

# BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

## Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

### Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.  
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle  
genutzt werden. Auf der Homepage

[www.solstice.de](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Michael Vollmer

## Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana

*Wer die Natur liebt, der braucht das Beobachten ihrer Erscheinungen wie die Luft zum Atmen.* So formulierte Marcel Minnaert das Bedürfnis der Naturbeobachtung im Vorwort seines berühmten Buchs „Licht und Farbe in der Natur“ [1]. Luftspiegelungen sind neben Regenbögen dem Laien gut bekannte Beispiele für Naturerscheinungen in der Atmosphäre. Luftspiegelungen bieten nicht nur faszinierende Anblicke, sondern auch interessante Anregungen für den Physikunterricht ([1] bis [6]). Auch sind sie noch Gegenstand aktueller Forschungen [7].

### 1 Luftspiegelungen insbesondere für die Schule

Schüler sind durch persönliche Beobachtungen oder durch Begegnungen in der Literatur wie z.B. durch die Bücher von Michael Ende von Jim Knopf und Lukas dem Lokomotivführer, die durch die Aufführungen der Augsburger Puppenkiste berühmt wurden, mit dem Phänomen Luftspiegelung bekannt. Sie wissen, dass Reisende in der Wüste gar seltsame Trugbilder sehen, die Lukas mit dem Spiegelkabinett der Fata Morgana erklärt. Oft wird im Deutschunterricht auch Goethes Faust II gelesen, in dem es heißt:

*Vernahmst Du nichts von Nebelstreifen,  
Die auf Siziliens Küsten schweifen?  
Dort, schwankend klar, im Tageslicht,  
Erhoben zu den Mittellüften,  
Gespiegelt in besondern Düften,  
Erscheint ein seltsames Gesicht:  
Da schwanken Städte hin und nieder,  
Wie Bild um Bild den Äther bricht.*

Offensichtlich nutzt Goethe in der Tragödie 2. Teil neben anderen Erscheinungen der Atmosphäre wie blutroter Himmel und Elmsfeuer auch die Luftspiegelung, die der Kaiser als ahnungsvollen Vorboten vor der Schlacht ansieht.

Luftspiegelungen waren bereits im antiken Griechenland und Italien bekannt, allerdings sind sie in Wüstengegenden (Asien und Afrika) noch geläufiger. Heute kennt man sie als *Kimmung* (Hebung des Horizonts durch Refraktion, seemänn. Sprachgebrauch) oder *Seeteufel* (Spiegelung von Schiffen am Horizont) an praktisch allen Küsten, insbesondere auch in kälteren Regionen. Im Landesinneren sind sie z.B. in Ungarn als das früher häufig beobachtete *Steppengesicht* bekannt. Historische Anmerkungen zu Luftspiegelungen und zur Etymologie des Begriffs finden sich in [8]. Schöne Bild- und Informationsquellen zu diesem Thema sind die Filme *Fata Morganen - Zauberspiegel am Horizont* bzw. *Fata Morgana - Naturwunder und Zauberspuk* [9].

Die Bezeichnung Fata Morgana für die Luftspiegelungen lässt sich nach einer Legende auf Morgana, eine Fee und Halbschwester des sagenumwobenen König Artus zurückführen, die ihre Macht durch Luftspiegelungen ausübte. Italienische Dichter beschrieben sie als in einem Palast nahe den Meereswegen wohnend.

Wahrscheinlich wurden ihr deshalb auch die komplizierten Spiegelungen zugeschrieben, die gelegentlich in der Straße von Messina auftauchen, wobei Felsen und Klippen in wunderbare Säulen und Mauern eines scheinbar riesigen Palastes gedehnt werden.

Naheliegenderweise sind viele Luftspiegelungen auch mit Aberglauben verknüpft. Ein Beispiel (siehe [10], [11]) stammt aus dem Kings Mirror, einer Sammlung mittelalterlicher Geschichten aus der Mitte des 13. Jahrhunderts. In dem Kapitel über den Nordatlantik wird unter anderem auf den sogenannten Wassergeist (merman) eingegangen, der so beschrieben ist:

*Dieses Ungeheuer ist lang, sehr groß und es erhebt sich gerade aus dem Wasser heraus... Es hat Schultern wie ein Mann, aber keine Hände. Sein Körper verengt sich von den Schultern herunter. Je weiter man es nach unten beobachten konnte, desto schlanker hat es ausgesehen. Aber niemand hat jemals gesehen, wie das untere Ende geformt ist. ... Wann immer das Ungeheuer sich gezeigt hat, konnte man sicher sein, dass ein Sturm folgen würde.*

Eine ähnliche Beschreibung findet sich in einer 1170 verfassten norwegischen Geschichte. Diese mittelalterlichen Beschreibungen von Seeungeheuern lassen sich mit Kenntnis von Luftspiegelungen zwanglos erklären.

