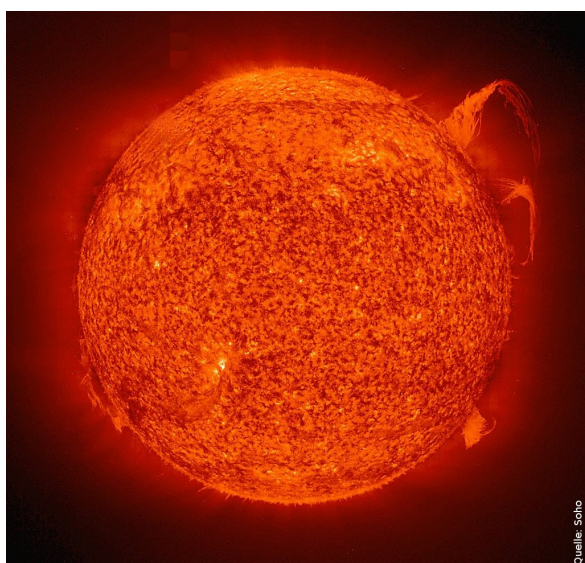


602 – Sonnengranulation

Holographische Methode zur Bestimmung der Lebensdauer von Sonnengranulen

Paul Katolla <p_katolla@yahoo.de>
Tobias Krähling <Tobias.Kraehling@SemiByte.de>

05.12.2009
Version 1.0



1 Einleitung

Die Sonne ist – neben ihrem essentiellen und unerlässlichen Einfluss für das Leben auf der Erde – ein sehr wichtiger Stern und Untersuchungsobjekt für die Klärung von astrophysikalischen Problemstellungen. Diese besondere Stellung ist der relativ kurzen Distanz zwischen Sonne und Erde geschuldet (mittlere Entfernung: $1 \text{ AE} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$), wodurch sich Beobachtungsmöglichkeit – sowohl erdgebunden, mittels Ballone und Satelliten oder bei wesentlich kürzeren Entfernungen über Raumsonden – ergeben. Bereits für den sonnennächsten Stern im Dreiersystem Alpha Centauri (Entfernung $\sim 4,4 \text{ Lj}$) bleibt die Strukturauflösung, wie sie bei der Sonne möglich ist, verwehrt.

Bis vor etwa 400 Jahren galt die Sonne als unveränderlich und makellos, als CHRISTOPH SCHEINER und JOHANNES FABRICIUS 1611 zum ersten mal Sonnenflecken beobachteten. Im Folgenden wurden weitere dynamische, veränderliche Strukturelemente wie Granulationen der Sonnenoberfläche, Flares oder Protuberanzen entdeckt und bis heute stellt die Heliophysik ein intensiv bearbeitetes Forschungsgebiet dar.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Aufbau der Sonne	2
2.2 Phänomene an der Sonnenoberfläche	3
2.3 Holographie	5
2.4 Bestimmung der Korrelation mittels holographischer Verfahren	6
3 Versuchsbeschreibung	6
4 Auswertung	8
4.1 Fehlerdiskussion	9
5 Zusammenfassung	10
Anhang	11
Literatur	12

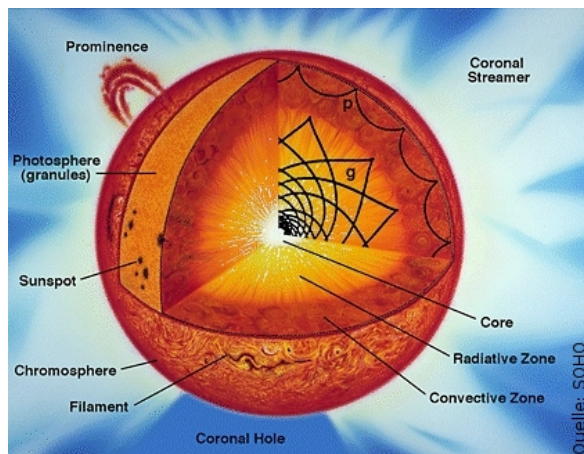


Abbildung 1: Aufbau der Sonne

In Rahmen des F-Praktikums sollen in diesem Versuch die Sonnengranulen untersucht und mittels holographischer Methoden deren Lebensdauer bestimmt werden.

2 Grundlagen

2.1 Aufbau der Sonne

Zwar können keine direkten Messungen zum inneren Aufbau der Sonne durchgeführt werden – wie dies auf der Erde z. B. im begrenzten Umfang mittels Bohrungen oder durch Seismologie möglich ist –, jedoch konnte durch äußere Beobachtungen ein Standardmodell zum inneren Aufbau der Sonne entwickelt werden (Abbildung 1), wobei helioseismologische Messungen wesentlich zur Modellentwicklung beigetragen haben – Beobachtungen und Modell differieren dabei um weniger als 0,2% (Fichtner, 2007).

Die Energieerzeugung findet innerhalb des Kerns im Wesentlichen über die Fusionierung von Wasserstoff zu Helium statt (p-p-Fusionskette), wobei pro vier Wasserstoffkerne ein Helium entsteht und in der Hauptreaktion eine Energie von ~ 26 MeV freigesetzt wird.

