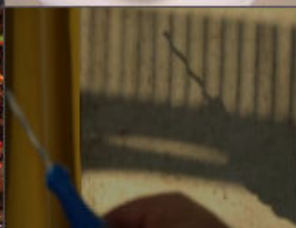
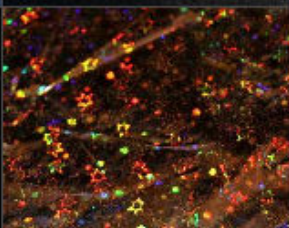
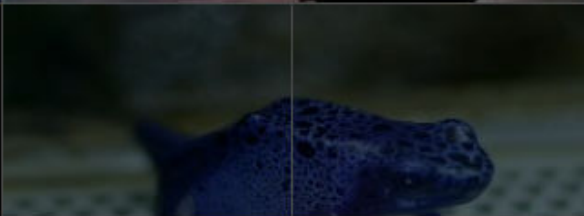
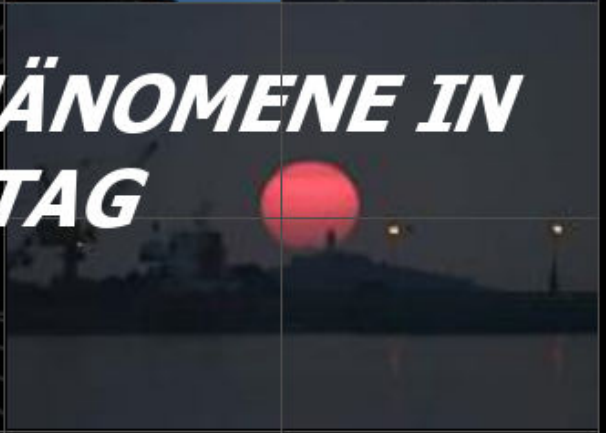


OPTISCHE PHÄNOMENE IN NATUR & ALLTAG

Tobias Haist



Inhaltsverzeichnis

1	Was ist Licht?	3
2	Schatten, Abbildungen und Perspektive	5
2.1	Die Definition von Schatten	6
2.2	Kernschatten und Halbschatten	8
2.3	Lochkamera	13
2.4	Dreidimensionales Sehen	18
2.5	Perspektive	20
2.6	Schatten und Perspektive	22
2.7	Schatten im Volumen	25
2.8	Weiteres zum Thema Schatten und Perspektive	29
2.9	Moire	34
3	Farbe	39
3.1	Grundlagen der Farbwahrnehmung	41
3.2	Absorption und Emission	46
3.3	Farbpigmente und Farben in der Natur	51
3.4	Farbmischung	54
3.5	Farbabgleich, Farbkonstanz und Farbwahrnehmung	61
3.6	Farbänderung	64
3.7	Pulver, Schäume und Schnee	68
4	Streuung	71
4.1	Rayleigh–Streuung	73
4.2	Weiteres zur Farbe des Himmels	76
4.3	Airlight	82
4.4	Wo Rayleigh–Streuung noch auftritt	82

4.5	Mie-Streuung	84
4.6	Mehrfachstreuung	85
5	Brechung	93
5.1	Fermat'sches Prinzip	94
5.2	Farbe und Brechung	97
5.3	Bildanhebung	98
5.4	Luftspiegelungen	102
5.5	Grünes Leuchten	107
5.6	Linse	107
5.7	Brechung und Wasser	109
5.8	Retroreflexion	111
5.9	Regenbogen	113
6	Reflexion	123
6.1	Reflexionsgesetz	124
6.2	Spiegeloptik	127
6.3	Fresnel Gleichungen	135
6.4	Reflexion und Wellen	138
6.5	Nass = Dunkel	143
6.6	Halos	144
6.7	Dreidimensionale Effekte bei der Reflexion	154
7	Interferenz und Beugung	157
7.1	Licht als Welle	158
7.2	Interferenz an Schichten	160
7.3	Beugung - Übersicht und einführende Bemerkungen	168
7.4	Beugung	170
7.5	Beugung an Gittern und Spalten	172
7.6	Auflösung	179
7.7	Koronae, Glorien und Irisierung	184
7.8	Beugung und Regenbogen	191
7.9	Kohärenz und Speckles	193
8	Polarisation	199

8.1	Polarisatoren und Helligkeitsänderungen	200
8.2	Die Polarisation des Himmels	205
8.3	Doppelbrechung	208
8.4	Polarisation Sehen ohne Hilfsmittel	213
8.5	Weiteres zum Thema Polarisation	216
9	Lichtquellen	219
9.1	Thermische Quellen	221
9.2	Lumineszenz	228
9.3	Lichtemittierende Dioden	233
9.4	Polarlichter	235
9.5	Weitere Leuchterscheinungen	236
10	Auge	239
10.1	Aufbau des Auges	240
10.2	Helligkeitswahrnehmung und Fotometrie	250
10.3	Farbwahrnehmung	254
11	Visuelle Wahrnehmung	257
11.1	Wie kommt die Welt in den Kopf?	258
11.2	Mehrdeutigkeit	265
11.3	Caféhaus Illusion	272
11.4	Laterale Inhibition	276
11.5	Scheinbare Bewegung	281
11.6	Helligkeitswahrnehmung	290
11.7	Farbeffekte	294
11.8	Magnetische Hügel	295
11.9	Perspektiveneffekte	296
12	Weiterführende Literatur	305

Vorwort & Allgemeine Hinweise

*„Alles, was sie tun müssen, ist, Ihre Augen mit
dem Zauberstab zu berühren, der da heißt:
Wissen, worauf ich achten muss.“
(M. Minnaert)*

*„Was ist das Schwerste von allem?
Was dir das Leichteste dünkt:
Mit Augen zu sehen,
was vor den Augen dir liegt.“
(J.W. Goethe)*

Das obige Zitat von Marcel Minnaert beschreibt sehr gut die Problematik bei der Beobachtungen optischer Phänomene in unserer unmittelbaren Umgebung. Viele der Effekte begleiten uns seit unserer Kindheit und sind uns so geläufig, dass sie gar nicht weiter auffallen und unserer bewussten Wahrnehmung entgehen.

Erschwerend kommt hinzu, dass wenige von uns z.B. laufend den Himmel absuchen, um dort eventuell etwas ungewöhnliches zu entdecken. Wir sehen das, worauf wir unsere Aufmerksamkeit richten. Vieles in unserem Gesichtsfeld wird daher nicht wahrgenommen.

Dieses frei verfügbare eBook soll Ihnen helfen, optische Phänomene in Natur und Alltag zu sehen und diese zu verstehen. Es ist als Begleitung zur Vorlesung „Optische Phänomene“ am Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart entstanden. Hauptzielgruppe sind daher Studenten der Physik, des Maschinenbaus und des Studium Generale. Vorkenntnissen sind allerdings keine erforderlich, so dass weite Teile auch für Schüler der Oberstufe verständlich sein sollten.

Letztlich führen uns die optischen Phänomene natürlich durch das gesamte Gebiet der Optik, so dass es sich bei dem Ihnen hier vorliegenden Buch um ein Optikbuch handelt. Das Gebiet ist gleichermaßen faszinierend und riefzig und oftmals konnte ich es mir nicht verkneifen (auch wenn dadurch die Didaktik und Übersichtlichkeit leidet) aus meiner Sicht interessante Zusatzinformation mit aufzunehmen. Diese Zusatzinformationen finden sich meist in Fußnoten damit die Struktur des Textes nicht allzu sehr eingeschränkt wird.

Falls Sie über schlecht geschriebene Erklärungen oder gar Fehler stolpern sollten: Schreiben Sie mir bitte eine EMail. Außerdem freue ich mich natürlich über schönes Bildmaterial aller Art und Hinweise auf beeindruckende optische Phänomene, die hier bislang fehlen.

Stuttgart, Oktober 2009, V 1.2 (10/2009), T. Haist (haist@ito.uni-stuttgart.de)

Copyright



Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.5

Sie dürfen:

- den Inhalt vervielfältigen, verbreiten und öffentlich aufführen

Zu den folgenden Bedingungen:



Namensnennung. Sie müssen den Namen des Autors/Rechtsinhabers nennen.



Keine kommerzielle Nutzung. Dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden.



Keine Bearbeitung. Der Inhalt darf nicht bearbeitet oder in anderer Weise verändert werden.

- Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen die Lizenzbedingungen, unter die dieser Inhalt fällt, mitteilen.
- Jede dieser Bedingungen kann nach schriftlicher Einwilligung des Rechtsinhabers aufgehoben werden.

Die gesetzlichen Schranken des Urheberrechts bleiben hiervon unberührt.

Das Commons Deed ist eine Zusammenfassung des [Lizenzvertrags](#) in allgemeinverständlicher Sprache.

[Haftungsausschluss](#) 

Kapitel 1

Was ist Licht?

„Fünfzig Jahre angestrengten Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage 'Was sind Lichtquanten?' nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.“

(A. Einstein)

Gerne würde ich damit beginnen, Ihnen zunächst darzulegen, was Licht eigentlich ist. Schließlich ist die Optik die Wissenschaft des Lichts. Leider bin ich dazu nicht im Stande. Licht ist merkwürdig, wichtig und faszinierend. Und es ist mysteriös. Seit tausenden von Jahren beschäftigen sich die großen Naturforscher mit diesem seltsamen Etwas, das wir „Licht“ nennen. Viele der klügsten Köpfe, die die Menschheit hervorgebracht hat, haben sich mit der Wissenschaft des Licht beschäftigt und gewaltige Fortschritte wurden erzielt. Dennoch können wir auch heute noch nicht klar erklären, was Licht eigentlich ist. Licht ist und bleibt ein Faszinosum und Mysterium.

Neben der Faszination hat Licht eine enorme praktische Bedeutung. Ohne Licht wäre unser Leben natürlich nicht denkbar. Die Sonne, unsere wichtigste Lichtquelle (vgl. Kapitel 9), sorgt dafür, dass überhaupt Leben in der uns bekannten Form auf der Erde möglich ist.