## 2 Physikalische Grundlagen der Luftspiegelungen

Optische Erscheinungen in der Atmosphäre - und damit auch Luftspiegelungen - lassen sich auf physikalische Wechselwirkungen von Licht mit den Bestandteilen der Atmosphäre (Atome, Moleküle, Wassertropfen, Eiskristalle, Aerosole, ...) zurückführen (siehe [11]). Luftspiegelungen können entstehen, wenn die Lichtquellen innerhalb oder außerhalb der Atmosphäre liegen. In erster Näherung lassen sich Luftspiegelungen im Strahlenmodell des Lichts mit Hilfe der Brechung und der damit verbundenen Totalreflexion deuten. Als Vorstufe zur Deutung der Luftspiegelungen werden zunächst gekrümmte Lichtwege diskutiert, die zu der aus der Astronomie bekannten „atmosphärischen Refraktion“ führen.

Die optischen Eigenschaften der Atmosphäre werden durch den Brechungsindex  $n$  beschrieben, der die Lichtausbreitung in der jeweiligen Materieschicht bestimmt. Bei idealen Gasen hängt  $n$  im sichtbaren Spektralbereich von der Teilchendichte ab, die über die ideale Gasgleichung durch Druck  $p$  und Temperatur  $T$  mitbestimmt wird. Ein Zahlenbeispiel verdeutlicht dies: bei  $p = 1030$  mbar und einer Temperatur von  $T = 27^\circ\text{C}$  ergibt sich für trockene Luft  $n \approx 1,000266$ , eine Temperaturerhöhung von  $40^\circ\text{C}$  bei gleichem Druck (beispielsweise direkt über dem sich in der Sonne erwärmenden Erdboden) ergibt dagegen  $n \approx 1,000235$ . Solch

winzige Änderungen um  $\Delta n \approx 3 \cdot 10^{-5}$  sind verantwortlich für alle Arten von Luftspiegelungen. In einer ersten Modellannahme soll die Atmosphäre aus einer Gasschicht konstanter Dichte und somit auch konstantem Brechungsindex bestehen. Umgäbe diese die Erde als homogene Schicht, so würde sie bis zu einer Höhe von etwa 8 km reichen. Für einfallendes Licht gäbe es in dieser Höhe eine wohldefinierte Grenzfläche zwischen Vakuum und der Atmosphäre. Die Lichtbrechung würde für einen Brechungsindex  $n=1,000266$  der Gasschicht zu einer Winkelablenkung zwischen  $0^\circ$  (Lichtquelle im Zenit) und  $1,32^\circ$  (Lichtquelle am Horizont) führen, siehe Abbildung 1a. Das heißt, ein Beobachter würde einen Stern im Zenit in der tatsächlichen Richtung des Sterns beobachten, während ein Stern am Horizont um  $1,32^\circ$  abgelenkt wäre.

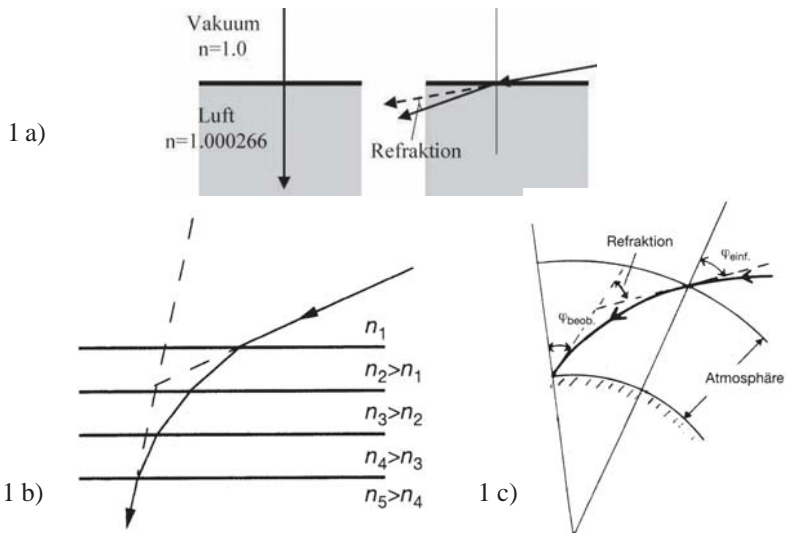


Abb. 1: Prinzip atmosphärischer Refraktion: Lichtstrahlen werden nur an einer einzigen Luftschicht gebrochen (a) Lichtstrahlen werden sukzessive an Luftschichten verschiedener Dichte gebrochen (b). Für eine kontinuierliche Änderung der Dichte, d.h. auch des Brechungsindex, führt dies zu gekrümmten Lichtstrahlen (c). Die Abweichung zwischen  $\alpha_{\text{einf.}}$  und  $\alpha_{\text{beob.}}$  bezeichnet man als Refraktion.

In Realität nimmt die Dichte der Atmosphäre und damit auch der Brechungsindex mit der Höhe ab. Im Modell einer isothermen Atmosphäre im Gravitationsfeld nimmt die Dichte exponentiell mit der Höhe über dem Erdboden ab. Entsprechend nimmt auch der Brechungsindex kontinuierlich mit zunehmender Höhe ab. Lichtstrahlen werden in einer solchen Atmosphäre nicht mehr nur an einer festen Grenzfläche gebrochen wie in Abb. 1a sondern das Licht durchläuft gekrümmte Wege.

