

Partielle Kohärenz beim Shack-Hartmann Test

Ulrich Berg, Norbert Lindlein, Johannes Schwider

Institut für Optik, Information und Photonik, Universität Erlangen-Nürnberg

<mailto:uberg@optik.uni-erlangen.de>

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluss des Kohärenzgrades auf die Shack-Hartmann Messung. Es gibt Messsituationen, bei denen es wünschenswert ist, den Kohärenzgrad künstlich zu senken, um Speckle zu vermeiden. Dies ist dann der Fall, wenn der Messaufbau mit gestreutem Licht arbeitet, z.B. bei Aberrationsmessungen am Auge (Netzhautstreuung).

1 Einführung

Der Shack-Hartmann Test ist ein einfaches und robustes Messverfahren der optischen Messtechnik.

Er kann sowohl für die Durchlichtprüfung, als auch für Messungen in Reflexion eingesetzt werden.

Ein besonderes Einsatzgebiet stellen die Messsituationen dar, bei denen Streuung an einer rauen Oberfläche vorkommt. Ein Beispiel dafür ist die Messung der Aberrationen des menschlichen Auges (Abb. 2).

Hier können durch den Streuprozess an der Netzhaut bei zu hoher spatialer Kohärenz Speckle auftreten.

Ein Vorteil des Shack-Hartmann Tests ist jedoch, dass er nur geringe Ansprüche an die spatiale Kohärenz der Wellenfront stellt. Durch eine gezielte Absenkung des Kohärenzgrades lässt sich das Auftreten des Speckle-Effekts unterdrücken.

2 Messprinzip

Beim Shack-Hartmann Test wird die zu messende Wellenfront mit einem Mikrolinsenarray auf Subaperturen aufgeteilt und die so entstehenden Spots in der Brennebene der Mikrolinsen detektiert. Die lateralen Fokusablagen $\underline{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y)$ der einzelnen Subaperturen erlauben es, die mittlere Wellenfrontsteigung über einer Mikrolinse zu bestimmen und damit auf die Wellenfront zurück zu schließen.

Dies ist in Abb. 1 veranschaulicht. Für die Wellenfrontsteigung gilt dabei

$$\frac{\partial W}{\partial x} \approx \frac{\sigma_x}{f}; \frac{\partial W}{\partial y} \approx \frac{\sigma_y}{f}, \quad (1)$$

wobei σ_x , σ_y die jeweiligen Komponenten der Spotablage $\underline{\sigma}$ und f die Brennweite der Mikrolinsen angibt. W bezeichnet die optischen Weglängen.

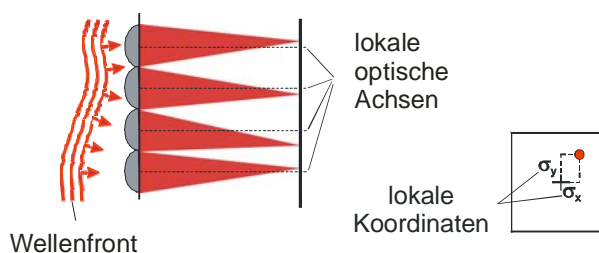


Abb. 1 Das Messprinzip des Shack-Hartmann Sensors. Die zu messende Wellenfront fällt durch ein Mikrolinsenarray. Aus den Ablagen σ der Spots in der Detektionsebene gewinnt man die Steigung der Wellenfront über der jeweiligen Subapertur.

Die Spotpositionen werden dabei als Intensitätsschwerpunkte bestimmt, wobei ein Spot mehrere Pixel Durchmesser hat. Auf diese Weise ist es möglich eine Subpixelauflösung zu erzielen.

Durch einen Kontinuierungsalgorithmus ist es möglich auch stark deformierte Wellenfronten noch zu messen, bei denen die Spots ihre Subaperturen verlassen [1].

3 Aberrationsmessung

Der Shack-Hartmann Test wird bereits seit geraumer Zeit zur Aberrationsmessung am Auge eingesetzt [2].

Um jedoch auch ungerade Aberrationen korrekt erfassen zu können, muss man dabei „Doppelpass“-Effekte unterdrücken. D.h. die Aberrationen dürfen nur bei einem Durchgang durch das optische System des Auges zum Tragen kommen.

Dies erreicht man durch eine asymmetrische Doppelpassmessung. Hierbei beleuchtet man das Auge mit einem dünnen Strahlenbündel, um auf dem Hinweg den Einfluss der Augenaberrationen zu minimieren. Die Hornhaut und Linse des Auges formen einen Fokus auf der Netzhaut. Dieser kann als neue Punktlichtquelle im Auge aufgefasst werden [3]. Die Wellenfront des von der Netzhaut zurückgestreuten Lichts wird dann über die gesamte Augenpupille vermessen (Siehe Abb. 2).

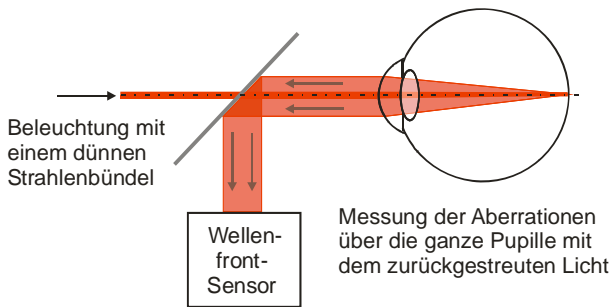


Abb. 2 Messung der Augenaberrationen mit einer asymmetrischen Doppelpassanordnung.