Zu verstehen was Licht ist, ist ausgesprochen schwierig (zumindest wenn das Verständnis über eine simple Definition hinaus reichen soll). Eine Annäherung an das Phänomen „Licht“ soll im folgenden (in sehr kurzer Form) über einige Eigenschaften des Lichts erfolgen:

- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht ist extrem hoch (300.000 km/s). Weder materielle Körper noch Information kann sich schneller als Licht bewegen¹.
- Die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht erlaubt es uns, „in die Vergangenheit zu sehen“ (indem wir sehr weit entfernte Objekte beobachten).
- Licht verläuft zwischen zwei Punkten so, dass die Reisezeit für das Lichtteilchen, das sogenannte Photon extremal, also minimal oder maximal, wird.

¹Die Folge wären mögliche Kausalitätsverletzungen und passen daher nicht zum üblichen Weltbild eines Physikers.

- Licht verhält sich teilweise wie ein Strom aus Teilchen (Photonen).
- Licht verhält sich teilweise wie eine Welle. Dabei ist Licht die (sehr hochfrequente) periodische Schwingung eines elektromagnetischen Felds.
- Manchmal verhält sich Licht in einem Experiment gleichzeitig wie eine Welle und wie ein Strom aus Teilchen.
- Die Wellenlänge sichtbaren Lichts ist sehr kurz (400 bis 700 nm).
- Die Wellenlänge λ , die Ausbreitungsgeschwindigkeit c und die Frequenz ν von Licht sind über $c = \lambda\nu$ miteinander verknüpft.
- Die Wechselwirkung von Licht mit Materie wird durch verschiedene Modelle (insbesondere Brechung, Reflexion, Streuung, Beugung, Absorption, Quantenelektrodynamik) beschrieben.
- Die Lebensdauer eines ungestörten Photons ist (aus unserer Sicht) unendlich.
- Photonen sind die „Träger“ bzw. „Vermittler“ der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Von „Licht“ bzw. „Optik“ als der Wissenschaft von Licht sprechen wir, wenn die Wellenlänge des Lichts innerhalb eines Bereichs vom ultravioletten bis zum thermischen Infraroten liegt². Diese Einteilung ist zunächst aus physikalischer Sicht völlig willkürlich da die Photonen bzw. elektromagnetischen Wellen mit denen wir Licht beschreiben beliebige Wellenlängen aufweisen können. Eine Einschränkung ist aber in der Praxis dennoch sinnvoll denn viele der in diesem Bereich gültigen technischen Prinzipien sind außerhalb des „optischen“ Bereichs nicht anwendbar.

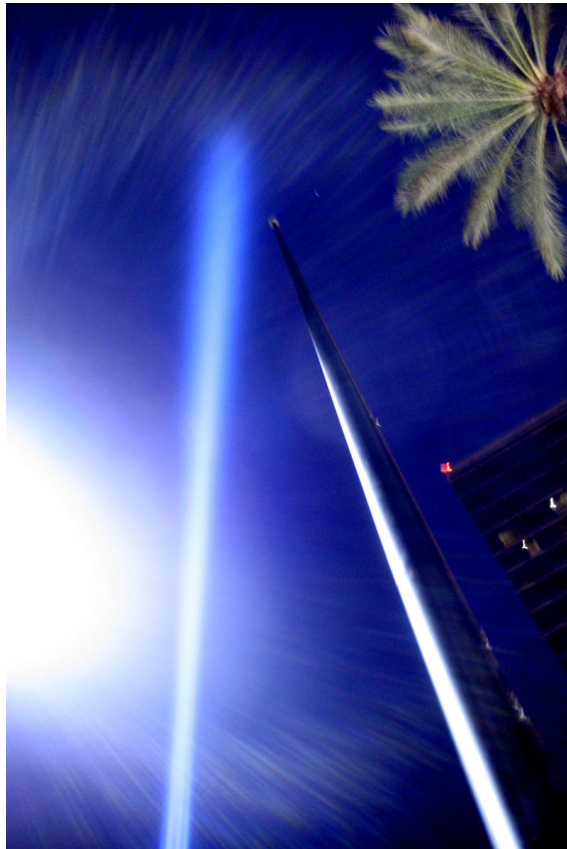
Die Vernachlässigung der Wellennatur ist dann zulässig, wenn alle „charakteristischen Größen“ eines optischen Problems deutlich größer als die Wellenlänge des Lichts sind. Solche charakteristischen Größen sind Dimensionen der optischen Elemente, aber auch insbesondere der Objekt- und Zielobjekte. Beugungseffekte, wie sie z.B. zur Begrenzung der maximalen Auflösung einer optischen Abbildung führen, werden im geometrischen Modell der Optik daher nicht berücksichtigt. Wir werden mit dem einfachen Strahlenmodell ohne Berücksichtigung der Beugung allerdings recht weit kommen. Lediglich die Kapitel 7 und 8 werden Effekte beschreiben, bei denen wir die Wellennatur des Lichts berücksichtigen müssen und Effekte, die auf der Quantennatur des Lichts beruhen werden wir komplett aussparen.

Basis unserer Beschreibung ist also zunächst der idealisierte „Lichtstrahl“. Wir denken uns das Licht als ein Strom von Teilchen, die mehr oder weniger mechanistisch beschrieben werden. Insbesondere laufen die Teilchen in homogenen Medien auf Geraden (eben den Lichtstrahlen).

²Viele Optiker definieren „Licht“ einschränkend auch als den für den Menschen sichtbaren Spektralbereich des elektromagnetischen Spektrums.

Kapitel 2

Schatten, Abbildungen und Perspektive



*"Don't fear the shadows, they only show that there's light."
(Unbekannt)*

*„Man meint, in ein paar Zeilen alles darüber (den Schatten)
sagen zu können, aber wenn man ihn aufmerksam studiert
und mitten in sein dunkles Herz späht, erweist er sich als
unendlich komplex.“*

(Roberto Casati)

*Licht breitet sich (meist)
geradlinig aus*

*Schatten helfen eine Szene zu
erfassen*

*warum die Gazelle einen hellen
Bauch hat*

*Fotografieren mit Blitzlicht:
Räumliche Wirkung wird ver-
mindert weil Schatten fehlen*

*Enge Verwandte: Schatten und
Perspektive*

Schatten sind uns mehr als vertraut. Egal ob künstliches oder natürliches Licht eine Szene beleuchtet, Schatten treten fast immer auf und lediglich bei diffuser Beleuchtung (z.B. bewölkter Himmel) verschwinden sie. Die bereits den Babyloniern bekannte geradlinige Ausbreitung von Licht reicht an sich vollkommen aus, um Abschattungen zu erklären. Aber obwohl wir eigentlich mit Schatten vertraut sein sollten, gibt es eine Reihe erstaunlicher Phänomene, die beim Schattenwurf auftreten und die in der Regel unbemerkt bleiben. Dass die sich ergebenden Effekte interessant und die Beschreibungen durchaus anspruchsvoll werden können, wird sich im Folgenden zeigen.

Schatten sind für den Eindruck einer Szene von großer Bedeutung. Sie helfen uns, die Form und Position von Objekten zu erfassen¹ und liefern Rückschlüsse auf die Positionen und Arten der Lichtquellen. Umgekehrt führt eine Maskierung des Schattens zu einer erschwerten Erkennung von Objekten. So sollen angeblich sehr viele Tiere (z.B. Gazellen) am Bauch hell gefärbt sein, um den Kontrast durch die Abschattung des Bauchbereichs (die Sonne kommt von oben) zu verringern. Dadurch sind diese Tiere weniger gut sichtbar, also getarnt.

Für die realistische Darstellung einer Szene ist die korrekte Einbeziehung von Schatten unbedingt erforderlich. Dies ist sowohl Malern als auch Grafikprogrammierern bewusst. Bei der Fotografie mit Blitzlicht fehlen die Schatten weil die Beleuchtung der Szene aus derselben Richtung wie die Beobachtung erfolgt. Schatten können so nicht gesehen werden und es ergibt sich ein etwas „unnatürlicher“ Charakter der Szene, der durch die fehlende „räumliche Tiefe“ der Fotos hervorgerufen wird. Umgekehrt führt eine Intensivierung von Schatten (z.B. per Bildverarbeitung) zu einer verstärkten räumlichen Tiefe (siehe Abb. 2.0.1).

Eng verknüpft mit der Gestalt von Schatten ist die Perspektive. Alles was wir mit unseren Augen wahrnehmen oder mittels einer Kamera auf ein Foto bannen, unterliegt der Zentralperspektive. Da Schatten eigentlich ein Volumen im Raum umspannen, ist die Perspektive für einige Schattenphänomene von besonderer Bedeutung und wird daher ebenfalls in diesem Kapitel besprochen. Schatten und Perspektive sind aber nicht nur eng in ihrem Auftreten verknüpft. Beide werden (teilweise) auch durch dieselben Formeln erfasst.

Schatten und Perspektive werden uns in diesem Kapitel auch zwanglos zu den Grundlagen der optischen Abbildung führen und schließlich werden wir das Kapitel mit einem kurzen Ausflug in eine ganz spezielle Form der Abschattung, das Moire, beschließen.

2.1 Die Definition von Schatten

Eine gute Definition für „Schatten“ zu finden ist erstaunlich schwierig. Nehmen wir die folgenden drei Grundsätze an:

1. Ein Schatten ist immer der Schatten eines Körpers,
2. ein Körper wirft seinen Schatten nicht durch einen anderen Körper und
3. um einen Schatten zu erzeugen muss der Körper beleuchtet sein.

¹In der optischen Messtechnik wird z.B. mittels Erfassung der Schatten auf die dreidimensionale Form eines Objektes oder der Auffangebene des Schattens rückgeschlossen (*Shape from Shadow*, *Schattenmoire*, siehe z.B. P. K. Rastogi, „Optical Measurement Techniques and Applications“, Artech House 1997).



