit.

- c. Ablenk-Konus einsetzen - Die Sensoren für höchste Laserleistungen verfügen häufig über einen Ablenk-Konus, der den Strahl mit einem divergenten Winkel nach außen reflektiert. Erreicht der Strahl den umschließenden zylindrischen Absorber, ist die Leistungsdichte schon erheblich reduziert worden. Dieser „Trick“ ermöglicht es, dass diese Sensoren Strahlen mit deutlich höherer Leistungsdichte messen.

### 3. Rückreflektion

Ophir bietet als Schutz gegen Rückreflektion Backscatter-Filter als optionales Zubehör. Teile des reflektierten Lichts werden direkt absorbiert, andere zurück in die Sensorapertur reflektiert, so dass die Streustrahlung insgesamt um 70% reduziert werden. Der Sensor muss natürlich „wissen“, dass ein Streuschutz hinzugefügt wurde. Es gibt dazu einen separaten Kalibrierfaktor („Laser“ oder Wellenlänge-Einstellung).



Abb. 2: Der 10kW Messkopf wurde mit einem zusätzlichen Backscatter-Filter ergänzt.

### 4. Eignung für industrielle Umgebungen

Wie schon erläutert, geht es darum die Abmessungen zu reduzieren. Wie also lassen sich kleine Sensoren herstellen, die hohe Leistungen messen, ohne selbst zu überhitzen? Der Ausweg ist hier, Sensoren zu nutzen, die klein sind und nur für niedrige Laserleistungen geeignet sind. Man setzt diese Messköpfe dem Laserstrahl nur sehr kurze Zeit aus – kurz genug, dass die absorbierte Wärme gering ist aber lang genug, dass gemessen werden kann. Tatsächlich müsste die Bestrahlungsdauer extrem kurz sein, also kürzer als die Redaktionszeit für die Leistungsmessung. Die Rede ist hier vom „gepulsten Modus“. Hier die grundlegende Idee davon:

- Den Laserstrahl für eine kurze, präzise gesteuerte Zeit aktivieren
- Energie des entsprechenden Pulses messen
- Die Energie pro Zeit teilen, um so die Leistung zu erhalten

Einige Standard-Messgeräte von Ophir bieten einen „gepulsten Modus“, sprich sie berechnen die Laserleistung; der Anwender muss nur die Pulsdauer eingeben und erhält direkt die Leistung. Der „gepulste Mode“ ermöglicht die Nutzung kleiner, günstiger Standard-Thermosensoren, um Laserleistungen bis 10kW zu messen, da die Gesamt-Wärmemenge, die auf den Sensor wirkt, tatsächlich sehr gering ist.

Netzwerk-Integration in der Fertigung

Speziell für die Integration in industrielle Umgebungen wurde Ophirs „Helios“ Messgerät entwickelt. Auch das Gerät basiert auf dem Prinzip der gepulsten Leistung. In diesem Fall wird die Pulsdauer über einen integrierten schnell Photodetektor automatisch ermittelt. Bis zu 12 kW lassen sich mit dem kompakten Gerät messen, ohne dass Wasserkühlung benötigt wird. Es gibt Modelle für Profinet und für EthernetIP.



Helios-Profinet, Helios-EtherNet/IP

## 5. Stetig zunehmende Leistung

Der 120 kW Sensor wurde in diesem Artikel schon gezeigt; es handelt sich dabei um den ersten kommerziellen Sensor mit kleiner Größe und schneller Antwortzeit, der bis zu 120kW messen kann. Das Messgerät wurde für Faserlaser in der Materialbearbeitung, militärischen Anwendungen oder ähnlichem entwickelt. Im Verhältnis zu dem was es tut, ist es mit Abmessungen von 50x50cm und einer Apertur von 200mm sehr klein. Aufgrund des Wirkprinzips ist der Sensor wie eine Art schwarze Box – weniger als 1% Backscatter tragen zur Sicherheit bei.

