

Charakterisierung von ultrahellen LEDs für den Einsatz in der digitalen Holographie

S.Stürwald*, B. Kemper*, C. Remmersmann*, P. Langehanenberg*, C. Denz**, G.von Bally*

* Labor für Biophysik, **Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Stuerwald@uni-muenster.de

Für eine Reduzierung des Rauschens in digitalholographischen Aufbauten wurden handelsübliche LEDs charakterisiert und deren Eignung für die kurzkohärente Interferometrie untersucht. Die hierbei erzielten Ergebnisse zeigen, dass digitale Holographie unter Verwendung von räumlich phasenschiebenden Methoden möglich ist.

1 Einführung

Digitalholographische Verfahren ermöglichen eine berührungslose Detektion von optischen Weglängenänderungen mit interferometrischer Genauigkeit, die im Falle der Reflexionsgeometrie durch die Form des Objektes und bei Transmission durch dessen Brechungsindex verursacht werden. Kurzkohärente Lichtquellen eröffnen hierbei Möglichkeiten zur Verminderung von kohärentem Rauschen und Rauschen durch Mehrfachreflexionen. Daher wurden Untersuchungen an ultrahellen, auf InGa-AlP-basierten Standard-LEDs der Größe 5 mm durchgeführt, die eine Helligkeit von bis zu 25 Cd aufweisen. Die hierbei verwendeten LEDs besitzen Emissionsspektren im roten, gelben, grünen sowie blauen Spektralbereich (Abb.1 links).

2 Spektrale Eigenschaften der LEDs

Zunächst erfolgte die Untersuchung der Spektralverteilungen $B(\lambda)$ (λ : Lichtwellenlänge) der LEDs mit einem Spektrometer des Typs HR2000+ (Ocean Optics, Auflösung: 0,45 nm). Die in Abb.1 exemplarisch dargestellten gaußförmigen Spektren zeigen, dass die untersuchten grünen LEDs sowie die blaue LED spektrale Halbwertsbreiten $\Delta\lambda$ im Bereich von 30 nm aufweisen. Die gelben sowie roten LEDs besitzen hingegen spektrale Breiten von ca. 13 bzw. 15 nm. Abweichungen der Spektren bei einem LED-Typ sind vernachlässigbar. Die spektrale Breite $\Delta\lambda$ sowie die Mittenwellenlänge λ_0 zeigen Abhängigkeiten von den Betriebssparametern, die primär durch thermodynamische

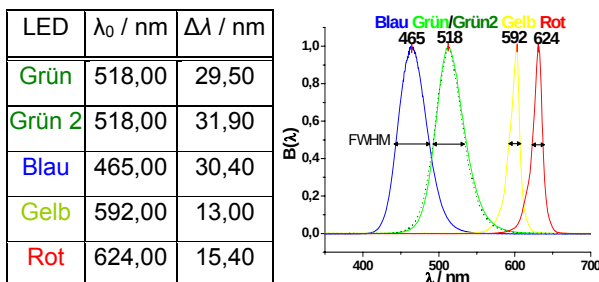


Abb.1: links: Mittenwellenlänge λ_0 und spektrale Breite $\Delta\lambda$ der untersuchten LEDs, rechts: LED-Spektren $B(\lambda)$

Prozesse verursacht werden. Die Mittenwellenlänge λ_0 nimmt bei den untersuchten LEDs mit zunehmendem Strom I_e ab. 30 s nach dem Einschaltvorgang werden ein stabiles Spektrum und eine konstante Lichtintensität erreicht. Die Lichtintensität lässt sich bei Raumtemperatur bei einem Betriebsstrom $I_e=70-80$ mA unterhalb der Zerstörungsschwelle der LEDs maximieren.