(a) Szene mit Schatten

(b) Szene weitgehend ohne Schatten durch Blitzlichtbeleuchtung

Abbildung 2.0.1: Fehlende Schatten (z.B. bei der Blitzlichtfotografie) führen zu einer mangelnden räumlichen Tiefe und damit zu einem etwas „unnatürlichen“ Eindruck.

Selbst diese ziemlich ausführliche Definition kann bereits zu praktischen Problemen mit großen finanziellen Folgen führen: Eine Bauvorschrift in Tokio verlangte, dass ein neues Gebäude nicht andere Gebäude abschatten dürfe (es sei denn der Besitzer stimmt zu). Dieses Gesetz lässt sich aber nun einfach dadurch umgehen, dass wir als Hausbauer gleichzeitig zwei Häuser bauen: Nehmen wir an, wir haben Probleme damit, dass unser neues Haus B das bereits vorhandene Haus A abschatten würde (siehe Abb. 2.1.2). Wir bauen nun einfach ein Haus C, dessen Schatten das Haus B abschattet. Damit kann Haus B keinen Schatten mehr auf Haus A werfen denn es wird ja gar nicht beleuchtet. Haus C wirft aber ebenfalls keinen Schatten auf Haus A denn der Schatten von Haus C durchdringt ja nicht Haus B.

Definition „Schatten“: eine schwierige Angelegenheit

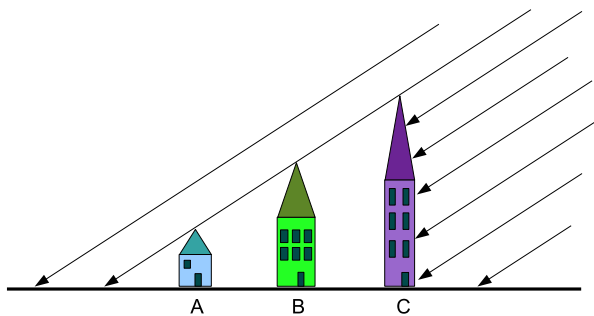


Abbildung 2.1.2: Die Definition von Schatten und Tokios Baurecht: Haus B schattet Haus A nicht ab, da es nicht beleuchtet wird. Haus C schattet Haus A ebenfalls nicht ab, da Haus B dazwischen liegt.

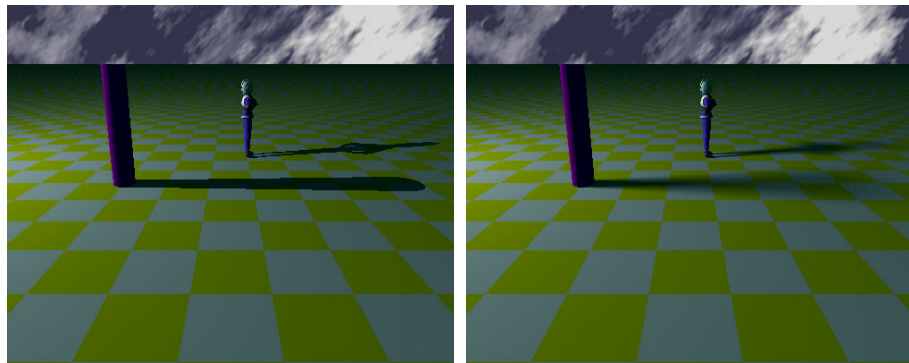
Abschattungen sind natürlich nicht nur in Tokio sondern in jeder modernen Großstadt relevant. Zwischen den beiden Weltkriegen wurde beispielsweise die Skyline New Yorks durch die Abschattungsprobleme dominiert. Um die Probleme zu verringern, wurden nach oben schmaler werdende Gebäude gebaut. Trotz aller Anstrengungen ist aber auch das heutige New York eine Stadt der Schatten.²

Wir wollen im Folgenden solche Probleme beiseite lassen und Schatten für unsere Zwecke ausreichend definieren mit: „Schatten sind Regionen relativer Dunkelheit in beleuchteten Gebieten, die durch eine vollständige oder unvollständige Verdeckung der Lichtquelle(n) durch Objekte hervorgerufen werden.“

Unsere vereinfachte Definition von Schatten

2.2 Kernschatten und Halbschatten

Wie sieht nun aber die Helligkeitsverteilung eines Schattens aus? Das, was wir uns idealerweise unter einem Schatten vorstellen, nämlich einen scharfen Helligkeitssprung am Rand des Schattens zur Umgebung beobachtet man nur für nahezu punktförmige Lichtquellen³.



(a) Szene mit Punktquelle

(b) Szene mit ausgedehnter Quelle

Abbildung 2.2.3: Vergleich unterschiedlicher Helligkeitsverteilungen im Schattenbereich bei Beleuchtung mit verschiedenen Quellen. Bei ausgedehnten Quellen ergibt sich sowohl ein Kern- als auch ein Halbschattenbereich.

Alle ausgedehnten Lichtquellen führen dagegen zu einem *Kernschatten* (=Umbra) und einem *Halbschatten* (=Penumbra).

*Kernschatten = Umbra
Halbschatten = Penumbra*

Helligkeitsverteilung im Schattenbereich: Immer in Richtung Lichtquelle blicken!

Die Beleuchtungsstärke an einer beliebigen Position auf dem Boden im Schattenbereich können wir am besten aus Sicht des Punktes auf dem Boden selbst verstehen. Wir müssen uns also (gedanklich) in den Punkt setzen und in Richtung der Lichtquelle blicken. Wenn aus dieser Position viel von der Lichtquelle sichtbar ist, dann ist dieser Punkt hell, wenn wenig sichtbar ist, dann ist der Punkt eher dunkel (siehe Abb. 2.2.4).

Das Gebiet innerhalb des Kernschattens empfängt kein Licht von der Lichtquelle und ist also schwarz. Im Halbschattenbereich bleibt ein Teil

²R. Casati: „Die Entdeckung des Schattens“

³Eine gute Näherung an Punktquellen sind z.B. eine einige Meter entfernte LED oder die Reflexion der Sonne auf gekrümmten, spiegelnden Gegenständen (z.B. Chromteile an Auto)

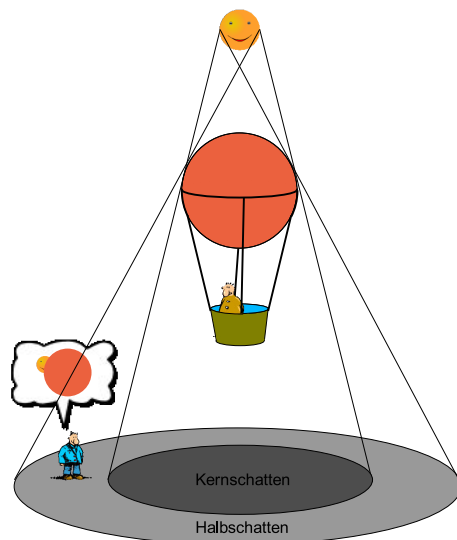


Abbildung 2.2.4: Die Beleuchtungsstärke an einem Ort ist proportional zur von diesem Ort aus sichtbaren Lichtquellenfläche. Es gibt Bereiche, die komplett im Dunkeln liegen (Kernschatten) und Bereiche, die teilweise im Dunkeln liegen (Halbschatten). Bild nach Falk et al.: „Seeing the light“, Wiley 1986.

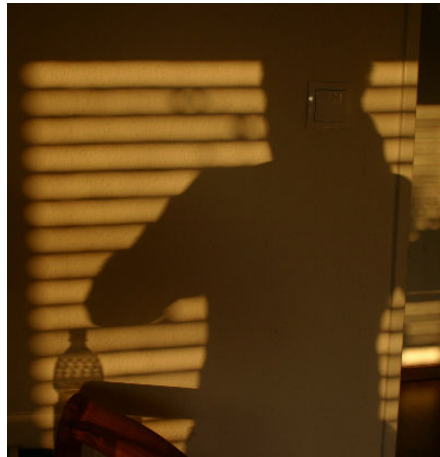
der Lichtquelle sichtbar. Dementsprechend herrscht dort weder vollständige Dunkelheit noch dieselbe Helligkeit wie im Hellbereich (außerhalb des Schattens). Die Helligkeit im Halbschattenbereich nimmt kontinuierlich vom Kernschattenrand zum Halbschattenrand zu. Weiterhin nimmt die Größe des Kernschattenbereichs mit der Größe der Quelle ab.

Als Helligkeitsverteilung ergibt sich letztlich ein (zweidimensionales) Faltungsintegral des Abschatters mit der Lichtquelle.⁴ Noch wesentlich anspruchsvoller ist die Berechnung, wenn mehrere Abschatter vorhanden sind, die in unterschiedlichem Abstand zur Lichtquelle liegen. In diesem Fall müssen die (binären) Abschattungsfunktionen mit dem Abstand skaliert werden und durch Faltungen verbunden werden. Entsprechend komplex und unerwartet sind die sich ergebenden Schatten (siehe Abb. 2.2.5).