4 Kohärenzaspekte

Diese Art der Aberrationsmessung beinhaltet notwendigerweise den Streuprozess an der Netzhaut. Wie eingangs bereits erwähnt, ist dies problematisch, wenn man mit Licht hoher spatialer Kohärenz beleuchtet. Dann treten im Spotfeld des Shack-Hartmann Sensors sog. Speckle auf. Dies äußert sich in starken Intensitätsschwankungen über das Feld. Da die Auswertung der Spots im Shack-Hartmann Test über die Bestimmung der Intensitätsschwerpunkte erfolgt, kann dies zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

Um eine hohe Präzision der Messung zu gewährleisten, ist es deshalb wünschenswert, den Kohärenzgrad gezielt zu erniedrigen (z.B. durch eine rotierende Streuscheibe in der Beleuchtung).

Abb. 3 zeigt zwei Spotfelder und die jeweils rekonstruierte Wellenfront. Die Aufnahmen erfolgten bei hoher Kohärenz (links) und niedriger Kohärenz (rechts). Im kohärenten Fall schwankt die Intensität stark über das Feld, was dazu führt, dass einige Spots nicht auswertbar sind. Im partiell kohärenten Fall sind die Spots zwar leicht verbreitert, aber die Intensität der Spots über das Feld ist homogener.

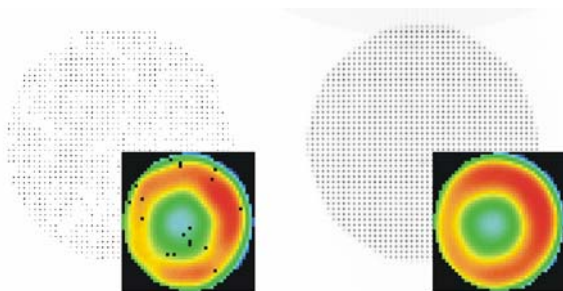


Abb. 3 Messungen an einem Modellauge. Spotfelder (Grauwerte invertiert) und rekonstruierte Wellenfront. Links bei einem hohen, rechts bei einem niedrigen Kohärenzgrad.

Ein niedrigerer Kohärenzgrad bedeutet jedoch, dass statt einer einzigen Wellenfront ein Planwellenspektrum auftritt, die Wellenfront also nicht mehr wohldefiniert ist. Auch dies kann unter Umständen zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen.

Um diese Zusammenhänge genauer zu untersuchen, führen wir Messungen bei unterschiedlichen Kohärenzgraden an einem Modellauge durch.

Abb. 4 zeigt den Aufbau mit der Beleuchtungseinheit zum gezielten Einstellen eines Kohärenzgrades. Die Kohärenz wird dabei durch eine rotierende Streuscheibe zunächst zerstört und dann durch einen Satz unterschiedlicher Lochblenden präpariert.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen führen wir auch Computersimulationen durch.

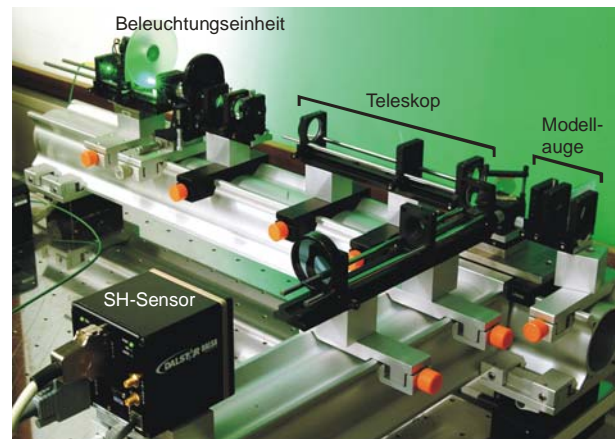


Abb. 4 Aufbau zur Untersuchung der Shack-Hartmann Messung bei unterschiedlichen Kohärenzgraden.

5 Zusammenfassung

Um bei der Aberrationsmessung eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, ist es sinnvoll, Kohärenzaspekte zu beachten. Dabei muss man jedoch abwägen:

Einerseits bedingt ein zu hoher Kohärenzgrad Speckle, was die Auswertung der Spotfelder verfälscht. Andererseits führt ein zu niedriger Kohärenzgrad dazu, dass die zu messende Wellenfront nicht mehr wohldefiniert ist.

Dieses Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie im Rahmen der Leitprojekte Medizintechnik gefördert.

Literatur

- [1] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider, *Dynamic range expansion of a Shack-Hartmann sensor by use of a modified unwrapping algorithm*, Opt. Lett. Vol. 23, No. 13, pp. 995-997, (1998)
- [2] J. Liang, B. Grimm et al., *Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor*, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 11, No. 7, pp. 1949-1957, (1994)
- [3] L. Diaz Santana, J. C. Dainty, *Effects of retinal scattering in the ocular double-pass process*, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 18, No. 7, pp. 1437-1444, (2001)