Desweiteren gibt es untergeordnete Reaktionswege (p-p-Kette über Bildung von Beryllium und den CNO-Zyklus) mit anderen Energiebilanzen. Dieses Modell der Energieerzeugung innerhalb des Sonnenkerns konnte über den in den Fusionsprozessen erzeugten Neutrinos verifiziert werden. Für diesen Fusionsprozess sind hohe Kerntemperaturen notwendig, die bei der Sonne im Bereich $T \approx 15 \cdot 10^6$ K liegen. Bis 0,7 Sonnenradien erfolgt der Energietransport vom Kern nach außen über Strahlung (Strahlungszone), anschließend über Konvektion (Konvektionszone) – bemerkenswert ist, dass der Energietransport über Strahlung vom Kern bis zur Rand der Konvektionszone etwa 10^7 Jahre benötigt (Demtröder, 2005, S. 312). Die Übergangszone zwischen Strahlungs- und Konvektionszone wird *Tachocline* genannt, wobei in dieser Übergangszone die starre Rotation des Sonneninnern in eine differentielle Rotation der Konvektionszone übergeht – an der Oberfläche beträgt die Umlaufzeit am Sonnenäquator 25 Tage, an den Polen jedoch 36 Tage (siehe Abbildung 2, Peter et al. (2007)).

Als – nicht scharf abgegrenzte – Sonnenoberfläche wird die einige 100 km dicke Schicht bezeichnet, die sich an die Konvektionszone anschließt. In dieser Schicht, die Photosphäre, nimmt die mittlere Weglänge von Photonen stark zu und das Plasma der Photosphäre wird optisch dünn. Ursache hierfür ist die nach außen abnehmende Temperatur und daraus folgenden Rekombination der meisten freien Elektronen. Der Wärmetransport erfolgt in dieser Schicht im Wesentlichen über Strahlung. Auf die Photosphäre folgen die Chromosphäre und die Korona, wobei diese drei Bereiche auch als Sonnenatmosphäre bezeichnet werden, in der die auf der Erde beobachtbare elektromagnetische Strahlung gebildet wird, die weitestgehend einem Planck'schen Strahler mit einer Temperatur von ~ 5800 K entspricht (der Oberflächentemperatur). Dabei sind Abweichungen vom Planck'schen Strahler nur bei großen

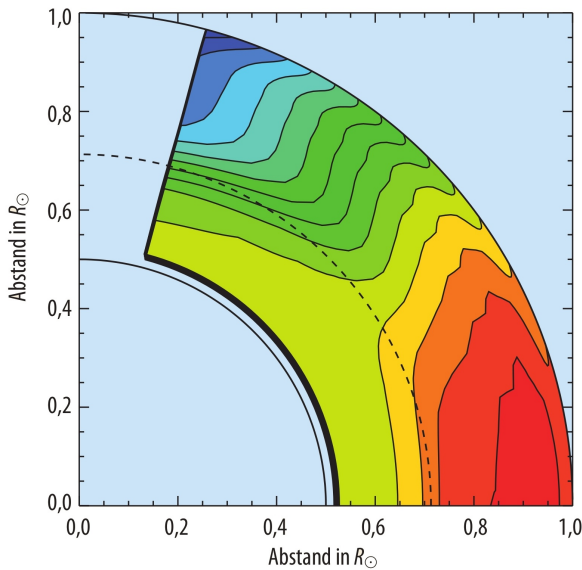


Abbildung 2: Rotationsgeschwindigkeit innerhalb der Konvektionszone

Innerhalb der Konvektionszone variiert die Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Ort (rot entspricht 25 Tagen Umlaufzeit, blau 36 Tagen). Der Abstand vom Sonnenzentrum ist in Einheiten des Sonnenradius R_{\odot} gegeben. Unterhalb der Tachocline (gestrichelt) wird die Rotation zunehmend starrer (Peter et al., 2007).

und kleinen Wellenlängen zu beobachten, wobei in diesen Bereichen auch die größten Variationen zu beobachten sind, die eine Folge der Sonnenaktivität sind. Als allgemein angenommene Ursache für diese Sonnenaktivität und den beobachteten Aktivitätszyklus wird ein Dynamoprozess vorausgesetzt, der kinetische Energie der Konvektion in magnetische Energie umwandelt und das Magnetfeld der Sonne etwa alle 11 Jahre umpolt. Der Zyklus wurde dabei anhand der Häufigkeit und Polarität von Sonnenflecken beobachtet, so dass sich insgesamt ein 22-Jahre-Zyklus ergibt.

Ein noch nicht verstandenes Verhalten ist die starke Aufheizung der Korona. Während die Oberflächentemperatur etwa 5800 K beträgt und die Temperatur an der Grenze zwischen Photosphäre und Chromosphäre auf etwa 4000 K abgekühlt ist, steigt sie in der Chromosphäre wieder und erreicht in der Korona

einen Wert von etwa 2 Millionen Grad. Vermutet werden Alfvén-Wellen als entscheidender Mechanismus für die Koronaheizung, die von Jess et al. (2009) erstmals in der unteren Sonnenatmosphäre nachgewiesen werden konnten.

2.2 Phänomene an der Sonnenoberfläche

In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt der Sonnenoberfläche dargestellt, in dem oben links ein Sonnenfleck zu sehen ist. Zu erkennen ist ein dunkler Bereich, die Umbra, die von einem helleren, radial filamentierten Bereich, der Penumbra, umgeben ist. Die Größe der Sonnenflecken variiert dabei im Bereich von einigen 1000 km bis zu 50.000 km und deren Auftreten ist immer mit starken Magnetfeldern verbunden. Diese starken Magnetfelder ($\lesssim 0,3$ T) innerhalb der Umbra verhindern die Konvektion des ionisierten Plasmas, wodurch der Wärmetransport unterdrückt wird – die Flecken sind mit etwa 4000 K kühler als die Umgebung. Die Lebensdauer dieser Sonnenflecken variiert von wenigen Tagen bis hin zu wenigen Monaten. Kleinere Flecken ohne Penumbra werden als Poren bezeichnet und sind häufig die Vorstufe von Sonnenflecken.