Zur Erläuterung dieses Verhaltens denkt man sich die Atmosphäre in Luftschichten der Dicke  $\Delta x$  mit jeweils konstanter Dichte und damit gleichem Brechungsindex unterteilt (Abb. 1b). Einfallende Lichtstrahlen erfahren an jeder Grenzfläche eine Brechung, was zu den Sprüngen in der Ausbreitungsrichtung führt. Der Grenzübergang zu einem Medium mit kontinuierlicher Brechungsindexänderung führt zu den erwähnten *gekrümmten Lichtstrahlen* (Abb. 1c). In der Astronomie nennt man den Winkel zwischen der ursprünglichen Richtung und der tatsächlichen Beobachtungsrichtung einer Lichtquelle *Refraktion*. Bei senkrechtem Einfall (Lichtquelle im Zenit) beträgt sie  $0^\circ$ , bei  $45^\circ$ -Einfall immerhin schon eine Bogenminute ( $1' = 1/60^\circ$ ) und bei exakt tangentialem Einfall (Lichtquelle am Horizont)  $35'$ . Die Refraktion hat zwei Konsequenzen. Da die Winkeldurchmesser von Sonne und Mond mit jeweils etwa  $30'$ , d.h. einem halben Grad, kleiner sind als die Ablenkung bei  $90^\circ$ -Einfall bedeutet dies, dass Sonne oder Mond in geometrischer Projektion schon (oder noch) unter dem Horizont sind, wenn wir sie noch (schon) über dem Horizont sehen. Die Abhängigkeit der Refraktion vom Einfallswinkel führt zweitens zu einer elliptischen Verformung. Der Oberrand der Sonne ( $89,5^\circ$ -Einfall) erleidet eine um  $6'$  geringere Refraktion als der Unterrand ( $90^\circ$ -Einfall). Dementsprechend verformt sich die Sonne elliptisch (in Reinkultur nur bei normal temperaturgeschichteten Atmosphären ohne Inversion, siehe unten).

### 3 Luftspiegelungen: Qualitative Beschreibung und Beobachtungen

Luftspiegelungen treten allgemein dann auf, wenn große Temperatur- und somit Dichteunterschiede in der Atmosphäre vorliegen. Analog zur Refraktion kommt es durch die daraus resultierende kontinuierliche Änderung des Brechungsindex zu gekrümmten Lichtstrahlen. Je nachdem, ob der Boden wärmer als die darüber befindliche Luft ist oder ob es in der Atmosphäre eine Inversionsschicht, das heißt eine Region warmer über kälterer Luft gibt, unterscheidet man untere und obere Luftspiegelungen. Die Kopplung der beiden Phänomene führt zu komplizierteren Erscheinungen. Zusätzlich gibt es bei vertikal orientierten sonnenbeschienenen Flächen auch die Möglichkeit, dass sich warme Luft seitlich neben kälterer Luft befindet, was zu seitlichen Spiegelungen führen kann. Die Feinstruktur der Luftspiegelungen, die sich durch Flimmern und zeitlich verändernde Bildstruktur auszeichnet, kommt durch lokale Dichtefluktuationen (Turbulenzen) zustande.

#### 3.1 Untere Spiegelungen

Abb. 2 zeigt das Entstehungsprinzip für untere Luftspiegelungen. Es ist das Beispiel einer Palme in der Wüste gezeigt, von deren Spitze Sonnenlicht in alle Richtungen gestreut wird. Der Boden hat die direkt darüber befindliche Luftschicht erwärmt, dort liegt deshalb ein niedrigerer Brechungsindex vor als in Augenhöhe eines Beobachters. Lichtstrahlen, die von der Spitze der Palme ausgehen durchlaufen daher unterschiedlich stark gekrümmte Wege. Der obere von der Palme

zum Auge des Beobachters eingezeichnete Lichtstrahl steht dabei für ein ganzes Strahlbündel. Die Lichtstrahlen dieses Bündels durchlaufen alle ähnliche Lichtwege und treten alle durch die Augenlinse des Beobachters und erzeugen so auf der Netzhaut das Bild der Palme. Im Beispiel kann der Beobachter so die Spitze der Palme direkt sehen. Andererseits trifft auch ein in der bodennahen Luftschicht gespiegelter Lichtstrahl (der wieder für ein ganzes Strahlenbündel steht) ins Auge des Beobachters (weitere von der Spitze der Palme ausgehende Lichtstrahlen, die das Auge des Beobachters verfehlen, sind aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen). Da der Beobachter nichts von den gekrümmten Lichtstrahlen weiß, vermutet er den Gegenstand in der rückwärtigen, geradlinigen Verlängerung der sein Auge treffenden Lichtstrahlen. Folglich sieht er zusätzlich zur realen Palme ein Bild einer auf dem Kopf stehenden Palme. Bei der Konstruktion der Lichtstrahlen im Rahmen der geometrischen Optik lässt sich dieser Sachverhalt vereinfacht durch ein Ersatzbild einer einzigen Totalreflexion an einem optisch dünneren Medium darstellen.