An dieser Stelle noch ein kleiner Schwenk zur Strahlprofilmessung:



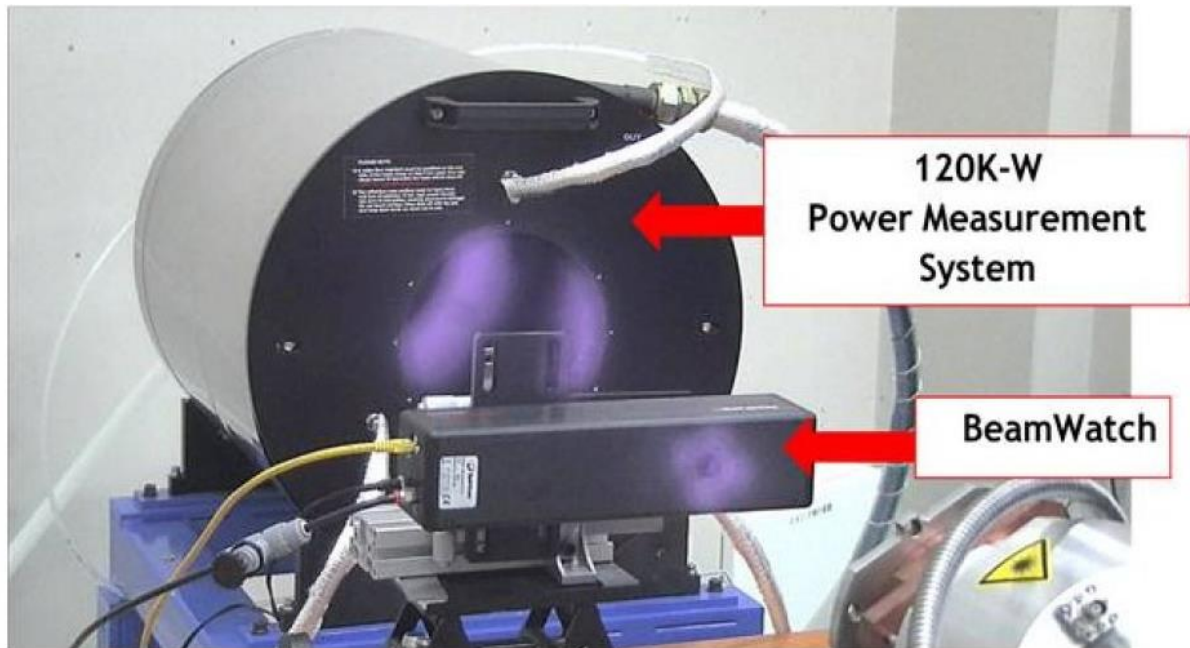


Abb. 3: Kombination aus 120 kW Leistungssensor und BeamWatch zu berührungslosen Strahlprofilanalyse.

Die Leistung eines 100kW Strahls eines Faserlasers wird hier mittels eines 120K-W-Sensor gemessen. Zunächst aber passiert der Strahl ein BeamWatch System von Ophir. Das berührungslose Strahlprofilmessgerät basiert auf einer Eigenschaft des Lichts, die als Rayleigh Streuung bekannt ist. Das hochkonzentrierte Licht um die Strahltaile wird an den Luftmolekülen der Umgebung gestreut und von einer Kamera gemessen. So kann die Strahltaile analysiert werden, ohne dass der Strahl selbst berührt wird. Das Ergebnis ist ein Strahlprofilmessgerät, das keine Wasserkühlung erfordert, keine beweglichen Teile benötigt und keine Obergrenze für die Laserleistung kennt. Durch die kamerabasierte Messung erhält man die Ergebnisse in Videorate, so dass auch die zeitabhängigen Parameter des Laserstrahls ermittelt werden.

### Fazit

Die Anwendung einer neuen, fortschrittlichen Technologie in Hinblick auf Messgeräte kann sowohl Entwicklern als auch Anwendern von Hochleistungs-Lasern helfen, ihre Prozesse zu optimieren und zu überwachen.