

Rückgeführte Laserleistungsmessung für den Multikilowatt-Leistungsbereich

Friedhelm Brandt, Holger Lecher, Stefan Kück

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

<mailto:stefan.kueck@ptb.de>

In diesem Beitrag wird über die rückgeführte Laserleistungsmessung für den Multikilowatt-Leistungsbereich berichtet. Vorgestellt wird der Kalibrieraufbau, das neue Detektornormal, die Kalibrierkette für den Hochleistungsbereich der Laserradiometrie sowie das Messunsicherheitsbudget. Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) des neuen Detektornormals beträgt derzeit 0,7 %.

1 Einführung

Hochleistungslaser im Leistungsbereich von einigen kW werden heutzutage in zahlreichen industriellen Anwendungen wie Schneiden, Schweißen, Schmelzen und Härten eingesetzt. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit mehreren Industriepartnern wird ein Messplatz für die Kalibrierung von Laserleistungsmessgeräten bis 2 kW im Wellenlängenbereich um 1,06 μm aufgebaut, wie er schon für CO₂-Laser (10,6 μm) bis 1,4 kW besteht. In diesem Artikel berichten wir über den Kalibrieraufbau, die verwendeten Normale (Detektoren), die Kalibrierkette für optische Strahlungsleistung sowie über das Messunsicherheitsbudget. Mit diesem Kalibrierangebot schließt die PTB die bisherige Lücke in ihrem Dienstleistungsbereich und ermöglicht somit die Rückführung auf ein nationales Normal für Hersteller und Anwender von Nd:YAG-, Scheiben- und Faserlasern, sowie für Messgerätehersteller und Kalibrierlaboratorien. Die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) des neuen Normals beträgt derzeit 0,7 %. Vorgestellt werden außerdem Realisierungsmöglichkeiten für die Erweiterung auf einen Leistungsbereich bis 4,5 kW.

2 Kalibrierkette und -verfahren

Die Kalibrierkette für den Hochleistungsbereich der Laserradiometrie ist in Abb. 1 gezeigt. Die Charakterisierung des Normals SCT391 wurde bereits detailliert in [1] beschrieben. Die Skala der spektralen Empfindlichkeit von Detektoren für Hochleistungslaser wird vom SCT391 auf ein weiteres, neues Normal übertragen, den EC-PM (Electrically Calibrated Power Monitor, ein modifiziertes Seriengerät der Fa. PRIMES [2]). Hierzu wird der EC-PM mit der Wellenlänge von 1,065 μm und einer Laserleistung von ca. 1 kW mit dem Normal SCT391 kalibriert.

Das Arbeitsprinzip des EC-PM ist wie folgt: Die einfallende Laserstrahlung wird mittels eines fokussierenden hochreflektierenden Spiegels durch eine Apertur in einen Hohlraumabsorber eingestrahlt, wo sie nahezu vollständig absorbiert wird.

Der Absorber ist wassergekühlt und der Temperaturanstieg ΔT und der absolute Wasserdurchfluss V_m werden gemessen. Die gemessene Laserleistung Φ ergibt sich zu:

$$\Phi = V_m c_m \Delta T \quad (1)$$

Mit c_m : spezifische Wärmekapazität des Wassers, ΔT : Temperaturanstieg, V_m : absoluter Wasserdurchfluss.

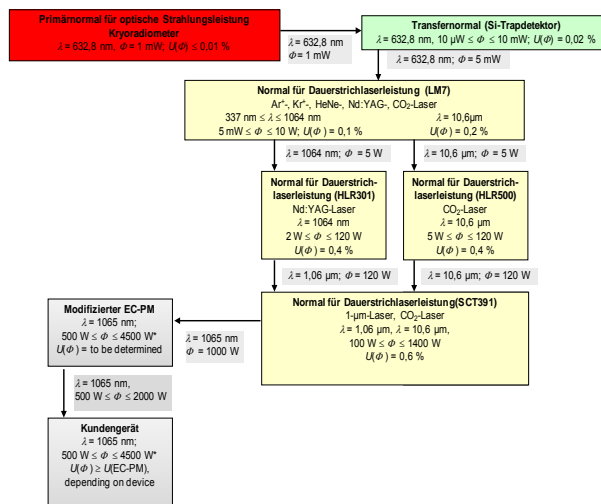


Abb. 1 Kalibrierkette für Laserradiometrie im Wellenlängenbereich um 1,06 μm und Laserleistungen bis 4,5 kW. * über elektrische Kalibrierung.

Aus der angezeigten Laserleistung und der zuvor mit dem SCT391 bestimmten Laserleistung wird der Korrektionsfaktor der Anzeige für den EC-PM ermittelt.

$$f_K = \frac{\Phi}{\Phi_{Anz}} \quad (2)$$

Die Erweiterung bis zu 4,5 kW erfolgt mittels elektrischer Kalibrierungen des EC-PMs im Leistungsbereich zwischen 500 W und 4,5 kW. Dazu ist im EC-PM eine elektrische Heizvorrichtung eingebaut. Mit dieser werden verschiedene elektrische Leistungen, die aus Gleichstrom- und Gleichspan-

nungsmessung gut berechenbar sind, in das Kühl- und Sensorsystems des EC-PMs gebracht. Daraus wird der Leistungskoeffizient ermittelt und damit ist letztlich eine Korrektur für Laserleistungsmessungen bis zu 4,5 kW möglich. Erste Messungen ergaben einen vernachlässigbar kleinen Leistungskoeffizienten.

