

## Endlich scharf sehen

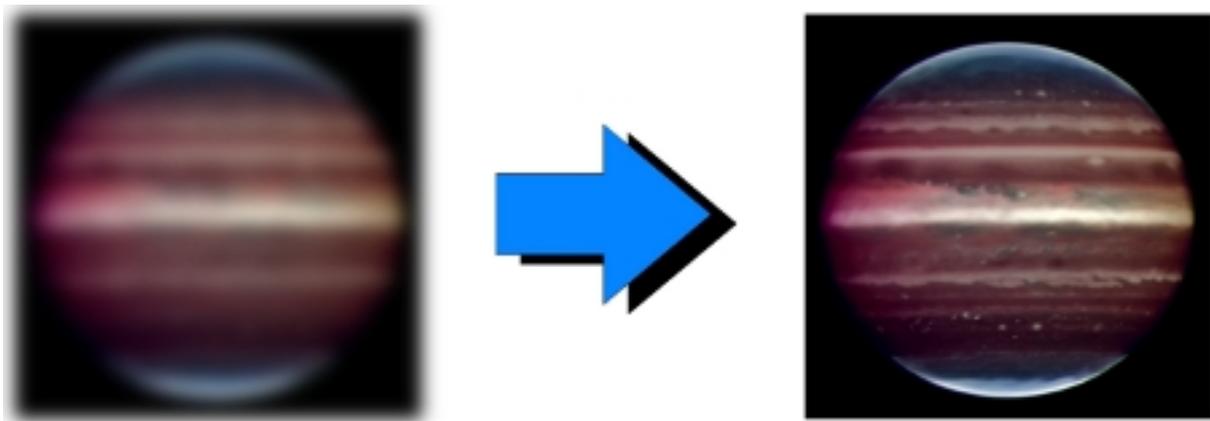
### Brillen für Teleskope oder „Wie funktioniert die adaptive Optik?“

**Monika Maintz**

Adaptive Optik ist ein Verfahren, mit dem die Abbildungsqualität von optischen Systemen deutlich verbessert werden kann. Wichtig ist das besonders in der Astronomie, wenn man mit Teleskopen vom Erdboden aus beobachten will. Als problematisch erweist sich dabei stets, dass man durch die Erdatmosphäre „hindurchschauen“ muss oder anders ausgedrückt, dass das Licht der Himmelsobjekte die Atmosphäre erst durchqueren muss, bevor es ins Teleskop gelangt.

Da es in der Atmosphäre Luftschichten mit kalter und warmer Luft gibt, kommt es zu Turbulenzen, die die Ausbreitung der Lichtwellen stören. Dies führt dazu, dass das Licht verzerrt am Boden ankommt. Aufnahmen von Himmelsobjekten werden dadurch unscharf (Abb. 1, links) und besonders die großen Teleskope bleiben mit ihren Abbildungsqualitäten weit unter ihren theoretischen Möglichkeiten.

Um die störenden Einflüsse der Atmosphäre auszuschalten, wurde die adaptive Optik entwickelt. Dahinter steckt die Idee, die verzerrten Lichtwellen wieder zu entzerren und so scharfe und hochaufgelöste Aufnahmen vom Erdboden aus zu ermöglichen (Abb. 1, rechts). Der Beitrag führt qualitativ in die Thematik ein und beschreibt mit einfachen Worten, warum die adaptive Optik für die Astronomie so wichtig ist und wie sie funktioniert. Der Schwerpunkt liegt darauf, die Inhalte leicht zugänglich und verständlich zu machen. Daher eignet er sich sowohl für Lehrer, die sich einen schnellen Überblick über das Thema verschaffen oder es im Unterricht behandeln möchten, als auch für Schüler, die sich für die Thematik interessieren. Der Beitrag kann auch als Einstieg in eine quantitative Betrachtung der adaptiven Optik verwendet werden.