Gut zu erkennen ist in Abbildung 3 und 4 die Struktur und Körnigkeit der Sonnenoberfläche – die Sonnengranulation –, die sich über die gesamte Oberfläche erstreckt. Wie im vorherigen Abschnitt aufgeführt, erfolgt der Wärmetransport in der Photosphäre im Wesentlichen über Strahlung. Jedoch können auch Konvektionsblasen, die aus der Konvektionszone aufsteigen, aufgrund ihrer aufwärtsgerichteten Geschwindigkeit und Trägheit in die Photosphäre eindringen und kühlen dort über Abstrahlung ab. Die nun kühlere und dichtere Materie sinkt anschließend am Rand der Konvektionsblase wieder ab, wodurch die beob-

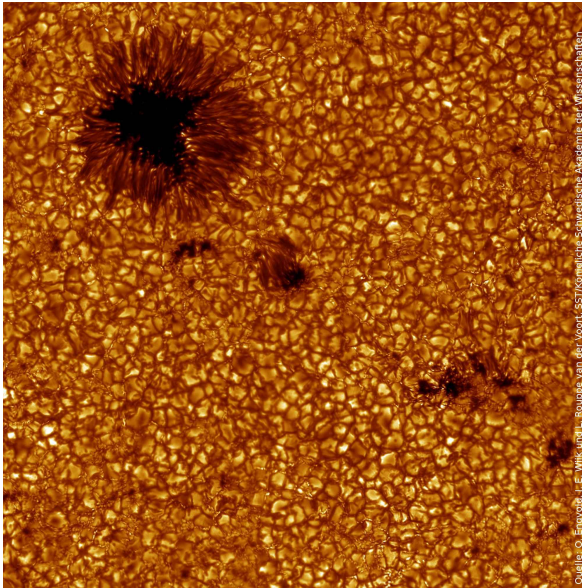


Abbildung 3: Sonnengranulation, Sonnenflecken und Poren

achtete körnige Struktur mit den hellen Zellen, den Granulen, in denen die (heiße) Materie aufsteigt und den dunklen Zwischenräumen, den Intergranulium, in denen die erkaltete Materie absteigt, entsteht. Das Konvektionsmechanismen Ursprung der beobachtete Granulation sind, kann auch über die folgende Abschätzung erklärt werden: Unter der Annahme, dass der durchschnittliche relative Helligkeitsunterschied, der in den Abbildung 3 und 4 sichtbar ist, von Granulen und dem Intergranulium $\Delta\Phi/\Phi \approx 15\%$ beträgt, so kann über das Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$\Phi = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

der durchschnittliche Temperaturunterschied ΔT abgeschätzt werden zu

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \frac{4\Delta T}{T} \Rightarrow \Delta T = \frac{1}{4} \frac{\Delta\Phi}{\Phi} T \approx 220 \text{ K} \quad (2.2)$$

mit der Oberflächentemperatur $T = 5800 \text{ K}$ der Sonne. Dieser Temperaturunterschied zwischen Granulen und dem Intergranulium zeigt, dass Konvektionsmechanismen Ursprung der Granulation ist, was durch spektroskopische

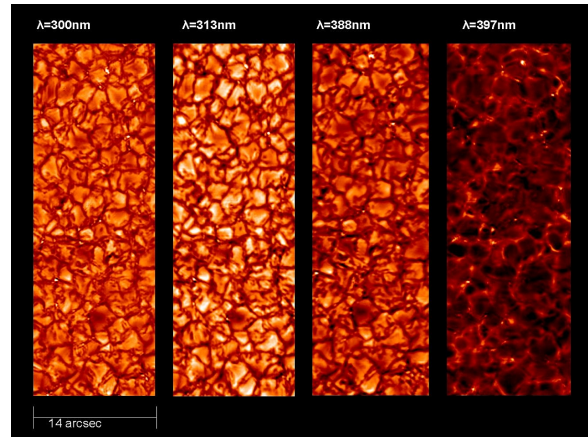


Abbildung 4: Körnige Sonne

Die Aufnahmen zeigen die sogenannte Granulation in vier verschiedenen Farben im nahen ultravioletten Licht. Der Bildausschnitt deckt $1/20000$ der gesamten Oberfläche ab. Die kleinsten erkennbaren Strukturen haben eine Winkelauflösung, die dem Anblick einer Münze aus einer Entfernung von 100 Kilometern entspricht. Die hellen Strukturen sind die Grundbausteine der Magnetfelder. (MPS, 2009)

Untersuchungen der Dopplerverschiebung bestätigt wird. Spektrallinien der Sonne innerhalb der Granulen sind blauverschoben und im Intergranulium rotverschoben – d. h. in den Granulen steigt Materie aus der Konvektionszone nach oben in die Photosphäre und im Intergranulium aus der Photosphäre in die Konvektionszone¹.