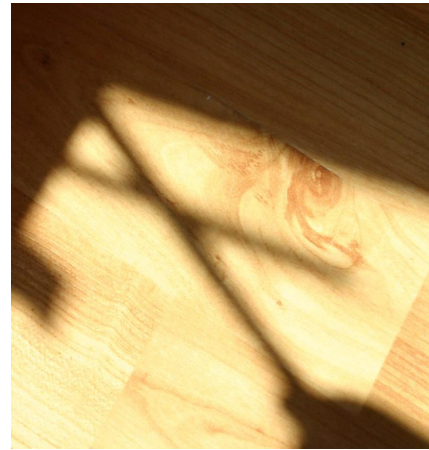
Kleine Objekte können nur dann bei ausgedehnten Lichtquellen einen relativ klaren Schatten werfen, wenn der Abstand zur Auffangebene des Schattens gering ist. Sie werden beispielsweise keinen Schatten aufgrund eines vor der Sonne fliegenden Vogels sehen können, wohl aber werden Sie den Schatten desselben Vogels gut sehen, wenn dieser auf dem Boden sitzt. Der hoch fliegende Vogel verdeckt für uns nur einen kleinen Teil der Sonne und daher ändert sich die Helligkeit am Boden praktisch nicht. Direkt hinter dem Vogel wird aber natürlich ein großer Teil der Sonne verdeckt, so dass sich dort ein starker Einbruch der Helligkeit ergibt. Wesentlich ist hierbei also der Effekt der Perspektive (siehe Abschnitt 2.5), der zu der Größenänderung des weit entfernten Vogels führt.

Kernschattenbereich nimmt mit der Ausdehnung der Lichtquelle ab

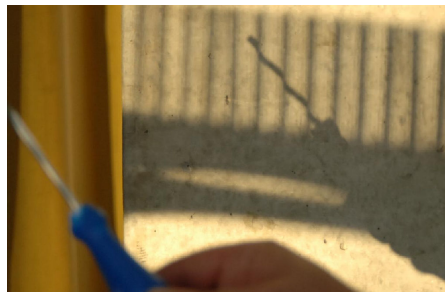
⁴z.B. C. Soler & F. Sillion, Fast Calculation of Soft Shadow Textures Using Convolution, Siggraph 98 Conf. Proc. (1998)



(a) Überlagerung von Schatten einer Jalousie und einer Person



(b) Überlagerung von zwei Schatten aufgrund von zwei Bleistiften



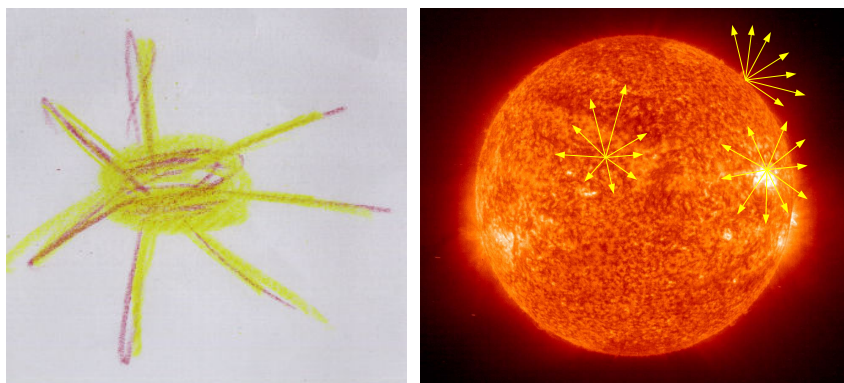
(c) Überlagerung der Schatten eines Schraubenziehers und eines Gitters



(d) Schatten eines Gitters

Abbildung 2.2.5: Schattenüberlagerungen bei ausgedehnten Lichtquellen ergeben oft merkwürdige Schatten, die nicht dem entsprechen, was man zunächst erwarten würde.

Für viele Menschen ist das Auftreten eines Halbschattens — obwohl wir solche Halbschatten praktisch täglich sehen — eher ungewohnt. Dies hängt vielleicht damit zusammen, wie wir seit unserer Kindheit ausgedehnt strahlende Objekte (insbesondere die Sonne) malen. Abbildung 2.2.6 (a) zeigt eine typische Kinderzeichnung der Sonne.⁵ Die Strahlen verlaufen senkrecht zur Sonnenoberfläche und scheinen daher von einem Punkt im Zentrum der Sonne auszugehen. Eigentlich handelt es sich daher um eine Punktquelle, für die sich kein Halbschatten ergibt. In der Realität laufen von jedem Punkt der Oberfläche aber Strahlen in alle möglichen Richtungen (siehe Abbildung 2.2.6 (b)).



(a) Kinderbild-Modell

(b) korrektes Modell, Hintergrundfoto: NASA

Abbildung 2.2.6: Wie verlassen die Strahlen die Sonnenoberfläche? Das naive Kinderbild entspricht nicht der Realität. Bei ausgedehnten Quellen starten die Lichtstrahlen von der Oberfläche mit allen möglichen Winkeln.

Beachten Sie, dass letztlich auch der Kernschattenbereich meist nicht komplett dunkel ist, da Photonen natürlich von anderen Lichtquellen trotzdem den Kernschattenbereich treffen können. Bei Sonnenschein dient z.B. der gesamte Himmel als sekundäre Lichtquelle und beleuchtet so den Schattenbereich. Da der Himmel blau leuchtet (siehe Abschnitt 4.1), ist der Schatten dementsprechend leicht blau (siehe Abb. 2.2.7).

Sehr anschaulich sieht man den Effekt des Kern- und Halbschattens bei einer Sonnenfinsternis. Bei einer totalen Sonnenfinsternis ergibt sich nur ein vergleichsweise kleiner Kernschattenbereich, von dem aus die Sonne komplett abgedunkelt erscheint. Innerhalb des weit größeren Bereichs des Halbschattens sieht man beim Blick in Richtung Sonne einen Teil der Sonne, d.h. der Mond schattet nur einen Teil der Sonne ab.

Der Durchmesser des Kernschattenbereichs d_K kann einfach aus der Skizze in Abbildung 2.2.8 abgeleitet werden. Für den Winkel ϕ zwischen der Horizontalen und der Begrenzung des Kernschattenvolumens gilt

$$\tan \phi = \frac{D - d}{2a} = \frac{d - d_K}{2a'} \quad (2.1)$$

Und damit dann

$$d_K = d - (D - d) \frac{a'}{a} \quad (2.2)$$

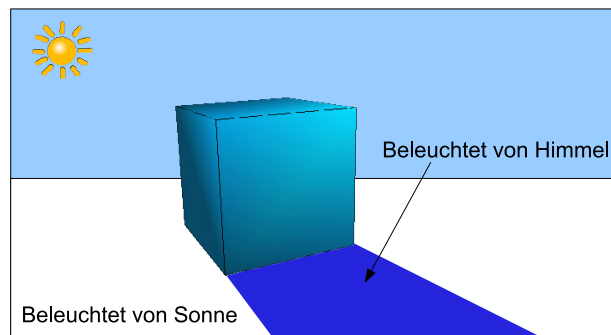
⁵Am Rande sei erwähnt, dass Kinder erst relativ spät dem Schatten ein Konzept zugrunde legen, das dem Erwachsenenmodell entspricht. Vielen Kindern wird erst im Alter von ca. 8 bis 9 Jahren klar, dass Schatten auf Lichtquellen angewiesen sind und ohne diese nicht existieren können (siehe R. Casati, „Die Entdeckung des Schattens“, BVT 2003).

farbige Schatten: Wenn zusätzliches Licht (z.B. blauer Himmel) vorhanden ist

Sonnenfinsternis: Anschauliches Beispiel für Kern- und Halbschatten



(a)



(b)

Abbildung 2.2.7: Blaue Schatten ergeben sich (unter anderem) durch die Bestrahlung des Schattenbereichs durch das blaue Licht des Himmels. Foto mit freundlicher Genehmigung von C. Kohler

Für den Fall der Sonnenfinsternis ergibt sich mit dem Abstand zur Sonne $a = 1,5 \cdot 10^{11}$ m, dem Abstand zum Mond $a' = 384 \cdot 10^6$ m sowie den Durchmessern $D_{\text{Sonne}} = 1,4 \cdot 10^9$ m und $D_{\text{Mond}} = 3,476 \cdot 10^6$ m ein Durchmesser des Kernschattens von stark 100 km⁶. Den direkten Blick in die Sonne sollten Sie im übrigen – auch während einer Sonnenfinsternis – vermeiden. Abb. 2.2.9 zeigt beispielhaft den Schaden, den eine ungeschützte Beobachtung der Sonne auf der Netzhaut nach sich ziehen kann.⁷

Schatten in der Astronomie

Schatten haben in der Geschichte der Astronomie eine große Rolle gespielt. Die erste korrekte Erklärung der Mondfinsternis, die ja eine Abschattung des Mondes durch die Erde ist, wird babylonischen Astronomen ca. 600 vor Chr. zugeschrieben. Aristoteles hat aus der Schattenform bei teilweiser Mondfinsternis auf die kugelförmige Gestalt der Erde geschlossen (ca. 350 vor Chr.).

⁶Da die Entfernungen zwischen Erde, Sonne und Mond im jahreszeitlichen Wechsel variieren, variiert auch der Kernschattendurchmesser zwischen ca. 100 und 200 km.

⁷M.J. Ruiz in Physics Education Sept. 2005, S. 11. Angeblich wurde der römische Herrscher Konstantin VII durch diesen vermeidbaren Fehler blind und auch der berühmte Galileo Galilei hat seine Augen dauerhaft durch die Betrachtung der Sonne durch ein Teleskop geschädigt.