Der optische Aufbau für die Kalibrierung von Laserleistungsempfängern im Wellenlängenbereich von 1,06 µm und für Laserleistungen bis 2 kW ist in Abb. 2 dargestellt. Die Laserstrahlung des Diodenlasers mit der nominellen Wellenlänge $\lambda = 1065 \text{ nm}$ wird durch eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 1000 µm in eine Kollimatoroptik geführt. Diese beinhaltet zusätzlich einen Strahlteiler, um einen Monitordetektor zu bestrahlen sowie ein Schutzfenster. Der dort austretende Strahl hat einen Durchmesser von ca. 22 mm. Dieser wird durch eine nachfolgende Blende gleicher Größe begrenzt. Diese Blende wird mit einer Linse der Brennweite $f = 500 \text{ mm}$ auf die Absorberebene des entsprechenden Normal oder im Austausch auf die des zu kalibrierenden Empfängers (DUT) abgebildet.

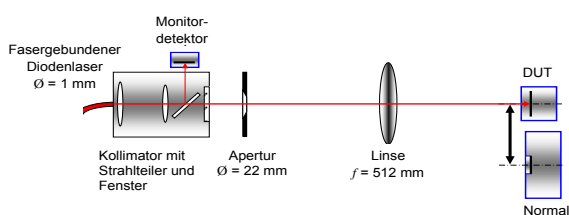


Abb. 2 Schematischer Aufbau zur Kalibrierung von Hochleistungslaserempfängern.

3 Modell der Auswertung

Die Modellgleichung für die Berechnung der Messunsicherheit lautet:

$$f_k = f_{Pr} \cdot F_{sel} \cdot F_{fk} \cdot F_{VN} \cdot F_{Aufl} \cdot F_H \cdot F_S \cdot F_{\beta\Phi} \cdot F_{Vs} \quad (3)$$

Die einzelnen Komponenten sind in der Tabelle 1 erläutert, inklusive des Wertes, der Standardmessunsicherheit, der Verteilung, des Sensitivitätskoeffizienten, des Unsicherheitsbeitrages und des Anteils an der Messunsicherheit (Index).

Für die erweiterte Messunsicherheit ($k = 2$) ergibt sich derzeit ein Wert von ca. 0,7 %.

4 Zusammenfassung/Ausblick

Die Realisierung eines Kalibriermessplatzes für Hochleistungsempfänger für Laserstrahlung im Multikilowatt-Leistungsbereich bei Wellenlängen um 1,06 µm wurde vorgestellt. Das Messunsicherheitsbudget wurde dargelegt. Derzeit sind Kalibrierungen noch mit dem Normal SCT391 bis 1,4 kW mit einer erweiterten Messunsicherheit von 0,7 % ($k = 2$) möglich. Zukünftig soll der Leistungsbereich mit dem neuen Normal EC-PM und mittels elektrischer Kalibrierung auf bis zu 4,5 kW erweitert werden und in das Dienstleistungsangebot der PTB Eingang finden.

Literatur

- [1] F. Brandt, K. Möstl, "Kalibrierung von Leistungsmeßgeräten für Hochleistungslaser", in *Laser in Forschung und Technik*, ed. by W. Waidelich, p. 730 - 733, Springer-Verlag, Berlin, 1996
- [2] www.primes.de;
http://www.primes.de/index.php?lang=de&site=produkte_detail&subnav=produkte&c_id=&p_id=15

Größe	Beschreibung	Wert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
f_{Pr}	gemessener Korrektionsfaktor des EC-PM	1,001872	$224 \cdot 10^{-6}$	Normal	1,0	$220 \cdot 10^{-6}$	0,4 %
F_{sel}	Faktor für die normierte elektrische Empfindlichkeit des Normals SCT391	1,00000	$1,24 \cdot 10^{-3}$	Normal	1,0	$1,2 \cdot 10^{-3}$	12,7 %
F_{fk}	Faktor für den Korrekturfaktor f_k des Normals	1,00000	$2,85 \cdot 10^{-3}$	Normal	1,0	$2,9 \cdot 10^{-3}$	67,0 %
F_{VN}	Faktor für die Temperaturdifferenz des Normals	1,00000	$577 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	1,0	$580 \cdot 10^{-6}$	2,7 %
F_{Aufl}	Faktor für die Auflösung des EC-PM	1,00000	$72,2 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	1,0	$72 \cdot 10^{-6}$	0,0 %
F_H	Faktor für die Inhomogenität des Normals	1,00000	$1,15 \cdot 10^{-3}$	Rechteck	1,0	$1,2 \cdot 10^{-3}$	11,0 %
F_S	Faktor für die Streustrahlung	1,00000	$577 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	1,0	$580 \cdot 10^{-6}$	2,7 %
$F_{\beta\Phi}$	Faktor für die Leistungsabhängigkeit des Normals	1,00000	$289 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	1,0	$290 \cdot 10^{-6}$	0,7 %
F_{Vs}	Faktor für die Durchflussabhängigkeit des Normals	1,00000	$577 \cdot 10^{-6}$	Rechteck	1,0	$580 \cdot 10^{-6}$	2,7 %
f_k	berechneter Korrektionsfaktor des EC-PM	1,00187	$3,49 \cdot 10^{-3}$				

Tab. 1 Messunsicherheitsbudget für die Kalibrierung des EC-PMs mit dem Normal SCT391