Von der Größenordnung liegt die Ausdehnung der Granulen im Bereich von etwa 1000 km. Dabei zeigen die Granulen eine starke Dynamik, die Lebensdauer liegt im Bereich einiger Minuten, und ist wesentlich bestimmt durch die hydrodynamische Konvektion sowie von Strahlungskühlungseffekte (Peter et al., 2007). Durch die geringe Größe der Granulen ist eine genauere erdgebundene Beobachtung der Son-

¹ Eine Doppleraufnahme eines Sonnenflecks und umgebener Granulation ist beispielsweise beim Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik Freiburg unter www.kis.uni-freiburg.de, Bild des Monats 10/2009, zu finden.

nengranulation durch die Unruhe der Erdatmosphäre erschwert. Aufgrund der Störungen durch die Erdatmosphäre liegt das maximale Auflösungsvermögen (*Seeing*) bei $1'' - 2''$, während die Granulen einen Winkeldurchmesser von $0,5'' - 1,5''$ haben und daher für detailliertere Studien nicht genau – wenn überhaupt – beobachtet werden können. Eine Minimierung der Störungen durch die Erdatmosphäre und eine somit höhere Auflösung kann durch Observatorien auf hohen Bergen (Abbildung 3 wurde am schwedischen 1-Meter Sonnenteleskop (SST) auf La Palma aufgenommen) oder durch Observatorien in Ballonen (Abbildung 4 wurde im Sunrise-Projekt mit einem Solar-Teleskop in einem Ballon aufgenommen) erreicht werden. Wie in den Abbildung 3 und 4 ersichtlich ist zur Untersuchung der Dynamik von Granulen eine manuelle Analyse von Bildsequenzen aufgrund des Detaillierungsgrad der Granulation nicht, oder nur mit größeren Einschränkungen, möglich. Hier bieten sich, neben rechnergestützten Verfahren (z. B. Mustererkennung), insbesondere optische, holographische Analyseverfahren an, die im Folgenden zur Bestimmung der Lebensdauer der Sonnengranulen eingesetzt werden.

2.3 Holographie

Grundprinzip der Holographie ist die Überlagerung einer Objektwelle mit einer Referenzwelle – durch Interferenz kann die Form der Phasenfront sichtbar gemacht werden und auf entsprechenden Speichermedien (z. B. Film) festgehalten werden. Die ursprüngliche Phasenfront (Signalwelle) kann durch Beugung rekonstruiert werden, indem das Hologramm mit der Referenzwelle beleuchtet wird.

Die Rekonstruktion von beliebigen Lichtwellen lässt sich wie folgt zeigen: Seien $S, R \in \mathbb{C}^3$ die Amplituden der Signal- und Referenzwelle. Intensität und Amplitude sind proportio-

nal zueinander, für die Intensitätsverteilung I des Interferenzmusters, welches auf dem holographischen Film abgespeichert ist, folgt bei Überlagerung beider Wellen:

$$I \propto |S + R|^2 = |S|^2 + |R|^2 + S^*R + SR^*. \quad (2.3)$$

Nimmt die Transmission τ des Films linear mit der eingefallenden Lichtmenge ab, so gilt (mit a, b als Filmparameter):

$$\tau = a - b(|S + R|^2). \quad (2.4)$$

Wird der entwickelte Film nun mit der Referenzwelle beleuchtet, so erhält man hinter dem Film die Lichtverteilung $R\tau$, einsetzen von Gleichung (2.3) und (2.4) liefert:

$$\begin{aligned} R\tau &= R[a - b(|S + R|^2)] \\ &= R[a - b(|S|^2 + |R|^2 + S^*R + SR^*)]. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Entscheidend ist der Term $RR^*S = |R|^2S$; da $|R|^2$ nur einen konstanten Faktor liefert, wird die Signalwelle S mit der Phaseninformation vollständig rekonstruiert. Bei dieser Betrachtung wurde ein absorbierendes Aufzeichnungsmaterial zugrunde gelegt – das entstehende Hologramm wird auch als *Amplitudenhologramm* bezeichnet, da beim Lesen die Beugung durch eine räumliche Modulation der Amplitude der Lichtwelle hervorgerufen wird. Eine andere Möglichkeit, Hologramme zu erstellen, sind die *Phasenhologramme*, die dadurch ausgezeichnet sind, dass Veränderungen im Brechungsindex von transparenten Materialien bei der Belichtung zu einer Aufzeichnung führen. Ebenfalls fallen unter diese Kategorie Aufzeichnungen, die über die Änderungen der Filmdicke arbeiten (siehe auch [Buse und Soergel \(2003\)](#); [Demtröder \(2006\)](#)). Allen Techniken für die Holographie ist gleich, dass ausreichend räumliche und zeitliche kohärente Lichtquellen vonnöten sind, so dass diese Technik seit der Entwicklung von Lasern, die eine energiereiche, monochromatische und kohärente Lichtquelle bereitstellen, zunehmend eingesetzt wird.