Anzumerken ist, dass es sich hier um eine allzu vereinfachte Erklärung zur Bildentstehung bei Luftspiegelungen handelt. Sie ist jedoch in allen einschlägigen

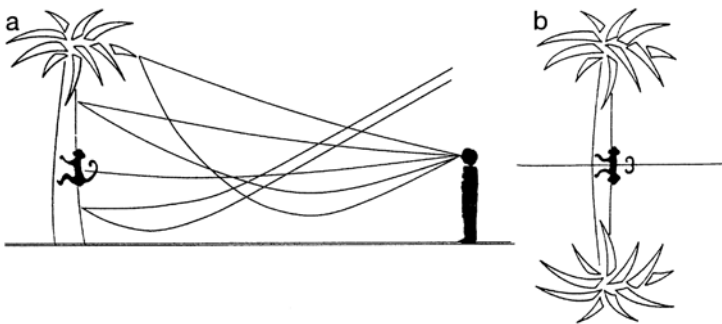


Abb. 2: Zur Entstehung der unteren Luftspiegelung und der vanishing line (a); beobachtetes Bild (b) (n. [4])

Darstellungen zu finden, ohne auf die getroffenen Vereinfachungen hinzuweisen. Aus optischer Sicht ist die Darstellung falsch, da man zur Festlegung eines Bildpunktes immer den Schnittpunkt von zwei Lichtstrahlen oder den Konvergenzpunkt eines Bündels kennen muss. Bei der üblichen Darstellung wird die Lage dieses Punktes offensichtlich geraten und deren Richtigkeit durch Bilder suggeriert. Für den Lernenden ist dieses Vorgehen verwirrend, zumal er vielleicht kurz vorher in der gleichen Unterrichtssequenz die Bildentstehung am ebenen Spiegel mit Hilfe der rückwärtigen, geradlinigen Verlängerung von Sehstrahlen eingesehen hat. Für die vereinfachte Darstellung spricht allerdings die Übersichtlichkeit und die Tatsache, dass es sich nur um eine qualitative Deutung handelt. Aus

fachdidaktischer Sicht sollten jedoch zumindest die getroffenen Näherungen genannt und diskutiert werden, um den Lernenden mit eventuell auftretenden Widersprüchen zum bisher Gelernten nicht allein zu lassen.



Abb. 3: Untere Luftspiegelung von Motorradfahrern auf einer heißen Straße (Foto E. Tränkle).

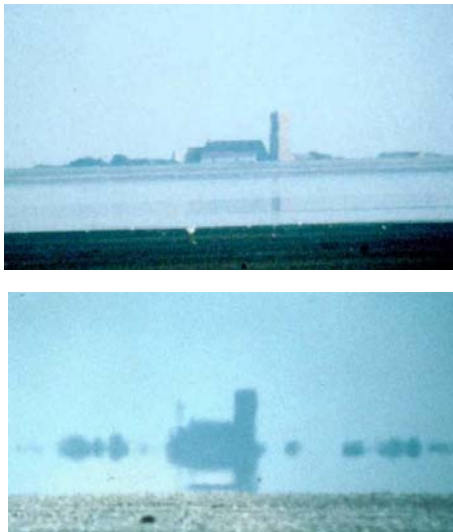


Abb. 4: Untere Luftspiegelung aufgenommen an der Nordsee. Die Kirche von Pellworm aufgenommen von Hooge bei sehr ruhigem Wasser mit  $f=500$  mm (oben) sowie von der Sandbank Japsand bei Ebbe mit  $f=1000$  mm (unten). Die Kirche spiegelt sich in der Luftschicht über dem trockengelegten Wattenmeer und man erkennt deutlich eine doppelte untere Spiegelung.

Je nach Bedingungen werden oft auch nur Teile von Gegenständen gespiegelt, d.h. es gibt eine so genannte *vanishing line*, unterhalb derer keine Gegenstände mehr sichtbar sind. Verfolgt man - von der Palmenspitze nach unten gehend - die von der Palme ausgesendeten und ins Auge treffenden Lichtstrahlenbündel so stellt man fest, dass es für einen durch Entfernung und Blickhöhe definierten Punkt in Höhe des Affen nur noch einen erlaubten Lichtweg gibt. Von der Palme gestreutes Licht, welches unterhalb dieses Punkts ausgesendet wird, muss aufgrund der möglichen Lichtwege das Auge des Beobachters verfehlen. Diese Gegenstandsteile sind somit nicht sichtbar, dementsprechend wird ein Beobachter der Palme das Teilbild 2b sehen.