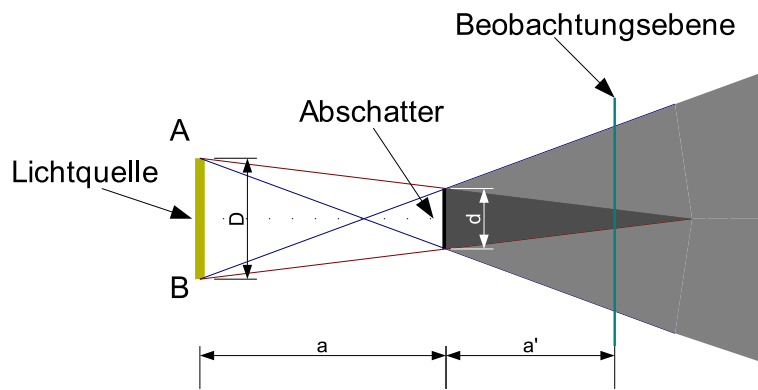


Abbildung 2.2.8: Kern- und Halbschatten, z.B. bei einer Sonnenfinsternis

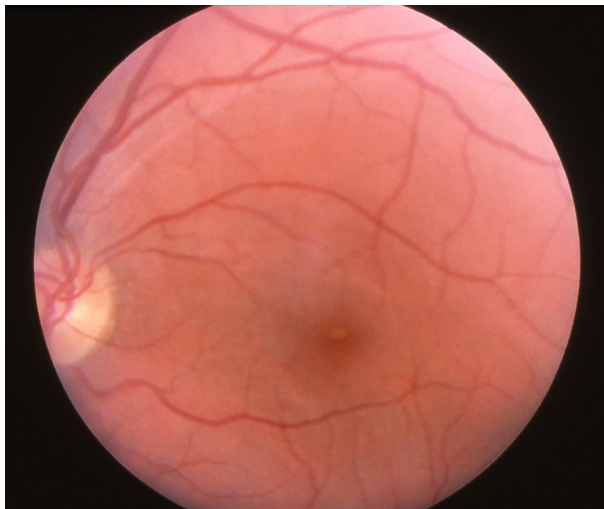


Abbildung 2.2.9: Der kleine helle Fleck im dunklen Bereich (fovea centralis) ist eine Verletzung der Netzhaut, die aufgrund der Betrachtung einer Sonnenfinsternis ohne Schutzbrille entstand. Der helle Bereich links, auf den die Blutgefäße konvergieren, ist der blinde Fleck. Foto mit freundlicher Genehmigung von Mark Clark, Foto: Charles Hunter, Anderson, South Carolina, USA

Die Vorhersage von Mondfinsternissen ist vergleichsweise einfach⁸. Sonnenfinsternisse sind dagegen wesentlich problematischer da sie prinzipbedingt vom Ort auf der Erdoberfläche abhängen. Im dritten Jahrhundert vor Christus konnte Aristarch durch Analyse der Finsternisse zeigen, dass die Entfernung Erde–Mond deutlich geringer ist als die Entfernung Erde–Sonne. Galilei erkannte 1610, dass die Venus nicht selbstleuchtend ist (sonst gäbe es keine Eklipse [griech.: Auslassen, Verschwinden] für die Venus) und Römer hat 1676 die Eklipsen der Jupitermonde genutzt, um die Lichtgeschwindigkeit zu messen.

2.3 Lochkamera

Betrachten Sie bei Sonnenschein (also kein bedeckter Himmel) die Lichtflecken unter einem relativ dicht belaubten Baum. Sie sollten feststellen, dass alle

⁸So konnte bereits Kolumbus die Ureinwohner von Jamaica durch die Vorhersage einer Mondfinsternis tief beeindruckten.

(oder zumindest viele) Flecken dieselbe elliptische Form aufweisen (siehe Abb. 2.3.10).

unter einem Baum sind elliptische Lichtflächen sichtbar

Wenn Sie eine der Lichtellipsen näher untersuchen, indem Sie den Lichtverlauf mit einem Blatt Papier verfolgen, sehen Sie, dass bei geeigneter Blattstellung die Ellipse zu einem Kreis wird.



(a) Lichtmuster

(b) Blätterdach

Abbildung 2.3.10: Elliptische Lichtmuster aufgrund von Löchern im Blätterdach (Lochkamera). Die Lichtellipsen sind verzerrte Abbildungen der Lichtquelle (Sonne).

Dass Ellipsen beziehungsweise Kreise auftreten, ist zunächst merkwürdig, da die Lücken im Blätterdach sicher nicht kreisrund sind, sondern eine mehr oder weniger zufällige Form annehmen. Es zeigt sich auch, dass die Größe der Lücken im Blätterdach praktisch nicht mit der Größe der Ellipsen korreliert. Vielmehr hängt die Ellipsengröße von der Höhe der Lücke ab.

die Lichtflecken sind Abbildungen der Sonne

Was Sie auf dem Boden (bzw. Blatt) sehen, ist letztlich nicht die Form der Lücken (Schatten), sondern das leuchtende Objekt, also die Sonne selbst. Jede Ellipse ist ein Bild der Sonne. Dieses Bild der Sonne kommt durch eine kleine Öffnung in der Laubdecke zustande. Die Öffnung wirkt als das Loch einer Lochkamera. Je heller der Fleck ist, desto größer ist das Loch. Wir haben es hier also nicht mit einem „Schatten“, sondern mit einer einfachen optischen Abbildung zu tun (Abbildung 2.3.11).

Dass es sich hier wirklich um Abbildungen handelt, können Sie während einer teilweisen Sonnenfinsternis verifizieren. In diesem Fall ergeben sich keine Ellipsen, sondern Sicheln auf dem Boden⁹ (siehe Abb. 2.3.12).

Ellipsen statt Kreise unter den Blättern wegen geneigtem Boden

Aufgrund der Projektion auf die Auffangebene (Auffangebene „Boden“ steht nicht senkrecht zur Lichtrichtung) ergibt sich als Abbild der Sonne nur dann ein Kreis, wenn die Sonne im Zenit steht. Ansonsten erhält man eine Ellipse. Sie können die Höhe der Lücke im Blätterdach leicht berechnen, wenn die Winkelausdehnung ϕ_S der Sonne bekannt ist ($\phi = \frac{1}{108}$ rad $\approx 0,5^\circ$). Es ergibt sich sofort

⁹Um nicht auf die nächste Sonnenfinsternis warten zu müssen können Sie auch die teilweise von einer Wolke verdeckte Sonne als un rundes Objekt „verwenden“.

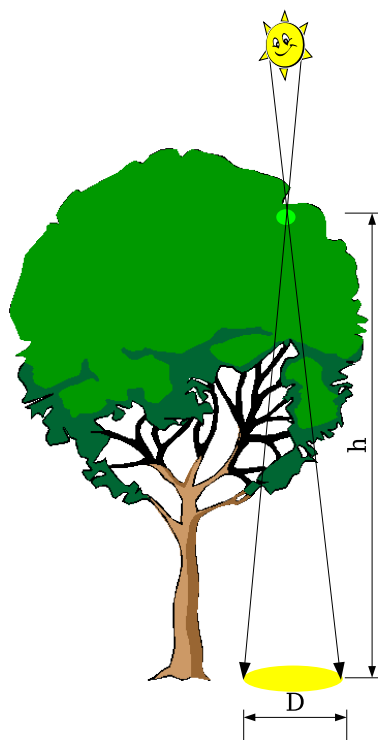


Abbildung 2.3.11: Entstehung der Lichtmuster unter Bäumen: Das Loch wirkt als das Loch einer Lochkamera. Die Berechnung erfolgt mittels des Strahlensatzes.

für den Durchmesser D des Sonnenbildes (Sonne im Zenit, siehe Abbildung 2.3.11)

$$D = h \tan \phi_S \approx h \cdot \phi_S = h/108. \quad (2.3)$$

Die *Lochkamera* (*Camera Obscura*, lat. „dunkle Kammer“) ist das einfachste Modell des menschlichen Sehens und der Mehrzahl optischer Abbildungssysteme¹⁰. Die für die Lochkamera geltenden Zusammenhänge beschreiben genauso Abbildungen mit Linsensystemen (Auge, Kamera). Es lohnt sich also, die Lochkamera etwas detaillierter zu betrachten und eine einfache aber enorm wichtige Gleichung, die wir im weiteren Verlauf noch öfter brauchen werden, abzuleiten.

Lochkamera: einfachstes Modell einer optischen Abbildung

Der grundsätzliche Aufbau einer Lochkamera ist in Abbildung 2.3.13 dargestellt. Ein kleines Loch dient dabei als abbildendes Element. Von jedem Objektpunkt starten Lichtstrahlen in alle möglichen Richtungen. Zur Bildebene gelangen aber nur die Strahlen, die das Loch passieren. Für ein sehr kleines Loch ist somit der Bildpunkt wegen der geradlinigen Lichtausbreitung direkt als Schnitt der Geraden durch den Objektpunkt und das Loch mit der Bildebene gegeben.

Der *Abbildungsmaßstab* β' ist definiert als das Verhältnis der Bildgröße y' zur Objektgröße y :

$$\beta' = \frac{y'}{y} \quad (2.4)$$

Aufgrund des Strahlensatzes muss y'/y aber gleich dem Verhältnis des Bildabstands a' zum Objektabstand a sein.

¹⁰Der Begriff „Camera Obscura“ wird oft auch zur Kennzeichnung einer filmlosen Kamera benutzt.

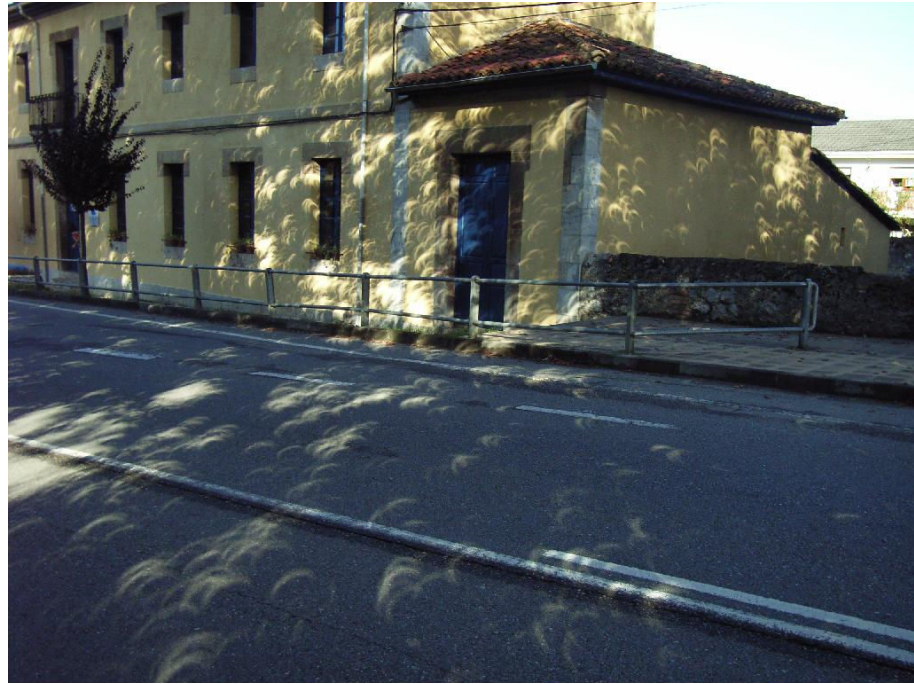


Abbildung 2.3.12: Abbildungen der Sonne durch die Löcher im Blätterdach bei einer partiellen Sonnenfinsternis. Aus den Ellipsen werden Sicheln. Foto mit freundlicher Genehmigung von Jan Liesener.