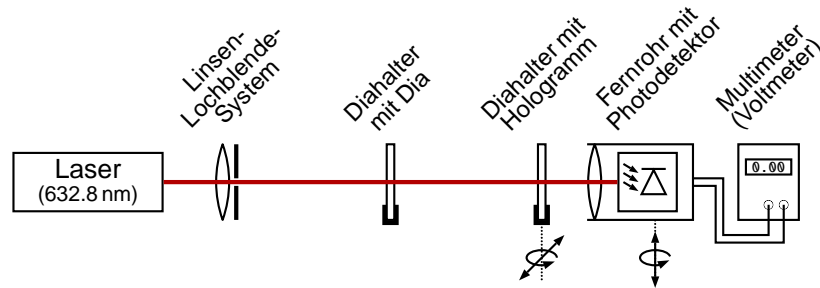


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Intensitätsbestimmung

2.4 Bestimmung der Korrelation mittels holographischer Verfahren

Wie im vorherigen Abschnitt angeführt wird üblicherweise das Hologramm mit dem Referenzstrahl beleuchtet und dadurch das Objekt (die Objektwellen) rekonstruiert. Objektwellen und Referenzstrahl sind aber optisch gleichwertig und keine von beiden ist für das Hologramm besonders ausgezeichnet – daraus folgt, dass wenn das Hologramm mit den Objektwellen beleuchtet wird, so kann der Referenzstrahl rekonstruiert werden. Diese Gleichwertigkeit wird zur Korrelationsbestimmung benutzt. Kleine Änderungen des Objekts und somit der Objektwellen führen zwar nicht zu einer vollständigen Zerstörung der Rekonstruktion des Referenzstrahls, jedoch zu einer schlechteren Rekonstruktion, die sich in einer reduzierten Intensität des Referenzstrahls bemerkbar macht. Die Intensität stellt somit ein Maß der Übereinstimmung – die Korrelation K – zwischen dem ursprünglichen und dem geänderten Objekt dar und, da die Intensität proportional zur Amplitude ist, erhält man:

$$K \sim \sqrt{I} \quad (2.6)$$

wie auch eine mathematische Analyse von Stroke (1969) zeigt.

3 Versuchsbeschreibung

In Abbildung 5 ist der verwendete Versuchsaufbau dargestellt, der bereits fertig aufgebaut war. Als Laser wird ein Helium-Neon-Gaslaser mit einer Wellenlänge von 632,8 nm eingesetzt und der etwa 1 mm breite Laserstrahl durchläuft zunächst ein Linsen-Lochblende-System, welches als Raumkohärenzfilter fungiert. Hierdurch werden Abweichungen des Laserstrahls von der optischen Achse eliminiert und der den Raumkohärenzfilter passierende Laserstrahl besitzt eine erhöhte optische Reinheit. Dieser fällt anschließend auf ein Diapositiv, wodurch der Laserstrahl moduliert wird und nun Objektstrahl des Diapositiv ist. Fällt dieser Objektstrahl auf das Hologramm, so wird der Referenzstrahl, mit dem das Hologramm aufgenommen wurde, rekonstruiert, wobei die Intensität des Referenzstrahls, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, von der Korrelation abhängt. Der rekonstruierte Referenzstrahl kann mit dem Fernrohr betrachtet und dessen Intensität durch den im Fernrohr integrierten Photodetektor – dieser ist als kleiner schwarzer Punkt beim Blick durch das Okular des Fernrohrs erkennbar – bestimmt werden und als Spannung an einem Multimeter dargestellt werden.

Aus einem größeren Satz von Sonnengranulationsaufnahmen stehen 16 Diapositive zu unterschiedlichen Zeiten zur Verfügung. Für das erste Dia dieser Auswahl ist ein Hologramm vor-

handen und im Versuchsaufbau eingebracht. Zweckmäßigerweise beginnt man für die Intensitätsbestimmung des Referenzstrahls beim ersten Diapositiv, da hier die Intensität des Referenzstrahls maximal ist. Ist ein Diapositiv in den Strahlengang eingebracht, so kann der Referenzstrahl, der als kleiner heller Punkt durch das Fernrohr sichtbar ist, gesucht werden. Hierfür kann das Hologramm senkrecht zur optischen Achse bewegt oder um die vertikale Achse verdreht werden. Zusätzlich kann das Fernrohr in seiner Höhe verstellt und um seine vertikale Achse verdreht werden. Ist ein heller Punkt gefunden worden, so kann über kleine Veränderungen der Diaposition versucht werden, dessen Helligkeit zu maximieren – sind keine Veränderungen festzustellen, so handelt es sich bei dem beobachteten hellen Punkt nicht um den Referenzstrahl. Nach erfolgter Helligkeitsmaximierung wird der Referenzstrahl auf den Photodetektor gelenkt, indem das Fernrohr um seine vertikale Achse gedreht oder die Höhe geändert wird und sich der schwarze Punkt (Photodetektor) und heller Punkt (Referenzstrahl) übereinanderliegen. Nun kann eine weitere Helligkeitsmaximierung versucht werden, indem das Signal des Photodetektors auf dem Multimeter beobachtet wird, während die Diaposition leicht verändert wird.

Zu einer anschließenden Korrektur der Intensität (I^*) des rekonstruierten Referenzstrahls bedarf es einer Messung der Intensität I^{BG} des Hintergrundrauschens sowie der Transmittivität t der Dias. Die bestimmten und daraus berechneten Werte sind in Tabelle 2 im Anhang aufgeführt. Das Hintergrundrauschen ist auf Rekonstruktionen höherer Ordnung und die ungleiche Transmittivität der Dias auf Differenzen bei der Aufnahme sowie Entwicklung der Dias zurückzuführen.