Die für Mitteleuropäer bekannteste Form einer unteren Luftspiegelung ist die Illusion einer nassen Straße an einem heißen Sommertag. Die Straße sieht nass aus, weil sich entweder der Himmel oder Teile der Landschaft darin spiegeln. Der Eindruck der Nässe ist eine Interpretation unseres Gehirns, welches Spiegelbilder in der Natur oft mit spiegelnden Wasserflächen in Verbindung bringt (Abb. 3). Abb. 4 zeigt ein Beispiel einer unteren Luftspiegelung, aufgenommen im Hochsommer in der Nähe der Hallig Hooge in der Nordsee südlich von Sylt. Im Wattenmeer erwärmt sich bei Ebbe das vom Wasser freigelegte Watt und in einem Höhenbereich von 20 – 50 cm über dem Boden sinkt die Lufttemperatur um mehr als 2 Grad. Über Sandbänken ist die Temperaturdifferenz noch größer. Damit sind ideale Bedingungen für Luftspiegelungen gegeben. Abb. 4a zeigt das Objekt, die Kirche von Pellworm bei extrem ruhigem Wasser (gerade einlaufender Flut), aufgenommen von Hooge aus einer Entfernung von etwa 7,5 km. Man erkennt eine leichte Wasserspiegelung, die bei Wellenbewegungen vollständig verschwindet. Dieselbe Kirche ist im Teilbild 4b von der Sandbank Japsand aufgenommen aus einer Entfernung von etwa 11,2 km. Deutlich erkennt man die Folgen der *vanishing line*: es sind i.w. nur noch das Kirchenschiff und der Turm sowie die Dächer der niedrigeren benachbarten Gebäude - nicht aber die Küste Pellworms - zu sehen. Außerdem offenbaren die Bilder als Besonderheit eine doppelte untere Luftspiegelung, was leicht am zweifach auftauchenden Kirchenschiff zu sehen ist. Da es für das Zustandekommen der unteren Spiegelungen nur auf Brechungsindexunterschiede, d.h. auf Temperaturunterschiede ankommt, kann man sie auch im Winter beobachten. Dies ist immer dann möglich, z.B. bei Gewässern, wenn diese eine höhere Temperatur haben als die umgebende Luft (vergl. die Farbabbildung 6 in [12]; da im Schwarz-Weiß-Druck die Effekte nicht immer klar herauskommen, wird hier und im folgenden u.a. auch auf Farbabbildungen in der angegebenen Literatur verwiesen).

### 3.2 Obere Spiegelungen

Liegen in der Atmosphäre Inversionsschichten vor, d.h. ist die Luft in einer bestimmten Höhe wärmer und weist somit einen kleineren Brechungsindex auf als darunter und auch darüber (Abb. 5), so können durch die gekrümmten Lichtwege



obere Luftspiegelungen entstehen. Durch Konstruieren der möglichen optischen Lichtwege in einer Inversionsschicht wird klar, dass kleine Gegenstände extrem stark vertikal gedehnt und verzerrt werden können (Farbabbildung 8 in [12] zeigt eine Aufnahme aus dem finnischen Schärengebiet, in der kleine Inseln sich zu riesigen Mauern und Wällen auftürmen). Gelegentlich können sogar Dreifachbilder entstehen. In Abb. 5 (nach [4]) sieht man, wie ein Gegenstand - hier ein Segelschiff - drei Bilder erzeugen kann: das unterste direkte (von dem auch schon Teile fehlen können), darüber ein gespiegeltes, auf dem Kopf stehendes Bild, worauf wiederum ein aufrechtes drittes Bild auftauchen kann (jeder Lichtstrahl steht wieder für ein Strahlenbündel, welches im Auge ein Bild erzeugt). Solche Dreifachbilder sind in der Tat beobachtet worden. Reverend S. Vince blickte am 1.8.1798 von Ramsgate (Südostengland) auf die Nordsee und beobachtete seltsame Luftspiegelungen von Segelschiffen in der Nähe des Horizonts, die er aufzeichnete.

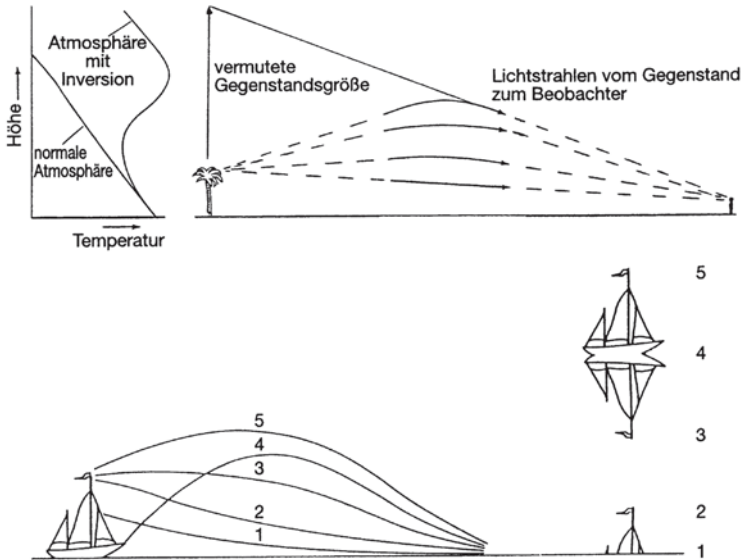


Abb. 5: Entstehungsprinzip der oberen Luftspiegelung an einer Inversionsschicht und Erklärung der Entstehung von Dreifachbildern (nach [4]).

