

## Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformationen für Lehrer

### Thema: Szintillation, Speckles und adaptive Optik in der Modellsprache des Schulunterrichtes

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

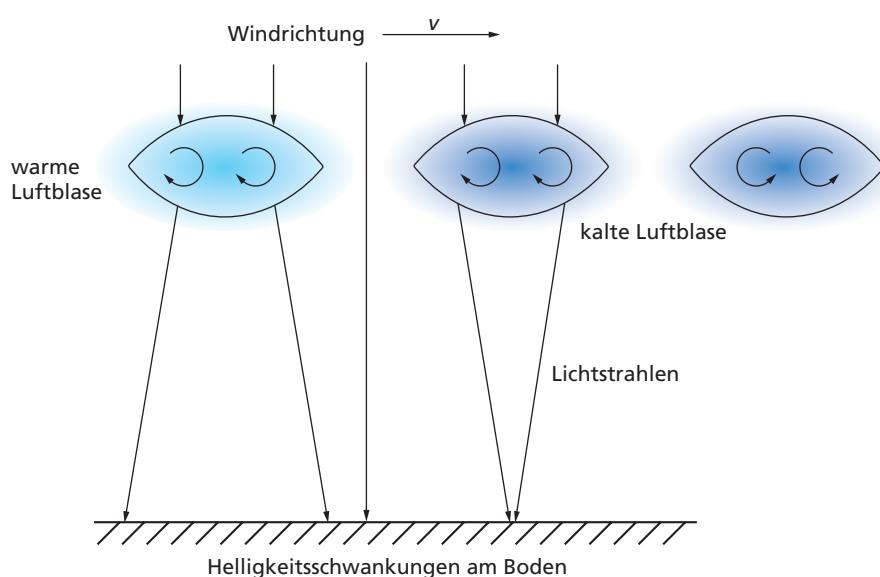
Unter einer adaptiven Optik versteht man ein System, welches sich aktiv an Veränderungen im Strahlengang des Lichtes anpassen kann. Obgleich die breitere Öffentlichkeit vor allem durch die Astronomie auf die Existenz dieser Technologie aufmerksam gemacht wurde, sind adaptive Systeme mittlerweile in vielen Arbeitsgebieten unaufhaltsam auf dem Vormarsch: Man wendet sie schon vereinzelt bei der Materialbearbeitung durch Laser, in der medizinischen Optik oder in der Mikroskopie an. Es ist also durchaus nicht unwahrscheinlich, dass einige der heutigen Schüler in ihrem späteren Berufsleben einmal mit der adaptiven Optik in Berührung kommen werden.

Die Astronomie bietet neben der motivierenden Wirkung, die zweifellos von gestochen scharfen Himmelsaufnahmen ausgeht, einen sehr schönen Einstieg in das Themengebiet. Mit der Helligkeitsszintillation – dem landläufig als Sternefunkeln bekannten Effekt – steht nämlich ein Himmelsphänomen zur Verfügung, dass jeder Schüler leicht selbst beobachten kann und von dem ausgehend man den Erklärungsbogen über die durch Luftturbulenzen bedingte Auflösungsgrenze passiver Teleskope hin zum Begriff der Speckles und zur adaptiven Optik spannen kann. Dieser Erklärungsbogen soll nachfolgend dargestellt werden.

#### Einfache Modelle und Abschätzungen

Um das Thema überhaupt schulgerecht aufbereiten zu können, bedarf es einiger drastischer Vereinfachungen des statistischen Modells der turbulenten Atmosphäre. Infolge dieser Einschränkungen ergeben sich dann zwar auch nur ganz grobe Näherungswerte bei den numerischen Abschätzungen, wesentliche Erkenntnisse werden aber dennoch reproduziert.

Abbildung 1:



#### Atmosphärische Zellen als Linsen

Wie in der Abbildung 1 gezeigt, stellen wir uns die Turbulenzen der Erdatmosphäre modellmäßig als 10–30 cm große, linsenförmige Gasblasen vor, die in vertikaler Richtung ruhen und sich (egal in welcher Höhe

sie sich befinden) parallel zum Erdboden mit der gleichen konstanten Geschwindigkeit  $v$  bewegen. Diese Gasblasen wirken in unserer Idealisierung, je nachdem, ob sie eine größere oder kleinere Dichte als die Umgebung besitzen, als Sammel- oder Zerstreuungslinsen für das Sternenlicht. Mithilfe dieser Annahmen kann man ungefähr die Höhe der Turbulenzzellen in der Erdatmosphäre abschätzen, welche die Helligkeitsszintillation hervorrufen: *Man schätzt die Höhe über dem Erdboden, in der atmosphärische Turbulenzen die Helligkeitsszintillation hervorrufen.*

**Analyse:** Die Turbulenzzellen wirken wie Linsen auf das einfallende Licht. Am Boden erscheint ein Stern heller oder dunkler, wenn sein Licht durch diese Linsen merklich zerstreut oder gebündelt wird. Der Brechungsindex  $n$  kann innerhalb der Erdatmosphäre maximal um den Wert  $\approx 10^{-4}$  variieren (von 1,000292 in Bodennähe auf 1 an der oberen Atmosphärengrenze). Durch Lufttemperatur- und Luftdichteschwankungen werden Veränderungen von  $n$  in der Größenordnung von  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  hervorgerufen. Als mittleren Wert darf man für den Unterschied von  $n$  innerhalb und außerhalb der Luftblase einen Zahlenwert von  $10^{-5}$  annehmen. Zur Höhenabschätzung geht man davon aus, dass die maximale Helligkeitsveränderung gerade dann ausgelöst wird, wenn Turbulenzzellen, die als Sammellinsen wirken, gerade um ihre Brennweite vom Erdboden entfernt sind.