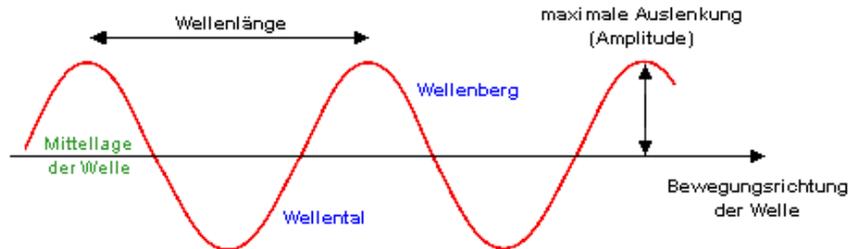


*Abbildung 1: Jupiter fotografiert im Infrarotlicht. (Bild: ESO)*

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Astronomie	Beobachtung	Adaptive Optik, Luftunruhe
Physik	Wellenlehre, Optik	Eigenschaften von Wellen, Wasserwellen, Wellenausbreitung, Kreiswellen, Wellenfronten, Interferenz, Lichtwellen, optische Abbildung
Verknüpfungen	Astro / Physik	

## 1) Wie breitet sich Licht aus?

Licht breitet sich aus wie eine Welle. In Abbildung 2 sind einige charakteristische Eigenschaften einer Welle dargestellt: Eine Welle schwingt um ihre Mittellage. Die maximale Auslenkung der Welle in Bezug auf ihre Mittellage nennt man die Amplitude der Welle. Die Wellenlänge lässt sich recht einfach bestimmen, wenn man den Abstand zweier aufeinander folgender Wellenberge oder Wellentäler misst.



**Abbildung 2:** Charakteristische Eigenschaften einer Welle. (Bild: Wikipedia, Monika Maintz)

Um besser zu verstehen, wie sich Wellen verhalten, machen wir Versuche mit Wasserwellen. Wir beobachten, wie Wasserwellen entstehen, wie sie sich ausbreiten und was passiert, wenn sie sich überlagern.

**Versuch 1:** Fülle eine große Schüssel oder Wanne ein paar Zentimeter hoch mit Wasser. (Wird der Versuch zu Hause durchgeführt, eignet sich ein Badezimmer mit Badewanne sehr gut als Versuchslabor.) Berühre die Wasseroberfläche mit einem Finger in kurzen, regelmäßigen Abständen. Was passiert?

Eine Wasserwelle entsteht und breitet sich kreisförmig um den Finger aus. Auf der Wasseroberfläche bilden sich Wellenberge und Wellentäler, die in gleichmäßigen Abständen vom Finger weg nach außen laufen. Wegen ihrer Form nennt man diese Art von Welle *Kreiswelle*.

**Versuch 2:** Berühre nun die Wasseroberfläche gleichzeitig mit zwei Fingern in kurzen, regelmäßigen Abständen. Was passiert?

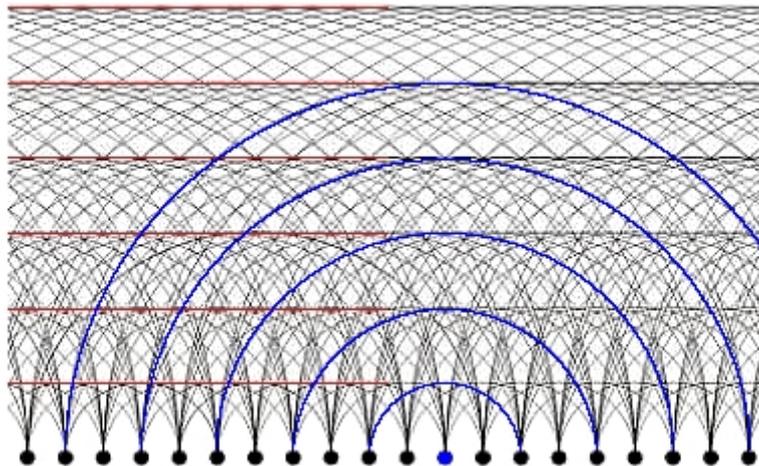
Um jeden Finger breitet sich eine Kreiswelle aus. Es gibt Bereiche, durch die beide Wellen gleichzeitig hindurchlaufen. Dort überlagern sie sich und es entsteht ein charakteristisches Wellenmuster.<sup>1</sup>