Durch Schwenken des Fernrohrs um die vertikale Achse wird der Photodetektor links bzw. rechts neben dem rekonstruierten Referenzstrahl positioniert und anschließend der entsprechende Wert für die Hintergrundintensität I^{BG} auf beiden Seiten erfasst. Für jedes Dia der Diaserie wurden nacheinander die Intensität des Referenzstrahls sowie die Hintergrundintensität bestimmt. Um die Störeinflüsse durch Streulicht zu verringern wurde die Beleuchtung für das Ablesen der Intensitätswerte am Multimeter ausschließlich über eine Tischlampe geringer Intensität realisiert sowie das Okular am Fernrohr während jeder Messung abgedeckt. Ferner ist aufgrund der hohen Empfindlichkeit des Aufbaus gegenüber mechanischen Einflüssen entbehrlicher Kontakt mit dem Messaufbau während der Helligkeitsmaximierung und der Messung vermieden worden.

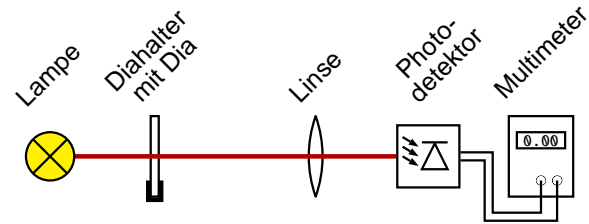


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Transmittivität der Dias

Um die Transmittivität der Dias zu bestimmen wurde anschließend ein anderer, ebenfalls fertig montierter, Messaufbau gemäß Abbildung 6 verwendet. Bei eingeschalteter Raumbeleuchtung wurden die Dias aufeinanderfolgend in der Halterung befestigt und mit einer Lampe angestrahlt. Der durch den Photodetektor erfasste Wert für die Transmittivität konnte am Multimeter abgelesen werden. Da hier nur die Verhältnisse der Transmittivitäten zwischen dem ersten Dia und allen anderen der Serie benötigt werden, ist die reale physikalische Messgröße, die am Multimeter angezeigt wird, irrelevant – somit ist keine Kalibrierung des Signals notwendig – und es wird davon ausgegangen, dass das vom Photodetektor bereitgestellte Signal linear proportional zur In-

ten

tensität des einfallenden Lichts und somit zur Transmittivität ist.

4 Auswertung

Aus den bestimmten Intensitäten für den Referenzstrahl sowie den Hintergründen konnte die korrigierte Intensitäten für jedes Dia bestimmt werden über

$$I_i = I_i^* - \frac{I_{l,i}^{BG} + I_{r,i}^{BG}}{2} \quad (4.1)$$

wobei die Hintergrundintensität als arithmetisches Mittel aus den beiden Hintergrundintensitäten links und rechts neben dem rekonstruierten Referenzstrahl bestimmte wurde. Die Korrelation zwischen den Dias und dem Hologramm (welches vom ersten Dia erstellt wurde), läßt sich dann, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Transmittivitäten, bestimmen über

$$K_i = \sqrt{\frac{I_i t_1}{I_1 t_i}} \quad (4.2)$$

und sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Werte für die auf Dia-Nr 27 normierte Korrelation K_i wurden in Abbildung 7 halblogarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Der exponentiell-abfallende Zusammenhang zwischen der Korrelation und der Zeit konnte durch ein entsprechendes Fit-Modell

$$K = A \exp\{-t/t_{1/2}\} \quad (4.3)$$

bestätigt werden, die Parameter des Fit-Modells sind in Tabelle 1 aufgeführt. Hierbei wurde der Wert für $i = 6$ nicht berücksichtigt – wie aus der graphischen Auftragung (Abbildung 7) ersichtlich (roter Datenpunkt), weicht dieser sehr stark von den anderen Werten ab (Ausreißer). Ursächlich hierfür ist wahrscheinlich eine fehlerhafte Intensitätsbestimmung, die bestimmte Strahlintensität war sehr gering (siehe Tabelle 2).

Tabelle 1: Parameter des Fit-Modells

Fit-Modell: $K = A \exp\{-t/t_{1/2}\}$	
A	$0,78 \pm 0,04$
$t_{1/2}$	$(480 \pm 100) \text{ s}$
χ^2	0,007

Die mittlere Lebensdauer $t_{1/2}$ konnte aus den Fit-Parametern entnommen werden (Tabelle 1). In diesem Fall bezeichnet die mittlere Lebensdauer die Zeit, nach der die Korrelation K auf den e-ten Teil abgefallen ist. Die Halbwertszeit t' hängt mit der mittleren Lebensdauer $t_{1/2}$ über

$$t' = t_{1/2} \cdot \ln(2) \quad (4.4)$$

zusammen. Für die Bestimmung der Lebensdauer der Sonnengranulen t_L wurde ausgenutzt, dass diese dem doppelten Wert der Halbwertszeit t' entspricht:

$$t_L = 2 \cdot t' = 2 \ln(2) \cdot t_{1/2}. \quad (4.5)$$

Die Halbwertszeit t' und die Lebensdauer der Granulen t_L konnten gemäß Gleichung (4.4) und (4.5) sowie den Fit-Parametern (Tabelle 1) bestimmt werden zu:

t'	$= (330 \pm 70) \text{ s}$
t_L	$= (660 \pm 140) \text{ s}$

wobei für Abschätzung der Fehler das lineare Fehlerfortpflanzungsgesetz herangezogen wurde.