3 Kohärenzeigenschaften der LEDs

Für gaußförmige Spektralverteilungen $B(\lambda)$ kann die theoretische Kohärenzlänge im Frequenz- sowie im Ortsraum berechnet werden [1]. Im Frequenzraum errechnet sich die Kohärenzlänge durch $L_{C1} \approx \lambda_0^2 / \Delta\lambda$. Die Intensität von interferierenden Wellen $I(S)$ in Abhängigkeit der optischen Weglängendifferenz S berechnet sich theoretisch über die fouriertransformierte Spektralverteilung $B(\kappa)$. Mit $\kappa_0 = 1/\lambda_0$, der Konstanten B_0 und $a = \sqrt{\pi / 4 \ln(2) \text{FWHM}(\kappa)}$ ergibt sich:

$$I(S) = B_0 \exp(-\pi a^2 S^2) \cos(2\pi \kappa_0 S) \quad (1.1)$$

Diese Funktion entspricht der Autokorrelationsfunktion der interferierenden Wellenfelder, welche sich experimentell durch die Aufzeichnung der Intensitätsverteilung bei Variation von S in einem Michelson-Interferometer ermitteln lässt (Abb.2). Mit Hilfe des Wiener-Khinchine-Theorems (Gl. 1.1) berechnet sich die Kohärenzlänge im Ortsraum über die Halbwertsbreite der Einhüllenden von $I(S)$. Die theoretischen aus dem Spektrum sowie experimentell mittels eines Michelson-Interferometers bestimmten Kohärenzlängen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Werte L_{C1} weisen dabei höhere Werte als L_{C2} auf. Dies ist auf den nicht berücksichtigten Einfluss der räumlichen Kohärenz der Lichtquelle sowie auf

	Grün1	Grün2	Blau	Gelb	Rot
L_{C1} / μm	7,8	7,1	6,1	23	21,4
L_{C2} / μm	$3,9 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,3$	$12,7 \pm 1,1$	$16,0 \pm 1,2$

Tab.1: theoretische (L_{C1}) sowie experimentelle Kohärenzlängen (L_{C2}) der untersuchten ultrahellen LEDs

den Grad der räumlichen Filterung zurückzuführen.

4 Dispersion

Die spektrale Breite der LEDs erfordert eine Analyse der Dispersionseigenschaften des in den optischen Aufbauten verwendeten Glases. Experimentell ergibt sich eine Korrelogrammverbreiterung (Abb.2).

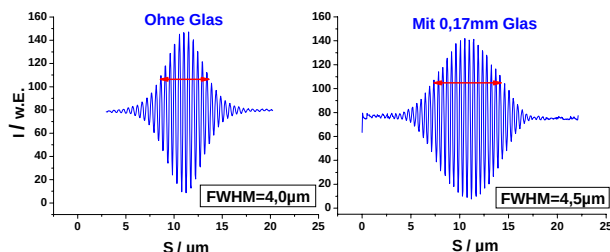


Abb.2: Experimentell bestimmte Korrelogramme mit und ohne zusätzlichem Glas in einem Interferometerarm

Die geometrische Weglängendifferenz s_g im dispersiven Medium ist gegeben durch $s_g = s_0/n_g$, wobei n_g den Gruppenbrechungsindex und s_0 die optische Weglängendifferenz im dispersiven Medium bezeichnet. Der Parameter n_g ist in diesem Fall durch die Rayleigh-Beziehung $n_g = n - \lambda(dn/d\lambda)$ gegeben. Theoretisch lässt sich hieraus eine veränderte Halbwertsbreite L_{Cn} der Korrelationsfunktion ableiten:

$$L_{Cn} = \sqrt{L_{C2}^2 \left(\frac{dn_g}{d\lambda} s_g \cdot \Delta\lambda \right)^2} \quad (1.2)$$

Theoretische und experimentell bestimmte Halbwertsbreiten L_{Cn} unter Verwendung von 0,17mm dicken Mikroskop-Deckgläsern sind in Tab. 2 exemplarisch aufgeführt.