Wichtig bei diesen Versuchen sind folgende Beobachtungen:

- 1.) Ein punktförmiges Erregungszentrum (z.B. ein Finger) erzeugt eine Welle, die sich kreisförmig um das Erregungszentrum ausbreitet (Kreiswelle).
- 2.) Einzelne Wellen überlagern sich (physikalisch exakt: Wellen interferieren).
- 3.) Durch die Überlagerung von Wellen entstehen charakteristische Wellenmuster (physikalisch exakt: Interferenzmuster).

<sup>1</sup> Wenn zwei oder mehr Wellen gleichzeitig durch dasselbe Gebiet hindurchlaufen, überlagern sie sich zwar, aber sie verändern dabei weder ihre Form noch ihr Verhalten. Man sagt daher: „Wellen durchdringen sich ungestört.“

Die Versuche ließen sich unter Zuhilfenahme von weiteren Fingern beliebig fortsetzen. Man würde dabei beobachten, dass das Wellenmuster, das durch die Überlagerung der einzelnen Kreiswellen entsteht, immer komplizierter wird. Mit dem Auge ist das jedoch recht schwierig zu erkennen. Auf Fotos, die immer nur eine Momentaufnahme einer Wellenbewegung zeigen, wird die Struktur der Wellenmuster dagegen deutlich sichtbar. In Abbildung 3 sind zwanzig punktförmige Erregungszentren dargestellt, die nebeneinander auf einer geraden Linie liegen. Es wird gezeigt, was passiert, wenn sie wie in Versuch 1 und 2 in kurzen, regelmäßigen Abständen Kreiswellen erzeugen. Die Linien markieren die Orte, an denen sich Wellenberge befinden:



**Abbildung 3:** Kreiswellen, die sich um punktförmige, auf einer geraden Linie liegende Erregungszentren (schwarze Punkte, blauer Punkt) ausbreiten und sich zu geraden Wellenfronten (zur leichteren Erkennbarkeit in der linken Bildhälfte rot markiert) überlagern. Ein Erregungszentrum und die dazugehörige Kreiswelle sind blau hervorgehoben. (Bild: [www.pi1.physik.uni-stuttgart.de](http://www.pi1.physik.uni-stuttgart.de))

Man sieht, dass von jedem Erregungszentrum eine Kreiswelle ausgeht. (Zur Verdeutlichung sind ein Erregungszentrum und die von ihm erzeugte Welle blau markiert.) Gut zu erkennen ist, dass sich die Kreiswellen in bestimmten Abständen von den Erregungszentren zu geraden *Wellenfronten* (in der linken Bildhälfte rot markiert) überlagern. Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenfronten ist gleich groß.

Eine Wellenfront besteht aus den Punkten einer Welle, die a) infolge der Schwingungsbewegung der Welle gleich weit ausgelenkt und b) benachbart sind. Bei einer einzelnen Kreiswelle sind dies z.B. Wellenberge (Abbildung 3, blaue Halbkreise), die sich *kreisförmig* um das Erregungszentrum ausbreiten. Im Falle von sich überlagernden Kreiswellen sind dies Bereiche, wo z.B. Wellenberge der unterschiedlichen Kreiswellen nebeneinander auf *geraden Linien* zu liegen kommen (Abbildung 3, zum Teil rot markierte Linien). Die Wellenfronten bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit von ihren Erregungszentren fort. Auf diese Weise breitet sich die Welle aus.