Mittels des durchgeführten Verfahrens kann für die Lebensdauer der Granulen ein Wert von etwa 11 Minuten mit einer Messunsicherheit von ca. 20% angegeben werden. Der hier ermittelte Wert liegt somit im selben Bereich, wie er auch in der Fachliteratur angegeben wird, z. B. 8 Minuten in [Unsöld und Baschek \(2005\)](#) oder mit einigen Minuten in [Peter et al. \(2007\)](#). Dabei muss berücksichtigt

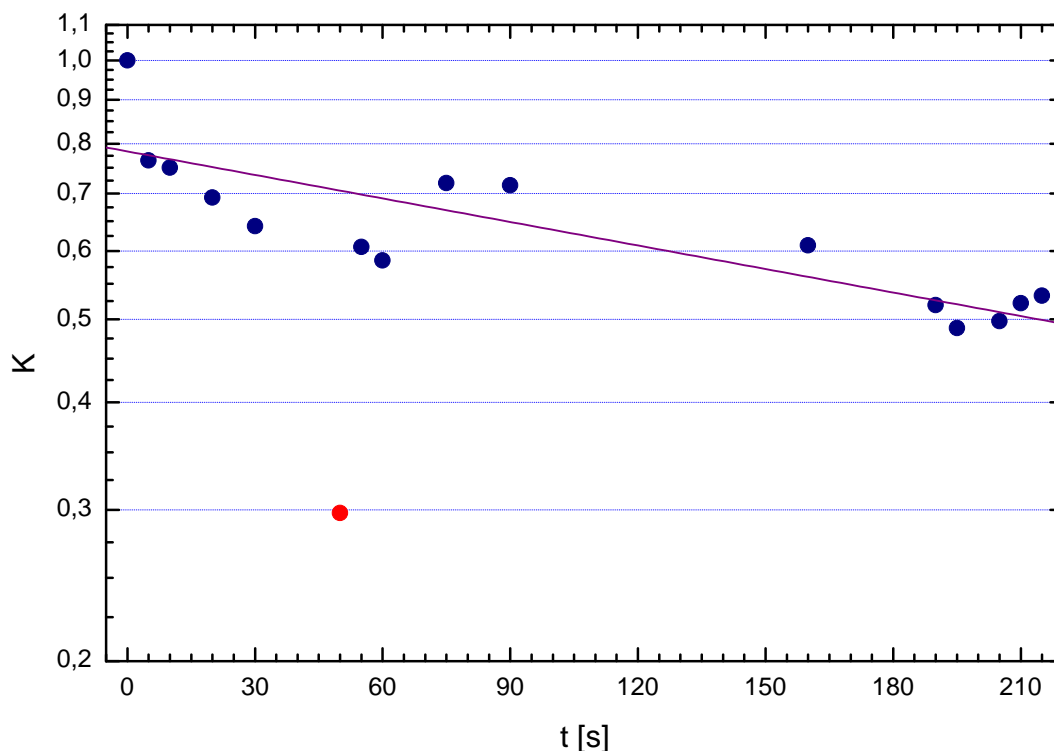


Abbildung 7: zeitliche Entwicklung der Korrelation in halblogarithmischer Darstellung

Der rot dargestellte Messwert wurde aufgrund seiner großen Abweichung beim Fit-Modell nicht berücksichtigt.

werden, dass dieser Wert nicht der Lebensdauer einzelner Granulen, sondern einem durchschnittlichen Wert für die Granulen entspricht. Einzelne Granulen können in ihrer Lebensdauer deutlich von diesem Wert abweichen.

4.1 Fehlerdiskussion

Die ermittelte relative Messabweichung von etwa 20 % erscheint relativ hoch. Ursächlich für diese sind zum Teil die Unzulänglichkeiten der menschlichen Sinnesorgane, die bei der Helligkeitsmaximierung eine Rolle spielen. Das menschliche Auge ist hierbei gewissen Einschränkungen unterworfen. Nach einer gewissen Zeit tritt beispielsweise ein Gewöhnungseffekt auf, so dass Helligkeitsunterschiede schlechter wahrgenommen werden können, wobei schon die Beurteilung des Hellig-

keitsmaximums rein subjektiv ist. Die durchgeführte anschließende Maximierung der Helligkeit anhand des Multimeters hebt diesen Effekt zum Teil wieder auf. Ferner ist der rekonstruierte Referenzstrahl von einer inhomogenen Hintergrundstrahlung überlagert. Dieses „Rauschen“ erschwert vor allem bei späteren Dias das Auffinden des in seiner Intensität nachlassenden rekonstruierten Referenzstrahls.

Zusätzlich erwiesen sich die bei der Helligkeitsmaximierung verwendeten XY-Stellschrauben am Diahalter des Hologramms als äußerst empfindlich – bereits kleinste Spannungen, die durch das Berühren der Stellschrauben entstehen, veränderten das Messsignal, so dass folglich viel Geschick beim Einstellen gefordert war. Weiterhin führten geringfügige Berührungen des Messaufbaus

zu veränderten Messwerten am Multimeter. Die geeignete Positionierung des Photodetektors konnte außerdem nur schwerlich durch Schwenken des Fernrohrs um die vertikale Achse erreicht werden, da die Drehung des Fernrohrs mit dessen zurückfedern verbunden war und für diese Drehachse keine feingängige Stellschraube verfügbar war.