Abbildungsmaßstab

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}$$

Damit gilt:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (2.5)$$

Im Falle der Lochkamera sind a und a' als die Abstände von Objekt und Bild zum Loch definiert (siehe Abbildung 2.3.13). Im allgemeinen Fall (mehrkomponentige Abbildungssysteme oder dicke Linsen) sind a und a' die Abstände zur sogenannten *objektseitigen Hauptebene* und zur *bildseitigen Hauptebene*. Wir verwenden hier und im Folgenden bei optischen Abbildungen die oft anzutreffende Nomenklatur, dass gestrichene Größen Abstände im Bildraum und ungestrichene Größen Abstände im Ortsraum bezeichnen. Dies erklärt, warum β' und a' gestrichene Bezeichner haben. Bei der Lochkamera ist das Loch gleichzeitig objektseitige und bildseitige Hauptebene. Als Ursprung für a und a' dient also die Lochebene, so dass a negativ ist. Damit wird der Abbildungsmaßstab β' negativ.

das Bild ist invertiert

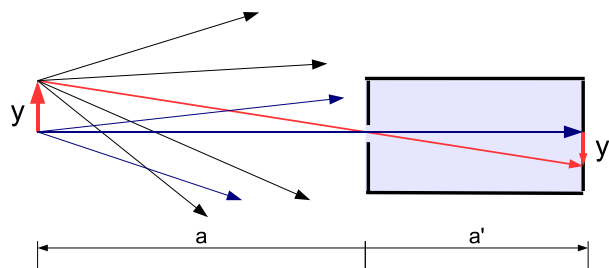


Abbildung 2.3.13: Prinzip der Lochkamera: Von den vielen Strahlen, die von einem Objektpunkt ausgehen, können nur sehr wenige (idealisiert ein Strahl) das Loch passieren. Dadurch ist die Bildposition über den Strahlensatz und die Geometrie der Kamera festgelegt.

Dies ist korrekt, denn in der Tat steht das Bild der Lochkamera „auf dem Kopf“, ist also invertiert. Nach der Wiederentdeckung der Lochkamera im Mittelalter war es im übrigen ein großes Rätsel, wie wir Gegenstände in der korrekten Orientierung sehen, obwohl das Lochkamerabild doch invertiert ist, also auf dem Kopf steht.¹¹

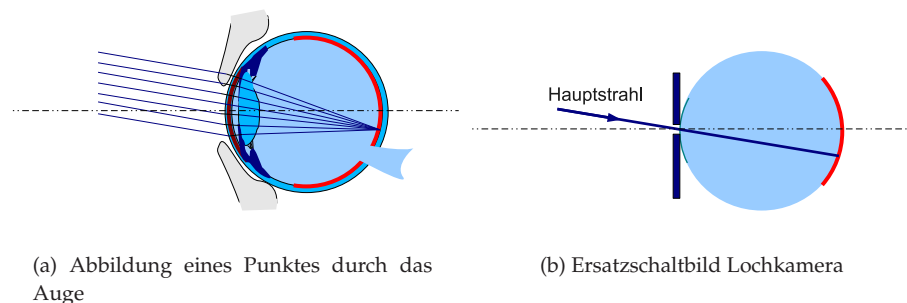


Abbildung 2.3.14: Die Bildentstehung am Auge kann durch ein einfaches Lochkameramodell beschrieben werden. Entscheidend für die Bildposition ist der Hauptstrahl, der durch das Zentrum der Blende (Iris) läuft.

Dass das Bild auf Ihrer Netzhaut invertiert ist können Sie durch ein einfaches Experiment nachvollziehen. Betrachten Sie mit dem rechten Auge eine weißes Blatt Papier. Drücken Sie dann leicht (!) mit dem Finger von der Nase her kommend schräg auf das Lid des rechten Auges. Sie werden bemerken, dass ein dunkler Fleck rechts in ihr Blickfeld wandert. Durch den Druck auf die linke Seite des rechten Auges behindern Sie die Blutzufuhr der Netzhaut in dem linken Bereich. Im Objektraum ist die Störung (dunkler Fleck) aber rechts in der Szene. Daher muss die Szene auf die Netzhaut offensichtlich invertiert abgebildet werden.

Die Lochkamera war bereits Aristoteles bekannt. Das Wissen um sie ging allerdings beim Übergang ins Mittelalter verloren. Um ca. 1000 unserer Zeitrechnung wurde sie von Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Haitham (im abendländischen Raum „Alhazen“ genannt) im heutigen Irak wieder entdeckt und erstmals schriftlich erörtert. Da Vinci hat sie um 1500 als Modell des menschlichen Auges benutzt, eine vollständige mathematische Beschreibung wie wir sie heute benutzen wurde erstmals von Kepler um 1604 angegeben und im Tierreich wird sie eher selten, vor allem bei sehr einfachen Tieren (z.B. Strudelwurm) verwendet. Das einzige größere Tier mit Lochkameraaugen ist der Nautilus.

Abgesehen von ihrer Einfachheit haben Lochkameras den Vorteil, dass die optische Abbildung wirklich exakt dem Strahlensatz entspricht und daher verzerrungsfrei ist und eine unendliche Tiefenschärfe aufweist. Der Hauptnachteil ist aber, dass durch das kleine Loch nur vergleichsweise wenig Licht des Objekts eingefangen werden kann. Daher muss vergleichsweise lange (Minuten) belichtet werden, wenn konventionelle Filme verwendet werden.

Weiterhin wird geometrisch betrachtet das Bild umso schärfer, je stärker die vom Objekt ausgehende Lichtbündelschar auf eine Gerade eingeschränkt, d.h. das Loch klein gemacht wird. Gleichzeitig wird mit dem kleineren Loch natürlich die im Bild ankommende Lichtmenge reduziert, d.h. das scharfe Bild

¹¹Natürlich ist dies kein Rätsel wenn Sie sich vor Augen führen, dass dieses Bild von unserem Gehirn nicht direkt gesehen wird, sondern nur zur Modellbildung der uns umgebenden Realität eingesetzt wird (vgl. Kapitel 11).

Alhazen

da Vinci
Kepler

Vorteile:

- Tiefenschärfe
- keine Verzeichnung
- keine Linse notwendig

Nachteile:

- sehr lichtschwach
- leicht unscharf

ist dunkler. Wir werden aber im Kapitel 7 sehen, dass bei sehr kleinen Löchern die Wellennatur des Lichts zu zusätzlichen Unschärfen führt und daher mit der Lochkamera keine perfekt scharfen Abbildungen erzielt werden können.¹²

Den Hauptnachteil der geringen Lichtausnutzung kann man vermeiden, indem man das Loch der Lochkamera durch eine Linse bzw. ein Linsensystem (also ein Objektiv) ersetzt. Dadurch werden dann auch Strahlen, die nicht durch das Loch der Lochkamera bzw. durchs Zentrum¹³ der Linse laufen, in Richtung desselben Bildpunkts abgelenkt. Sehr viel mehr Licht kann also jetzt genutzt werden. Dementsprechend ist diese Lösung sowohl in der Biologie (Auge) als auch in der Technik *die* Standardlösung.

Damit das ganze funktioniert kann allerdings nicht irgendeine Linse eingesetzt werden. Die Brennweite der Linse muss gemäß

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} + \frac{1}{a} \quad (2.6)$$

gewählt werden (wieder sind dabei die Vorzeichen wie bei der Lochkamera zu wählen). Die Tiefenschärfe ist also nicht mehr unendlich, sondern begrenzt denn für jede Objektdistanz a muss im Prinzip eine andere Linse gewählt bzw. das Objektiv nachfokussiert werden.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Grundgleichung der Abbildung $\beta' = a'/a$ unverändert auch für die Abbildung mit Linsen gilt. Bei Linsen erkaufte man sich den Vorteil der besseren Lichtausnutzung vor allem dadurch, dass man zusätzlich Bedingung 2.6 einhalten muss.

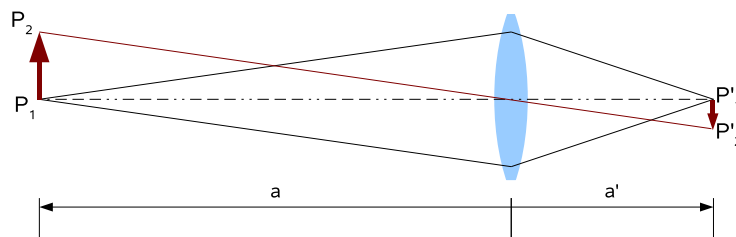


Abbildung 2.3.15: Abbildung durch eine Linse.