Eine sehr interessante Beobachtung ist der sogenannte *Novaya Zemlya Effekt*. Er wurde zuerst 1596 beschrieben und ist nach der arktischen Insel gleichen Namens benannt, auf der eine Expedition, die auf der Suche nach der Nord-Ost-Passage war, notgedrungen überwintern musste [4, 13]. Im Frühling wurde plötzlich ein verzerrtes Sonnenbild über dem Horizont gesehen, obwohl - der geographischen Lage nach - die Sonne noch etwa  $5^\circ$  unter dem Horizont stand und ihre

Rückkehr und damit ein Ende des arktischen Winters erst zwei Wochen später erwartet wurde! Die Beobachtung erfordert eine stabile Inversionsschicht über flachem Gelände mit Ausdehnungen von typisch 400 km. In diesem Fall kann das durch die Inversion in Richtung Erde reflektierte Licht sich allein aufgrund der Erdkrümmung wieder nach oben bewegen und so zu wellenförmiger Ausbreitung über große Entfernungen führen.

#### 4 Quantitative Beschreibung von Luftspiegelungen

Um Luftspiegelungen quantitativ zu beschreiben, verwendet man Computerprogramme, die die Ausbreitung von Lichtstrahlen in von Modellen vorgegebenen Atmosphären gemäß dem Brechungsgesetz berechnen (ray tracing Methoden). Eines der Hauptprobleme der Modelle liegt in der Wahl der Temperaturverteilung in der Atmosphäre, mit der die räumliche Verteilung des Brechungsindex berechnet wird. In den meisten Fällen liegen keine oder bestenfalls punktuelle Messungen über die großen Entfernungen entlang der Beobachtungsrichtung (d.h. des sogenannten Sehstrahls) vor. Als Lösung werden deshalb i.a. Temperaturprofile  $T(z)$  angenommen, die nur von der Höhe abhängen. Daraus wird ein höhenabhängiger Brechungsindex  $n(z)$  abgeleitet, der in die *ray tracing* Methoden eingeht. Die verschiedenen theoretischen Modelle (z.B. [14] bis [18]) unterscheiden sich i.w. nur durch die Wahl von  $n(z)$ . Viele Modelle nehmen konzentrische Kugelschalen an, wobei auf den Oberflächen isotherme Bedingungen vorliegen und zwischen den Oberflächen geeignet approximiert wird. Bei großen Entfernungen muss die Erdkrümmung immer berücksichtigt werden, bei Spiegelungen mit Entfernungen im Bereich bis zu wenigen km wird gelegentlich auch ein kartesisches System als erste Näherung verwendet.

Abb. 6 zeigt eine Simulation von Tränkle [16] (das Temperaturprofil besteht aus einer Überlagerung eines linearen und eines exponentiellen Abfalls). Gezeigt ist ein Bild eines Autos wie es bei Bedingungen für Luftspiegelungen über erwärmten Strassen beobachtet werden kann. Deutlich erkennt man die Folgen des *vanishing line* Effekts: Ab Entfernungen von 1,2 km sind die Reifen nicht mehr sichtbar und ab 2,2 km verschwinden auch die Scheinwerfer, d.h. die Lage der



Abb. 6: Theoretische untere Luftspiegelung eines Autos (Simulation E. Tränkle). Die Augenhöhe liegt bei 1 m, das linke Bild zeigt das verwendete Objekt, die Entfernung zum Auto beträgt bei den rechts daneben befindlichen Bildern in km (von links nach rechts) 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,6; 2,8 und 3,0.

vanishing line verschiebt sich mit der Entfernung zwischen Beobachter und Objekt. Mit derartigen Simulationen lassen sich viele allgemeine Aussagen gewinnen, und man kann z.B. auch die manchmal kompliziert anmutenden Sonnenuntergänge verstehen, bei denen die Scheibe sich aufspaltet und sogar über dem Horizont unterzugehen scheint.

### 5 Simulationsexperimente von Luftspiegelungen

Neben Beobachtungen und theoretischen Modellen erlauben auch Experimente ein tieferes Verständnis von Luftspiegelungen [19] bis [22].