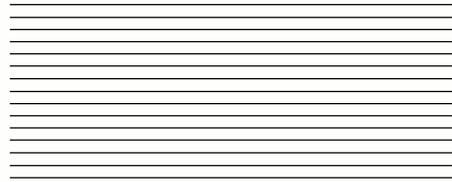
*Diese Beobachtungen lassen sich auf Licht (elektromagnetische Wellen) direkt übertragen:*

- 1.) Die Ausbreitung von Lichtwellen kann man auf die gleiche Weise beschreiben wie die Ausbreitung von Wasserwellen.
- 2.) Das von Himmelskörpern ausgesandte Licht breitet sich in Form von *kugelförmigen Wellenfronten* (Kugelwellen) aus. Wegen der großen Entfernung dieser Objekte können wir die von ihnen kommenden Lichtwellen als *gerade Wellenfronten* betrachten.

## 2) Was passiert, wenn aus dem Weltall kommendes Licht die Erdatmosphäre durchquert?

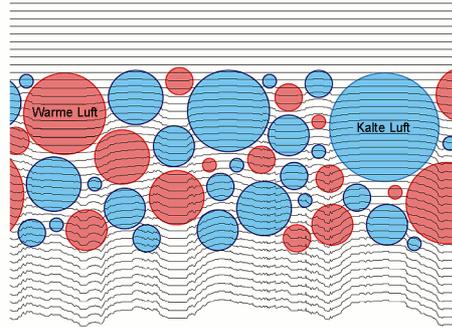
### Abbildung 4, oberstes Bild:

Das von Himmelskörpern kommende Licht durchquert den Weltraum und breitet sich in Form von Kugelwellen aus. In großer Entfernung gleichen die Lichtwellen *geraden Wellenfronten*. Der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wellenfronten ist gleich groß.

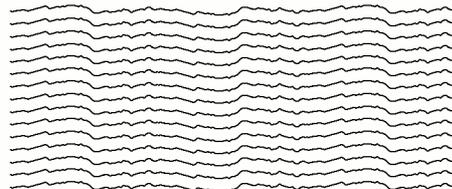


### Abbildung 4, zweites Bild von oben:

Wellenfronten, die in die Erdatmosphäre gelangen, breiten sich dort weiterhin als gerade Linien aus. Innerhalb der Atmosphäre gibt es jedoch einzelne Schichten, in denen Bereiche mit warmer und kalter Luft für Turbulenzen sorgen. Die Luftunruhe bewirkt, dass die geraden Wellenfronten beim Durchgang durch diese Luftschichten *verbogen* werden.



*Dieser Effekt kommt auch in unserem Alltag vor und ist uns gut bekannt: Flirrende Luft – zum Beispiel über heißem Asphalt oder über einer brennenden Kerze – führt dazu, dass uns Gegenstände verzerrt erscheinen, die wir durch die erwärmte und dadurch unruhige Luft hindurch betrachten. Auch hier wird das von den Gegenständen kommende Licht (die Wellenfronten) aufgrund der Luftunruhe verbogen. Die Gegenstände können wir daher nur unscharf sehen.*



### Abbildung 4, mittleres Bild:

Die *verbogenen Wellenfronten* behalten ihre neue Form bei und breiten sich weiter in Richtung Erdboden aus.

### Abbildung 4, zweites Bild von unten:

Das Licht wird von Astronomen in Sternwarten beobachtet. Die verbogenen Wellenfronten gelangen ins Teleskop. Dort werden sie in eine Kamera weitergeleitet und fotografiert.



### Abbildung 4, unterstes Bild:

Aufnahmen von Himmelsobjekten, die vom Erdboden aus gemacht werden, sind zwangsläufig unscharf, da das Licht auf seinem Weg durch die Atmosphäre verzerrt wurde.