2.4 Dreidimensionales Sehen

Wir leben im dreidimensionalen Raum. Dementsprechend ist es nicht verwunderlich, dass die Abbildung auf eine zweidimensionale Netzhaut (siehe letzter Abschnitt) nur unzureichend die Wirklichkeit widerspiegeln kann. Um die Dreidimensionalität einer Szene zu erfassen bedient sich der Mensch unterschiedlicher Mechanismen:

- **Binokulares Sehen – Disparität:** Durch die Betrachtung der Szene mit *zwei* Augen aus unterschiedlicher Richtung kann auf die dreidimensionale Szene rückgerechnet werden (s.u.). Besonders für geringe Entfernungen (bis ca. 10 m) ist diese Art der Entfernungsbestimmung für uns beson-

¹²Für ein möglichst scharfes Bild ist ein Lochradius von ca. $\sqrt{\lambda a'}$ günstig, wobei die exakte Festlegung erstaunlich komplex ist (siehe www.biox.kth.se/kjellinternet/Pinhole.pdf).

¹³eigentlich durch den Schnitt der Hauptebenen mit der optischen Achse

ders wichtig. Auch technisch wird diese Art der Erfassung der Dreidimensionalität oft eingesetzt (z.B. *Stereo-Vision*, verschiedene *Triangulationsverfahren*). So wichtig sie auch ist, ein Überleben ohne diese Disparität ist kein Problem und jeder 20. Mensch ist stereoblind. Darüberhinaus wird diese für uns so wichtige und leistungsfähige Form der dreidimensionalen Wahrnehmung im Tierreich nur sehr selten eingesetzt (vermutlich aufgrund der notwendigerweise aufwändigen (also großes Hirn) Auswertung der Bilder).¹⁴

- **Binokulares Sehen – Konvergenz:** Bei der Betrachtung naher Objekte werden die beiden Augen auf dasselbe Ziel ausgerichtet. Aus der Orientierung der Augen kann auf die Entfernung rückgeschlossen werden.
- **Akkommodation:** Das „Scharfstellen“ der Augen, also die Einstellung der Augenlinse um ein scharfes Bild zu erzielen, kann zur Entfernungsbestimmung genutzt werden. In der Technik werden entsprechender Verfahren ebenfalls genutzt (*Depth from Focus*, *Depth from Defocus*).
- **Vorinformation:** Auch mit einem Auge und ohne Fokussierung können wir die Dreidimensionalität einer Szene gut beurteilen (z.B. beim Betrachten eines Fotos). Wesentlich ist dabei, dass wir aufgrund von Verdeckung und dem Wissen über Größenverhältnisse eine recht gute Tiefenschätzung vornehmen können. Wir wissen beispielsweise, wie groß ungefähr ein Auto ist. Rein aufgrund der Größe des Bildes eines Autos auf der Netzhaut können wir also grob die Tiefe bzw. Entfernung bestimmen (vgl. Abschnitt 2.5).
- **Bewegungsparallaxe:** Weit entfernte Objekte bewegen sich aufgrund der perspektivischen Verkleinerung langsamer als nahe Objekte. Dementsprechend können wir bei einer Relativbewegung von uns zur Szene leicht entscheiden, welche Objekte nah und welche fern sind.
- **Kontrast:** Bei sehr großen Entfernungen kann anhand des Kontrastes von Teilen der Szene auf die Entfernung geschlossen werden. Weit entfernte Objekte erscheinen (aufgrund der Streuung in der Atmosphäre, vgl. Kapitel 4) wenig kontrastreich.

Am überzeugendsten ist der dreidimensionale Eindruck, wenn alle Mechanismen gleichzeitig wirken und sich nicht gegenseitig widersprechen¹⁵.

Für optische Phänomene und technische Anwendungen ist die *Binokularität* und dabei vor allem die *Disparität* von besonderer Bedeutung und soll daher etwas eingehender besprochen werden.

Abb. 2.4.16 verdeutlicht das Prinzip: Zwei in unterschiedlicher Tiefe liegende Objektpunkte werden auf unterschiedliche Positionen auf den beiden Netzhäuten abgebildet. Angenommen die Position der Punkte ist dergestalt, dass sie gerade auf der optischen Achse des rechten Auges liegen, dann werden beide Punkte auf den selben Bildpunkt der Netzhaut des rechten Auges abgebildet. Auf der Netzhaut des linken Auges ergeben sich dagegen zwei getrennte Bildpunkte. Aus der Differenz der Bildpunktpositionen von rechtem und linkem Auge rechnet das Gehirn auf die Tiefe des Objektpunktes zurück. Die Tiefenauflösung steigt dabei linear mit dem Augabstand.¹⁶

Binokulares Sehen hat – neben der Erfahrung – den größten Einfluss auf das dreidimensionale Sehen

¹⁴S. Ings: *The Eye: A natural history*, Bloomsbury Publishing (2007)

¹⁵Insbesondere ergibt sich bei vielen 3D Displays eine mangelhafte Übereinstimmung von Fokussierung und binokularer Disparität.

¹⁶Vermutlich ist deshalb der Augabstand beim Hammerhai extrem vergrößert. Das Tier ist somit in der Lage die Entfernung zu seiner Beut extrem genau zu sehen.

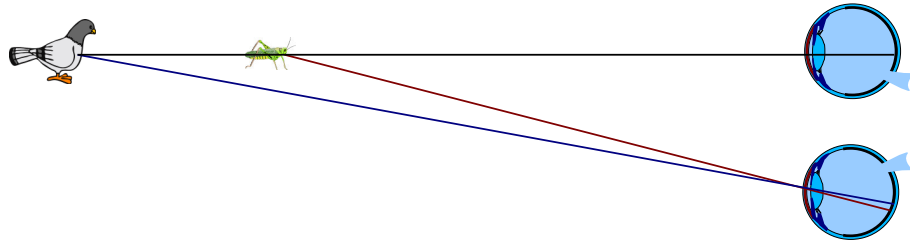


Abbildung 2.4.16: Binokulares Sehen: Zwei unterschiedlich weit entfernte Objekte, die für das eine Auge im selben Punkt auf der Netzhaut ein Bild ergeben, führen im anderen Auge zu unterschiedlichen Bildpunkten. Aus der Differenz der Positionen eines Bildpunktes im rechten und im linken Auge kann auf die Entfernung rückgerechnet werden.

Die Disparität ist letztlich auch Grundlage für Autostereogramme („Magic-Eye“). Ein Beispiel, das bereits auf Wheatstone (1838) zurückgeht, zeigt Abb. 2.4.17.

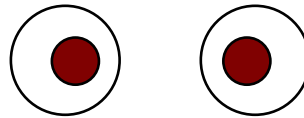


Abbildung 2.4.17: Stereogramm nach Wheatstone. Es handelt sich um eine einfache Form des „Magic-Eye“ Prinzips. Versuchen Sie, „durch die Seite“ durchzuschauen, also gezielt zu defokussieren um den Effekt zu sehen. Unter Umständen kann auch Schielen helfen. In jedem Fall gilt: Übung macht (meist) den Meister. Allerdings sind nicht alle Menschen in der Lage, bei entsprechenden Bildern eine räumliche Szene wahrzunehmen.

2.5 Perspektive

Die Abbildungsgleichung 2.5 erklärt auf einfache Weise die *perspektivische Abbildung*. Offensichtlich wird der Abbildungsmaßstab β' – und damit die Bildgröße y' – kleiner, wenn das Objekt weit entfernt ist (Objektabstand a ist groß). Dies erklärt den wichtigen Effekt, dass im dreidimensionalen Raum parallel laufende Linien sich im Bild (sowohl auf der Netzhaut als auch auf fotografischem Film) in einem entfernten Punkt, dem sogenannten *Fluchtpunkt*, schneiden. Sehr eindrucksvoll sieht man den Effekt bei Bahngleisen: Die Bohlen zwischen den Gleisen werden mit zunehmender Entfernung kleiner abgebildet (und zwar nach Gleichung 2.5 in linearem Zusammenhang). Daher müssen die die Bohlen verbindenden Geraden, nämlich die Schienen, sich scheinbar in einem Punkt im Unendlichen, im Fluchtpunkt, schneiden. Unterschiedliche Scharen jeweils zueinander paralleler Kurven schneiden sich im Bild in verschiedenen Fluchtpunkten.

Dieser Grundgedanke der perspektivischen Abbildung tritt bei nahezu allen optischen Systemen (z.B. Auge, Kamera) auf. Bei Anwendungen, bei denen der dreidimensionale Charakter des Objektfeldes vernachlässigbar ist (z.B. Betrachtung weit entfernter Objekte durch ein Teleskop) ist die Perspektive ohne Belang, da der Objektabstand a und damit dann auch der Abbildungsmaßstab β' nahezu konstant ist.

Bahngleiseffekt: Parallelen im Raum schneiden sich im Bild in Fluchtpunkten



(a) Ein Fluchtpunkt, Foto mit freundlicher Genehmigung von E. Steinbeisser.



(b) Zwei Fluchtpunkte

Abbildung 2.5.18: Perspektive und Fluchtpunkte: Parallele Linien im Raum schneiden sich in sogenannten Fluchtpunkten.

Für messtechnische Anwendungen in drei Dimensionen ist die Perspektive zunächst ein Problem. Wenn metrische Größen anhand eines Bildes bestimmt werden sollen (z.B. der Durchmesser einer Bohrung), die Lage (Tiefe) des Objekts aber unbekannt ist, wird die Aufgabe schwierig. Für vergleichsweise kleine Objekte¹⁷ kann eine sogenannte *telezentrische Abbildung* vorgenommen werden, bei der letztlich ein tiefenunabhängiger Abbildungsmaßstab β' durch Einführung einer Blende in der bildseitigen Brennebene des Abbildungssystems erzielt wird.¹⁸ Für große Objekte arbeiten technische Systeme oft analog zur Vorgehensweise des Menschen, indem mehrere Bilder (entsprechend den zwei Augen des Menschen) aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden. So kann auf die Tiefe eines Punktes und damit letztlich auch auf die gesamte 3D-Information geschlossen werden.¹⁹

Generell ist die Perspektive aber kein Fluch sondern ein Segen. Nur dadurch, dass weit entfernte Gegenstände klein im Bild erscheinen wird es uns möglich, ausgedehnte große Szenen zu erfassen und trotzdem nahe Objekte sehr detailliert untersuchen zu können.