Eine Realisierung unterer Luftspiegelungen ist möglich mit Hilfe heißer Herdplatten, allerdings muss bei den erforderlichen flachen Winkeln die Plattengröße angepasst werden. In einer Anordnung nach Wood wird eine 2 - 3 m lange und 10 - 20 cm breite Metallplatte von unten durch Gasflammen gleichmäßig geheizt. Um Reflexion an der Metallfläche auszuschließen, sollte sie aufgeraut berußt oder mit einer dünnen Sandschicht bedeckt werden (was auch den Wüsteneindruck hervorhebt). Durch die Heizung von unten liegt der Fall vor, der für die Palme in der Wüste diskutiert wurde. Die warmen Luftschichten in Nähe der Platte führen zu einer Krümmung der schräg auf die Platte einfallenden Lichtstrahlen und somit zu einer unteren Spiegelung. Abb. 7 zeigt ein mit einem solchen Aufbau fotografiertes Spielzeugauto.

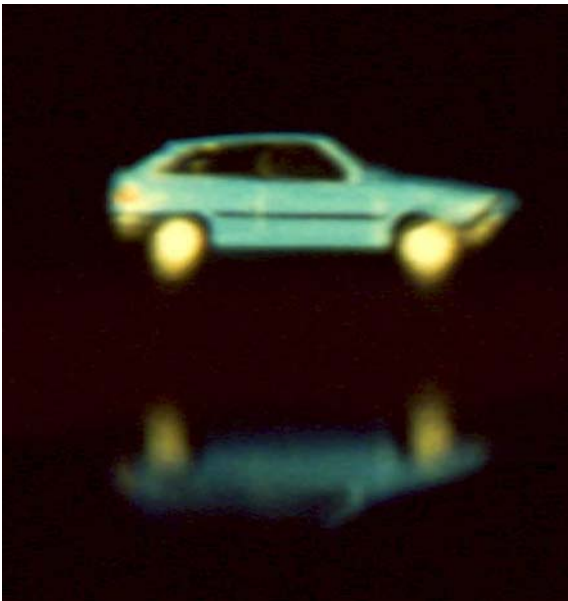


Abb. 7: Untere Luftspiegelung, aufgenommen an einer beheizten Metallschiene (Foto: M. Vollmer).

Auch die Ablenkung des Lichts kann so - sogar schon mit einer einzelnen normalen Herdplatte - für einen streifend einfallenden Lichtstrahl demonstriert werden [22]. Hierbei ist zu beachten, dass normalerweise über einer geheizten Platte praktisch immer Turbulenzen auftreten, welche die Beobachtung einer Lichtstrahlablenkung bzw. einer wohldefinierten unteren Spiegelung erschweren. Bläst man jedoch auf die Platte, wird die warme Luftschicht weggeblasen und es kann sich eine bessere homogene erwärmte Grenzschicht ausbilden, die schon bei einer Kochplatte zu einer Spiegelung, d.h. Ablenkung des Lichtstrahls in Plattennähe führt.

Ein anderes, gängiges Vorlesungsexperiment zeigt die gekrümmten Lichtwege in einer geschichteten Salzlösung, d.h. einer Lösung, bei der der Brechungsindex mit der Höhe variiert. Hierzu wird Leitungswasser mit einer Salzlösung höherer Dichte in einem Aquarium unterschichtet, wodurch sich aufgrund von Diffusion allmählich ein Brechungsindexgradient zwischen der unten befindlichen gesättigten Salzlösung ( $n \approx 1,364$ ) und dem darüber befindlichen reinen Wasser ( $n \approx 1,333$ ) ausbildet.

Somit liegt der Fall einer künstlichen Inversionsschicht vor, ähnlich der obigen Betrachtung von Inversionsschichten in der Atmosphäre (dort war Luft mit kleinerem Brechungsindex über Luft mit höherem Brechungsindex). Der wesentliche Unterschied: durch den um ca. 1000 höheren Unterschied im Brechungsindex werden die Spiegelungen schon in Entfernungen von Metern beobachtbar. Ein Lichtstrahl, z.B. eines He-Ne-Lasers, der unter flachen Winkeln eingestrahlt wird, verläuft auf einer gekrümmten Bahn und wird unter geeigneten Bedingungen total reflektiert (Abb 8a).

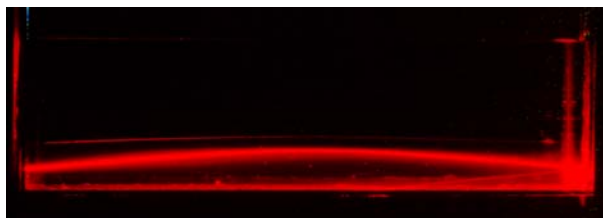


Abb. 8a: Gekrümmter Laserstrahl in einer geschichteten Salzlösung  
(Foto: M. Vollmer)