Andere Faktoren, die die gemessene Intensität beeinflussen können, und nicht gesondert in der Versuchsdurchführung berücksichtigt wurden, sind die Justage des Aufbaus – dieser war bereits fertig aufgebaut und wurde nicht verändert – sowie gegebenenfalls Instabilitäten des Lasers. Fluktuiert die Intensität des Lasers zeitlich, so werden durch das hier durchgeführte Messprinzip diese Fluktuationen nicht eliminiert, sondern beeinflussen direkt die Intensitätsbestimmung des rekonstruierten Referenzstrahls.

5 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass holographische Methoden eine gute und effiziente Möglichkeit bieten, Daten, die als Bilderserien vorliegen, zu untersuchen und deren Ähnlichkeit (Korrelation) zu analysieren. Dabei konnte die mittlere Lebensdauer der Granulen auf der Sonnenoberfläche zu etwa 11 min mit einem Fehler von 20 % bestimmt werden. Mittlere Lebensdauern in diesem Bereich sind auch andersweitig publiziert worden, wobei berücksichtigt werden muss, dass einzelne Granulen oder kleinere Bereiche von mehreren Granulen auch stärker von dieser mittleren Lebensdauer abweichen können. Insgesamt zeigt diese Untersuchung eines Sonnenoberflächenausschnitts die starke Dynamik der Sonnenoberfläche im Minutenbereich – auf kleinen Skalen kann die Oberfläche also nicht als konstant angesehen werden, sondern muss als sehr dynamisches System betrachtet werden.

Anhang

Tabelle 2: Mess- und berechnete Werte

i	DNr	t [s]	I^* [mV]	I_l^{BG} [mV]	I_r^{BG} [mV]	I [mV]	t [a. U.]	K
1	27	0	32,0	20,0	20,4	11,80	404	1,000
2	28	5	25,8	20,1	19,1	6,20	363	0,765
3	29	10	30,9	23,3	21,8	8,35	508	0,750
4	31	20	27,7	21,2	21,6	6,30	450	0,692
5	33	30	23,7	18,1	19,2	5,05	420	0,642
6	37	50	20,4	19,4	19,2	1,10	426	0,297
7	38	55	21,7	18,0	18,3	3,55	330	0,607
8	39	60	23,4	19,7	20,0	3,55	355	0,585
9	42	75	26,0	19,1	20,7	6,10	403	0,720
11	45	90	23,3	18,7	18,9	4,50	301	0,715
12	59	160	21,8	18,2	18,4	3,50	323	0,609
13	65	190	19,7	17,0	17,3	2,55	324	0,519
14	66	195	20,1	18,0	18,3	1,95	280	0,488
15	68	205	19,9	18,2	17,6	2,00	277	0,497
16	69	210	20,6	17,8	18,2	2,60	327	0,522
17	70	215	21,6	18,6	18,9	2,85	344	0,533

Legende:

i : laufende Nummer

DNr : Nummer des Dias

I^* : gemessene Intensität des rekonstruierten Referenzstrahls

I_l^{BG} : Hintergrundintensität links neben dem rekonstruierten Referenzstrahl

I_r^{BG} : Hintergrundintensität rechts neben dem rekonstruierten Referenzstrahl

I : Intensität des rekonstruierten Referenzstrahls abzüglich der Hintergrundintensität (Gleichung (4.1))

t : Transmittivität des Dias

K : berechnete Korrelation (Gleichung (4.2))

Anmerkung:

- ▶ Das Dia mit der laufenden Nummer 10 fehlte im Diasatz.
- ▶ Die Messung $i = 6$ wurde beim Fit-Modell herausgenommen, da hier offensichtlich ein Messfehler vorliegt.

Literatur

- Karsten Buse und Elisabeth Soergel. Holographie in Wissenschaft und Technik – Sicherheitsmerkmale und Datenspeicher sind nur zwei der vielfältigen Anwendungen von Hologrammen. *Physik Journal*, 2(3):37–43, 2003.
- Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2 – Elektrizität und Optik*. Springer-Verlag, 4. Auflage, 2006. ISBN 3-540-33794-6.
- Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 4 – Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer-Verlag, 2. Auflage, 2005. ISBN 3-540-21451-8.
- Horst Fichtner. Mehr als nur ein aktiver Stern. *Physik Journal*, 6(3):31–34, 2007.
- David B. Jess, Mihalios Mathioudakis, Robert Erdélyi, Philip J. Crockett, Francis P. Kennan, und Damian J. Christian. Alfvén Waves in the Lower Solar Atmosphere. *Science*, 323(5921):1582–1585, 2009. DOI: 10.1126/science.1168680.
- MPS. Brodelnder Gasball. Pressenotiz 10/2009, Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, 2009. URL http://www.mps.mpg.de/de/aktuelles/presenotizen/presenotiz_20091104.html. 04.11.2009.
- Hardi Peter, Rolf Schlichenmaier, und Markus Roth. Vom Kern zur Korona. *Physik Journal*, 6(3):35–41, 2007.
- G. W. Stroke. *An Introduction to Coherent Optics and Holography*. Academic Press, 1969. ISBN 0126739560.
- A. Unsöld und B. Baschek. *Der neue Kosmos – Einführung in die Astronomie und Astrophysik*. Springer-Verlag, 7. Auflage, 2005. ISBN 3-540-42177-7.

Liste der Versionen

Version	Datum	Bearbeiter	Bemerkung
0.9	25.11.2009	Kat/Krä	Versuchsdurchführung
1.0	05.12.2009	Kat/Krä	Versuchsauswertung