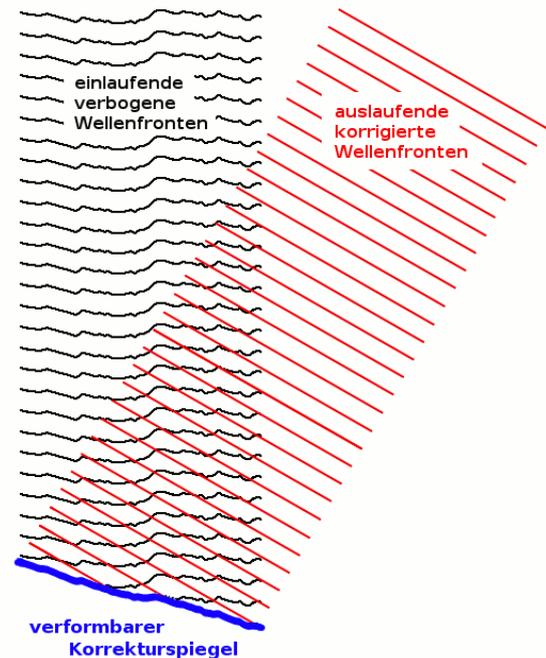
**Abbildung 4:** Beim Durchqueren der Atmosphäre verformen sich Lichtwellen infolge der Luftunruhe. Aufnahmen sind daher unscharf. (Bilder: Wikipedia, ESO, cosmicmatters.keckobservatory.org, Monika Maintz)

### 3) Wie funktioniert die adaptive Optik?

Was müsste man tun, um von der Erde aus vielleicht doch bessere Aufnahmen von Himmelsobjekten machen zu können?

Um scharfe Bilder zu bekommen, muss man die Atmosphäre austricksen. D.h. man muss die Auswirkungen der Atmosphäre auf die Wellenfronten (die Verformung der Wellenfronten infolge der Luftunruhe) so gut wie möglich kompensieren. Das erreicht man mit Hilfe der **adaptiven Optik**. Die Idee, die dahinter steckt, ist, dass man die verbogenen Wellenfronten mit technischen Hilfsmitteln wieder „zurechtbiegt“.

Das Zurechtbiegen geschieht mit Hilfe eines dünnen Spiegels, der sich schnell und leicht verformen lässt. An ihm werden die verzerrten Lichtwellen gespiegelt (Abb. 5). Dazu wird er so geformt, dass er die Verbiegung der einlaufenden Wellenfronten bei der Spiegelung möglichst gut ausgleicht. Auf diese Weise werden die auslaufenden Wellenfronten korrigiert und sind wieder gerade.



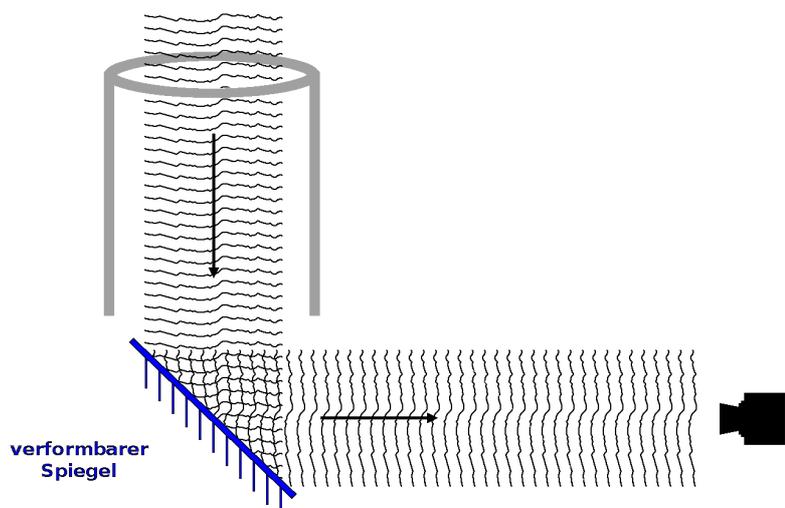
**Abbildung 5:** Prinzip der adaptiven Optik: Verzerrte Lichtwellen (schwarz) werden durch einen verformbaren Korrekturspiegel wieder „zurechtgebogen“ (rote Wellenfronten). (Bild: Wikipedia, Monika Maintz)

Im Folgenden wird dargestellt, wie sich die adaptive Optik technisch realisieren lässt. Dazu betrachten wir Lichtwellen, die von einem Teleskop eingefangen und zu einer Kamera weitergeleitet werden – zum leichteren Verständnis zuerst ohne und dann mit eingeschalteter adaptiver Optik.