Damit sind die Voraussetzungen zur Beobachtung von oberen Luftspiegelungen (im Versuch eigentlich Salzlösungsspiegelungen) gegeben. Ein kleiner Gegenstand wird hinter das Aquarium gestellt und man beobachtet aus Entfernungen von etwa 1 m vor dem Aquarium. Mit dem Auge wird der Einfallswinkel und die Höhe variiert. Je nach Qualität der Lösung, Zeit nach Herstellung und Wahl der Beobachtungsparameter (Orientierung Objekt bzgl. der künstlichen Inversionsschicht, Augenhöhe und Blickwinkel) kann man entweder Dreifachbilder oder nur

vertikale Verzerrungen erkennen (siehe Abb. 8b). Bewegt man den oberen Wasserspiegel durch leichtes Rühren, so führen die Bilder wellenförmige seitliche sowie vertikale Bewegungen aus. Dabei können Bildteile periodisch verschwinden und wieder erscheinen. Diese Beobachtung spiegelt die realen Gegebenheiten in der Natur gut wider, wo aufgrund von Luftfluktuationen andauernd Bildveränderungen stattfinden. Mit diesem Aufbau kann man auch ein in der Natur sehr selten beobachtetes Phänomen, nämlich eine Farbaufspaltung bei den oberen sich berührenden Bildern durch Dispersionseffekte, demonstrieren (vgl. Farbabbildung 11 in [12]).



Abb.8b: Dreifachbild des Schriftzugs Fata Morgana und zweier Kreisel durch die Salzlösung aus Abb. 8 beobachtet (Foto: M. Vollmer).

## 6 Beobachtbarkeit der Phänomene

Die Grundregel für das Beobachten von Luftspiegelungen ist: *man muss sich klar machen, wo man wann nach was sucht*. In Deutschland sind Luftspiegelungen fast täglich beobachtbar in Form *nasser* erwärmter Straßen. Die eindrucksvolleren Spiegelungen an der Nordsee und in der Wüste sind dort ebenfalls fast täglich zu beobachten. Obere Luftspiegelungen sind an Inversionswetterlagen gebunden und daher praktisch überall, wegen der sehr klaren Sichtverhältnisse vor allem auch in der Antarktis beobachtbar.

Zum Abschluss soll nochmals Marcel Minnaert zu Wort kommen.

*Glauben Sie nur nicht, die unendlich verschiedenen Stimmungen der Natur verlören für den wissenschaftlichen Beobachter etwas von ihrer Poesie. Nein ! Indem uns das Beobachten zur Gewohnheit geworden ist, ist unser Gespür für Schönheit geschärft... .*

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] MINNAERT, M.G.J.: *Light and Color in the Outdoors*, Springer (1993), deutsch Birkhäuser (1992) Erstauflage 1937
- [2] GREENLER, R.: Phys. Bl. 54 (2), 133 - 139 (1998)
- [3] PERNTNER, J.M.; F.M. EXNER: *Meteorologische Optik*, W. Braumüller, Wien, 2. Auflage (1922)
- [4] GREENLER, R.: *Rainbows, Halos, and Glories*, Cambridge (1980)
- [5] Lynch, D.K.; W. Livingston: *Color and Light in Nature*, Cambridge (1995)
- [6] MERZYN, G.: NiU-P/C 30/9, 313-318 (1982); 32/2, 56-66 (1984)
- [7] *Proc. of the Conferences on Light and Color in the Open Air:* Applied Optics 30, (24/1991); Applied Optics 33, (21/1994); Applied Optics 37, (9/1998);  
Proc. der Tagung von 2001 erscheint voraussichtlich Januar 2003
- [8] LÖW, A.: *Luftspiegelungen: Naturphänomen und Faszination*, BI Wiss. Verlag, Mannheim (1990)
- [9] ENGLER, M.: *Fata Morganen - Zauberspiegel am Horizont*, Film bei Arte/NDR3 (1996),  
M. ENGLER: *Fata Morgana - Naturwunder und Zauberspuk*, Film bei Arte (2001); siehe auch GEO, S. 144-162 (5/1992)
- [10] LEHN, W.H.; I. SCHROEDER: Nature 289, 362-366 (1981)
- [11] VOLLMER, M.: Physik in unserer Zeit 26, 106 - 115; 176 - 184 (1995);  
Themenheft Atmosphärische Optik,  
Praxis der Naturwissenschaften Physik 3/46 (1997)
- [12] VOLLMER, M.: Phys. Blätter 54, 903-909 (1998)
- [13] LEHN, W.H.; B.A. GERMAN: Appl.Opt. 20, 2043 - 2047 (1981)
- [14] Wegener, A.: Annal. d. Physik, Band 57, 203 - 230 (1918)
- [15] LEHN, W.H.: Appl. Math. Modelling 9, 447 - 453 (1985)
- [16] TRÄNKLE, E.: Appl. Opt. 37, 1495 - 1505 (1998)
- [17] W.H. LEHN, W.H.; T.L. LEGAL: Appl.Opt. 37, 1489 - 1494 (1998)
- [18] TRÄNKLE, E.: Praxis der Naturwissenschaften Physik, 3/46, 40-46 (1997)
- [19] VOLLMER, M.; R. TAMMER, Appl. Opt. 37, 1557 - 1568 (1998)
- [20] GREENLER, R.: J. Opt. Soc. Am. A4, 589-590 (1987)
- [21] TAPE, C.: Phys. Teacher 38, 308-311 (2000)
- [22] MÖLLER, H.; W. B. SCHNEIDER, Physik in der Schule 32 (12) S. 63 (1993)