**Berechnung:** Für die Brennweite  $f$  einer dünnen Linse mit den Krümmungsradien  $r_1$  und  $r_2$  und der Brechzahl  $n$  im Vakuum gilt:

$$f = \frac{r_1 \cdot r_2}{(n - 1)(r_2 - r_1)} \quad (\text{der zweite Krümmungsradius zählt negativ!})$$

mit  $r_1 = r_2 \approx 0,1$  m und  $n - 1 = 10^{-5}$  folgt

$$\underline{f \approx 5\,000 \text{ m}}$$

*Die Helligkeitsszintillation entsteht hauptsächlich durch Turbulenzen in einigen Kilometern Höhe über dem Erdboden.*

Wie man sich anschaulich anhand der Abbildung leicht verdeutlichen kann, machen sich die durch den Linseneffekt verursachten Intensitätsschwankungen am Boden in Bereichen von einigen Zentimetern bemerkbar. Beobachtet man mit kleiner Empfangsfläche – etwa dem menschlichen Auge – so nimmt man die Helligkeitsveränderungen infolge der vertikalen Bewegung der Konvektionszellen zeitlich nacheinander wahr. Bei den größeren Empfangsflächen von Spiegelteleskopen werden jedoch mehrere Turbulenzzellen gleichzeitig erfasst. Die Helligkeits- und Richtungseffekte überlagern sich und erzeugen eine körnige Struktur, die Speckles.

### Die „verbogene“ Wellenfront

Die folgende Überlegung ermöglicht eine wellenlängenunabhängige Abschätzung für die Deformation, die eine ebene Wellenfront beim Durchlaufen der Atmosphäre erfährt.

**Analyse:** Die Deformation der einlaufenden ebenen Wellenfront wird durch zwei Effekte bedingt. Dies sind die Richtungsänderung infolge der Brechung an Konvektionszellen und die langsamer oder schneller erfolgende Wellenausbreitung in kalten bzw. warmen Konvektionsblasen. Wir schätzen nachfolgend lediglich die Auswirkung der Ablenkung durch die Brechung. Dadurch entsteht ein Wegunterschied  $\Delta l = l - l_0$  zwischen einem geradlinigen und einem abgelenkten Lichtstrahl bis zum Erreichen des Erdbodens, der sich großenordnungsmäßig aus dem abgebildeten rechtwinkligen Dreieck ergibt (s. Abb. 2).

**Berechnung:** Mit  $r = 0,1 \text{ m}$  und  $l_0 = 5000 \text{ m}$  folgt für  $l$ :

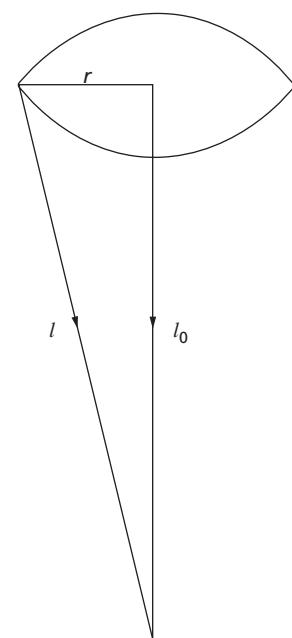
$$l = \sqrt{l_0^2 + r^2}$$

$$l = 5000,000001 \text{ m}$$

$$\Delta l = l - l_0 = 1 \mu\text{m}$$

Zieht man in Betracht, dass das Licht bis zum Erreichen des Teleskops mehrere Turbulenzzellen durchläuft, so erhält man typische Größenordnungen von einigen  $\mu\text{m}$  für die Verformung der Wellenfront. Für relativ langwelliges Licht (z. B. Infrarot mit einer Wellenlänge von  $10 \mu\text{m}$ ) ist diese Störung immer noch kleiner als die Wellenlänge und fast zu vernachlässigen. Für sichtbares Licht (z. B. grünes Licht mit einer Wellenlänge von  $0,5 \mu\text{m}$ ) beträgt die Deformation der Wellenfront schon mehrere Wellenlängen. Soll die adaptive Optik diese Deformation ausgleichen, dann muss sie das Oberflächenniveau eines Spiegels im Bereich von einigen  $\mu\text{m}$  verändern können.

Abbildung 2:



### Steuer- und Regelzeiten der adaptiven Optik

Die Änderung der Spiegelform ist aber nur eine Seite des Problems, die andere Seite ist die Zeit, in der dies erfolgen muss.

*Man schätzt die Zeit, in der sich die Deformation der Wellenfront merklich ändert.*

**Analyse:** Die Geschwindigkeit, mit der sich die Wellenfront merklich ändert, wird großenordnungsmäßig durch die Zeit  $t$  bedingt, in der sich die Anordnung der über dem Teleskop befindlichen Turbulenzen verändert. Als *grobe Abschätzung nach oben* kann man annehmen, dass dies der Fall ist, wenn sich die Turbulenzen um die Wegstrecke ihrer eigenen Abmessungen weiterbewegt haben. Dies geschieht infolge der horizontalen Windbewegung.

**Berechnung:** Bläst der Wind mit rund  $v = 10 \text{ m/s}$ , so ergibt sich für typische Turbulenzzellen von  $20 \text{ cm}$  Größe eine Anpassungszeit  $t$  von:

$$t = \frac{s}{v} = 0,02 \text{ s}$$

Solche Verformungszeiten des optischen Systems lassen sich mit den heutigen Rechengeschwindigkeiten der Computer und mit den Ansteuerungszeiten der mechanischen Stelleinrichtungen erreichen.

## **Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen**

Abbildung 1: Eigenes Bild

Abbildung 2: Eigenes Bild