#### 3a) Beobachtung von Himmelsobjekten ohne adaptive Optik

Abbildung 6 zeigt, wie Lichtwellen (schwarze Linien) in ein Teleskop gelangen und dort mit Hilfe eines Spiegels zu einer Kamera gelenkt werden. Die Bewegungsrichtung des Lichts wird durch schwarze Pfeile markiert.

Die kurzen, blauen Striche an der Unterseite des Korrekturspiegels stellen kleine Stempeln (Aktuatoren) dar, die man elektronisch ansteuern kann, um den Spiegel zu verformen. Da die adaptive Optik aber noch ausgeschaltet ist, leitet der Spiegel die Wellenfronten ohne Korrektur zur Kamera weiter.



**Abbildung 6:** Beobachtung ohne adaptive Optik. (Bild: Monika Maintz)

### 3b) Beobachtung von Himmelsobjekten mit adaptiver Optik

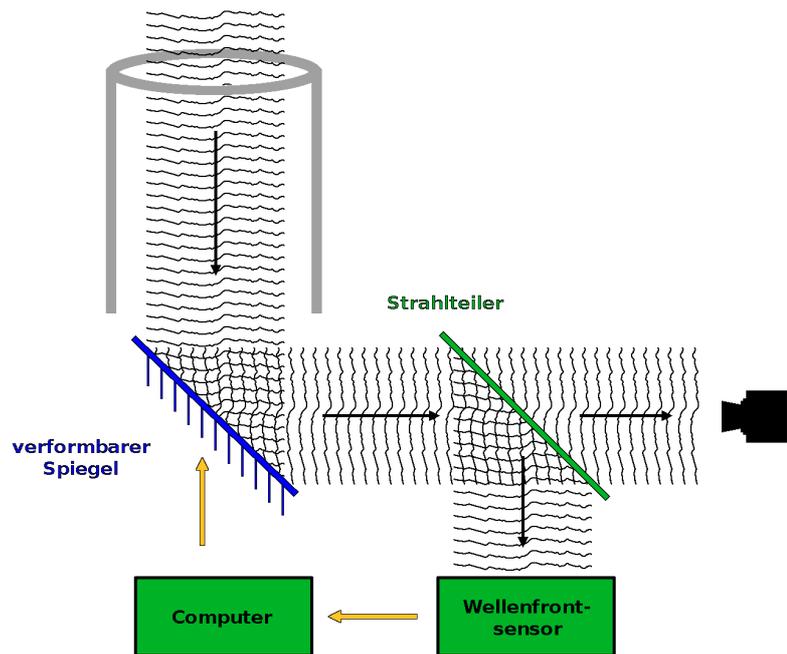
Nun wird die adaptive Optik eingeschaltet (Abb. 7).

Nachdem die Lichtwellen am (noch unverformten) Korrekturspiegel gespiegelt wurden, treffen sie auf einen *Strahlteiler*. Dieser lässt einen Teil des Lichts passieren, der weiter auf die Kamera zuläuft. Den anderen Teil lenkt er in einen *Wellenfrontsensor*. Dieses Gerät misst, wie stark die Lichtwellen verbogen sind oder anders ausgedrückt wie sehr sie von der Idealform gerader Wellenfronten abweichen.