Glasdicke	L_{Cn} (Experiment)	Fehler	L_{Cn} (Theorie)
/ mm	/ µm	/ µm	/ µm
0,00	6,0	1,1	6,0
0,17	6,6	1,1	7,0
0,34	9,0	1,3	9,3
0,51	12,7	3,3	12,2

Tab.2: Halbwertsbreite der Einhüllenden des Korrelogramms in Abhängigkeit von der Glasdicke in einem Interferenzarm (rote LED)

Bei Gleichverteilung des dispersiven Mediums (BK7-Glas) in beiden Armen des Interferometers wurden bei Glasdicken im Millimeterbereich keine Auswirkungen auf die Halbwertsbreite im Rahmen der Messunsicherheit detektiert.

5 Digitalholographische Mikroskopie

Zur Realisierung eines digitalholographischen Mikroskops mit LEDs wurde ein Off-axis Michelson-Interferometer in Linnik-Anordnung verwendet (Abb.4).

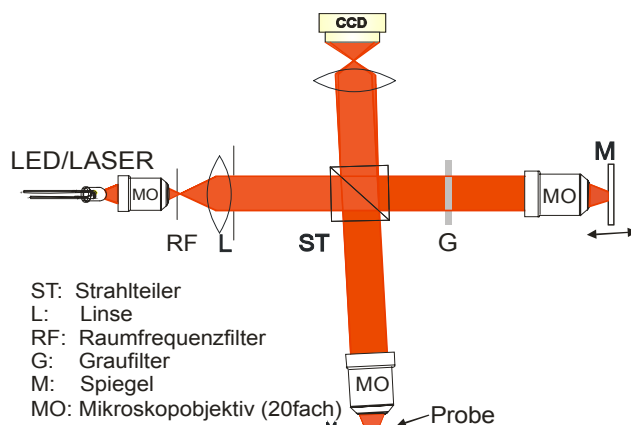


Abb.3: Michelson-Interferometer in Linnik-Anordnung

Hierzu ist ein räumliches Trägerstreifensystem notwendig, dessen Streifenanzahl durch die begrenzte Kohärenzlänge der LEDs eingeschränkt ist (Abb.4). Für die Erfordernisse des räumlichen Phasenschiebens sind aufgrund ihrer Kohärenzlänge (13-16µm) die roten sowie gelben LEDs geeignet. Die Rekonstruktion der Hologramme erfolgt mit einer beugungsfreien digitalholographischen Rekonstruktionsmethode [2].

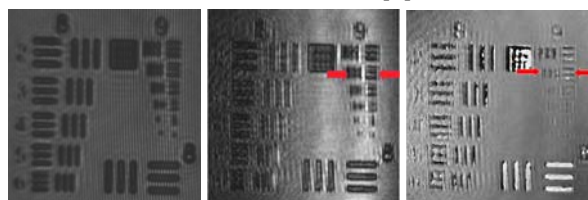


Abb.4: Auflösungsbestimmung der LED-basierten digitalholographischen Mikroskopieanordnung (rote LED) mittels USAF 1951 Testchart: Hologramm (links), rekonstruierte Amplituden- (Mitte) und Phasenverteilung (rechts)

Auflösung	Lateral / µm	Axial / rad
LED (rot)	1,73	0,08
LASER	>1,73	0,23

Tab.3: Bestimmung der lateralen und axialen Auflösung aus Abb.4 im Vergleich zum Laser ($\lambda = 632\text{nm}$)

6 Zusammenfassung

Es wurden verschiedene ultrahelle LEDs auf Ihre Kohärenzeigenschaften hin untersucht. Die maximalen Kohärenzlängen der untersuchten LEDs liegen im Bereich von 13-16 µm (rot, gelb). Zudem wurde demonstriert, dass mit ultrahellen LEDs räumlich phasenschiebende digitale Holographie möglich ist und das Rauschen im Vergleich zum Laser reduziert wird.

Literatur

- [1] L. Bergmann-Schäfer: "Optics of waves and particles", (Walter de Gruyter, 1999)
- [2] B. Kemper, D. Carl, J. Schnekenburger, I. Bredebusch et al., "Investigations on living pancreas tumor cells by digital holographic microscopy", J. Biomed. Opt., 11 034005 (2006)