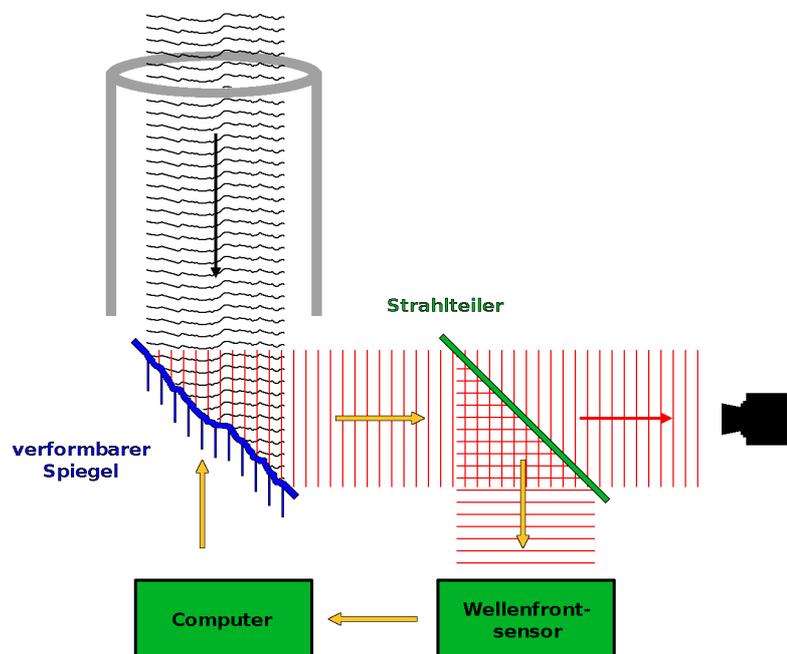
Das Messergebnis wird an einen *Computer* geschickt. Anhand der Messdaten berechnet er, wie der Korrekturspiegel verformt werden muss, um die Verbiegung der Wellenfronten möglichst gut auszugleichen und so eine optimale Korrektur zu erzielen. Die berechneten Daten werden an die *Steuerelemente* des Korrekturspiegels weitergeleitet. Der Spiegel wird aktiviert und verformt sich (Abb. 8). Die Korrektur kann beginnen.

Nachdem die Wellenfronten am verformten Korrekturspiegel gespiegelt und damit korrigiert wurden (rote Linien), laufen sie weiter in Richtung Kamera. Der Strahlteiler fängt wieder einen Teil der Lichtwellen ab und leitet sie zum Wellenfrontsensor. Ein neuer Korrekturzyklus beginnt.

Dieser Regelkreis (Wellenfrontsensor → Computer → Korrekturspiegel → Wellenfrontsensor usw.) wird mehrere 100 Mal pro Sekunde durchlaufen. Dies gewährleistet eine fortlaufende Korrektur der Wellenfronten und damit eine möglichst störungsfreie und scharfe Abbildung der beobachteten Himmelsobjekte.

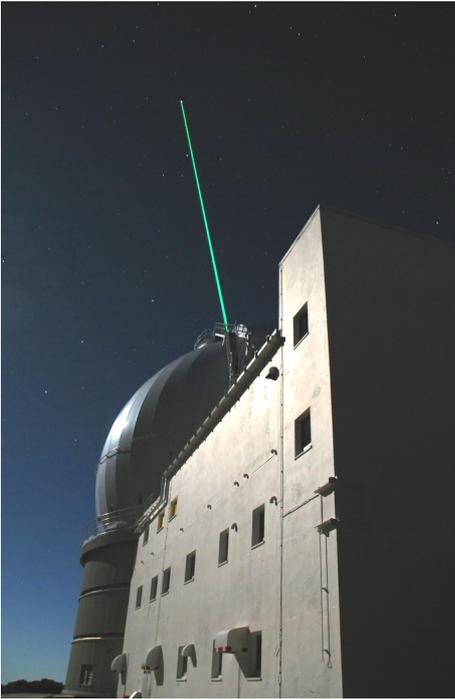


**Abbildung 7:** Die adaptive Optik wird aktiviert: Ein Strahlteiler lenkt einen Teil des Lichts in einen Wellenfrontsensor, der die Verformung der Wellenfronten misst. Ein Computer berechnet daraus, wie der Korrekturspiegel verformt werden muss. (Bild: Monika Maintz)



**Abbildung 8:** Bei aktivierter adaptiver Optik werden die einlaufenden Wellenfronten ständig korrigiert. Die gelben Pfeile deuten den dabei durchlaufenen Regelkreis an. (Bild: Monika Maintz)

#### 4) Woher weiß die adaptive Optik, was „gerade“ ist?



**Abbildung 9:** Ein Laserstrahl erzeugt einen künstlichen Stern am Himmel über dem William Herschel Teleskop auf La Palma. (Bild: Tibor Agócs)

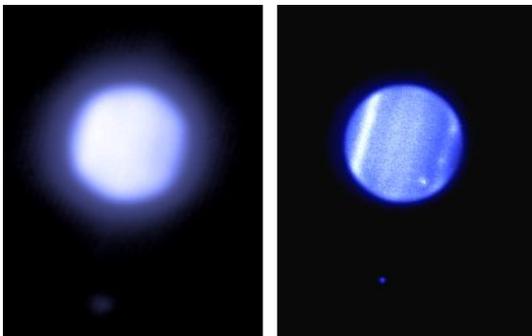
Bisher wurde besprochen, warum die adaptive Optik für die Astronomie wichtig ist und wie sie funktioniert. Woher das System aber weiß, wie gerade Wellenfronten aussehen, um sie mit verformten zu vergleichen, bleibt noch zu klären.

Aus der Physik wissen wir, wie ein optisches System (z.B. Linse, Lupe, Teleskop, Kamera) Objekte abbildet. Wir wissen also, wie etwa ein Punkt oder ein Kreis idealerweise aussehen müsste, wenn wir ihn durch eine Linse oder auf einer Fotografie betrachten. Dies macht man sich bei der adaptiven Optik zunutze: Gleichzeitig mit dem zu erforschenden Himmelskörper beobachtet man ein *Referenzobjekt*, von dem man weiß, wie es ohne den störenden Einfluss der Atmosphäre abgebildet werden würde. Für die Korrektur der Wellenfronten verwendet man folglich das Licht des Referenzobjekts und vergleicht die beobachteten Wellenfronten mit solchen, die man theoretisch beobachten müsste. Die Wellenfronten, die das Himmelsobjekt aussendet, das man erforschen will, korrigiert man dabei automatisch mit.

Als Referenzobjekt kann ein Stern dienen, der in der Nähe des zu erforschenden Objekts liegt. Besser eignen sich aber „künstliche Sterne“, da man sie an beliebige Stellen am Himmel projizieren kann. Erzeugt werden sie mit einem Laserstrahl, der so fokussiert wird, dass er an einer hohen Atmosphärenschicht in einem Punkt reflektiert wird (Abb. 9).

#### 5) Was leistet die adaptive Optik?

Trotz aller technischer Raffinesse kann man mit adaptiver Optik verbogene Wellenfronten nur unvollständig korrigieren. Gründe dafür sind, dass man Korrekturspiegel nur mit einer begrenzten Anzahl von Steuerelementen ausrüsten kann und dass sie eine gewisse Zeit benötigen, um sich zu verformen. Trotzdem leistet diese Technik Beachtliches. Sie ermöglicht Aufnahmen vom Erdboden aus mit einer Qualität, die früher nur vom Weltraum aus erreicht wurde. Bilder werden schärfer und zeigen immer mehr Details. Sehr eindrücklich ist das in Abb. 10 und 11 zu erkennen. Sie zeigen Aufnahmen derselben Himmelsobjekte, die mal mit und mal ohne adaptive Optik gemacht wurden.



**Abbildung 10:** Uranus: links ohne, rechts mit adaptiver Optik (Bild: René Rutten, Javier Méndez und GLAS Commissioning Team)



**Abbildung 11:** Blick ins Zentrum der Milchstraße: links ohne, rechts mit adaptiver Optik fotografiert (Bild: cosmicmatters.keckobservatory.org)