*Telezentrie vermeidet variable
Abbildungsmaßstäbe*

„Perspektive = gut“

¹⁷kleiner als die Eingangsapertur des optischen Systems

¹⁸z.B. W.J. Smith: „Modern Optical Engineering“, SPIE/McGraw-Hill 2000

¹⁹z.B. Luhmann, „Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Meßtechnik“, Wichmann 2004

Die malerische bzw. zeichnerische Darstellung dreidimensionaler Szenen mittels der Perspektive war bereits im alten Rom bekannt. Im Laufe der Zeit ging dieses Wissen (wie auch das um die Lochkamera) wieder verloren und wurde erst in der Renaissance um ca. 1520 von Filippo Brunelleschi wieder entdeckt. Davor dominierte die *Bedeutungsperspektive* die Darstellung. Bei dieser Form der Beschreibung von Szenen werden Objekte im Bild nicht gemäß der realen Größe bei Betrachtung mit dem Auge gezeichnet. Stattdessen werden wichtige Objekte groß und unwichtige Objekte klein gezeichnet. Entsprechend werden auch andere Objektattribute (z.B. Farbe) nicht unbedingt durch die „physikalische Geometrie“, sondern durch die „spirituelle Geometrie“, also die ihnen inne wohnende Bedeutung festgelegt (z.B. „goldener Himmel“). Diese Form der Darstellung ist nicht nur für die Kunst von Bedeutung, sondern wird auch von Kindern verwendet. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2.5.19.

Bedeutungsperspektive: Objekte werden gemäß ihrer Bedeutung und nicht ihrer realen Bildgröße gezeichnet



Abbildung 2.5.19: *Bedeutungsperspektive: Objekte werden gemäß ihrer Bedeutung und nicht entsprechend ihrer realen Größe/Farbe gezeichnet. Das Bild stammt von einem 4 1/2 Jahre alten Jungen und zeigt ihn, wie er einen großen Hund ausführt. Die Arme sind besonders stark und groß gezeichnet da viel Kraft nötig ist, um den großen Hund zu führen. Foto mit freundlicher Genehmigung von Georg Keller (www.ergokreativ.onlinehome.de/kinder2.htm) aus Keller, Georg (2004) 'Körperzentriertes Gestalten und Ergotherapie', Dortmund: Verlag Modernes Lernen, S.48*

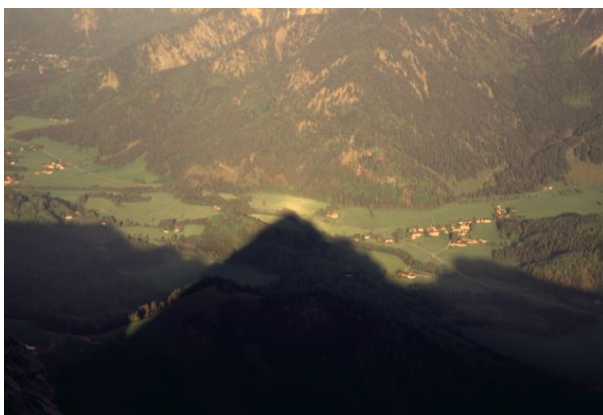
2.6 Schatten und Perspektive

Betrachten Sie Ihren Schatten auf dem Boden und an einer Wand in Abhängigkeit von der Tageszeit (Sonnenposition). Er sollte sich deutlich ändern. Oft denkt man (naiv), dass der Schatten die Form des den Schatten werfenden Objektes besitzt. Dies ist für parallele Beleuchtung (z.B. näherungsweise Beleuchtung durch Sonne) auch der Fall. Allerdings nur dann, wenn die Aufgabenebene des Schattens (z.B. Hauswand) senkrecht zur Beleuchtungsrichtung

liegt. Ansonsten ergibt sich – wie man sich leicht klarmacht – aufgrund der Projektion auf die Fläche eine Verzerrung bzw. eine Verzeichnung. Der Effekt ist jedem bekannt, der schon einmal seinen eigenen Schatten bei tiefstehender Sonne betrachtet hat (siehe Abbildung 2.6.20 (a)).



(a) Neigung der Auffangebene



(b) Bergschatten des Wetterscheins (und Oppositionseffekt),
Foto mit freundlicher Genehmigung von Claudia Hinz

Abbildung 2.6.20: Perspektiveneffekte bei Schatten: Die Auffangebene schneidet aus dem dreidimensionalen Schattenvolumen eine Ebene aus. Farbtafel: 12.0.1

Der Schatten eines Berges bei tiefstehender Sonne ist – unabhängig von der Form des Berges – dreieckig. (Abbildung 2.6.20 (b)). Der Grund für die dreieckige Form des *Bergschattens* liegt gerade in dieser perspektivischen Verzerrung des Schattens. Der Boden ist nicht senkrecht zur Beleuchtungsrichtung. Es ist also der uns bereits bekannte „Bahngleis–Effekt“.

Die Perspektive führt bei oberflächlicher Betrachtung von Schatten in Bildern zu Fehleinschätzungen. Nach wie vor behaupten z.B. viele Berichte und Internetseiten, dass die Mondlandung 1969 gefälscht war und die Amerikaner den Mond nicht betreten haben. Viele Argumente werden ins Feld geführt, aber ein wesentlicher Beweis dafür, dass die Mondbilder gefälscht sind sehen Skeptiker in den Schatten, die auf den Mondlandungsbildern zu sehen sind. Beispielsweise zeigt Abbildung 2.6.21 deutlich, dass die Schatten der Steine im Vordergrund nicht parallel zu den Schatten der Raumkapsel im Hintergrund verlaufen. Der Argumentation der Mondlandungsskeptiker zufolge kann dies

Bergschatten: Berge werfen unabhängig von ihrer Form einen dreieckigen Schatten

nur durch eine Photomontage oder gestellte (Studio) Bilder zustande kommen, denn die Sonne ist vom Mond sehr weit entfernt, daher fällt das Sonnenlicht parallel ein und daher müssen auch die Schatten parallel laufen.



Abbildung 2.6.21: War die Mondlandung 1969 gefälscht? Die Schatten laufen im Bild nicht parallel obwohl die Sonne sehr weit entfernt ist und daher parallele Schatten wirft. Foto: NASA

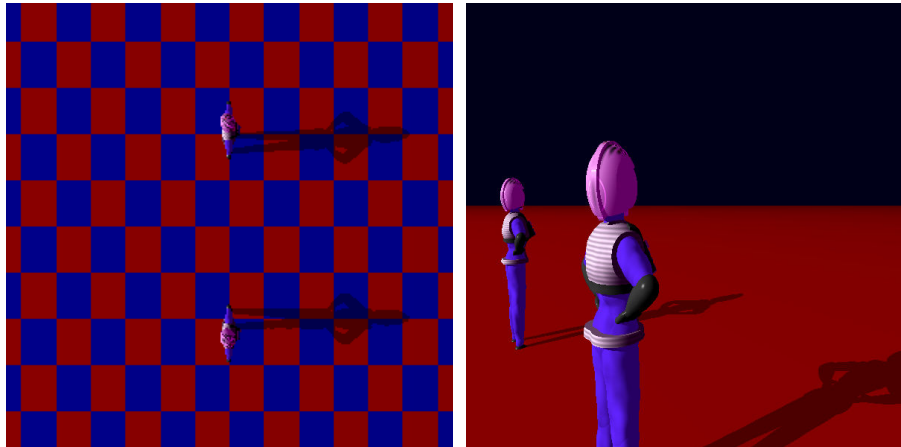
parallele Schatten im dreidimensionalen Raum laufen im zweidimensionalen Bild auf einen Fluchtpunkt zu

Der Hauptfehler dieser Argumentation liegt im Nichtbeachten der Perspektive. Die Schatten laufen im dreidimensionalen Raum in der Tat parallel. Wie sich diese Parallelen aber in einem zweidimensionalen Bild darstellen, hängt von der Perspektive und damit vom Standpunkt des Beobachters ab. Von oben betrachtet (Abbildung 2.6.22 (a)) laufen Schatten z.B. auch im Bild parallel. Von einer anderen Sicht aus (Abbildung 2.6.22 (b)) laufen die Schatten auf einen gemeinsamen Fluchtpunkt zu. Bei der in Abbildung 2.6.21 gezeigten Szene ist zusätzlich zu beachten, dass der Untergrund auf den die Schatten fallen nicht eben ist und somit zusätzliche Verzerrungen der Schatten auftreten.²⁰ Die Mondbilder der Apollo Mission sind also nicht gefälscht (bzw. die Fälschung kann durch die Schatten nicht nachgewiesen werden).

Unabhängig von der Mondlandung sind Schatten ein wichtiges Mittel um die Authentizität von Bildern zur überprüfen. Beim Fälschen eines Bildes sollten Sie also auf korrekte Schatten achten. Neben Manipulationen am Foto kann auf diese Weise auch überprüft werden, ob das Foto zur angegebenen Zeit am angegebenen Ort aufgenommen wurde.²¹

²⁰Man kann entsprechende Verzerrungen von (projizierten) Streifenmustern in der optischen Messtechnik zur Bestimmung der Oberflächenform nutzen. Diese als *Streifenprojektion* bezeichnete Technik wird insbesondere in der industriellen 3D-Formprüfung sehr häufig eingesetzt.

²¹Diese Art der Analyse war z.B. bei der Prüfung ob R. Peary als erster den Nordpol erreichte, von Bedeutung.



(a) Sicht von oben

(b) Sicht von der Seite

Abbildung 2.6.22: Zur Schattenperspektive: Im dreidimensionalen Raum parallele Schatten laufen im Bildraum in der Regel nicht parallel (Perspektive).

2.7 Schatten im Volumen

Ein Schatten ist zunächst kein zweidimensionales Gebilde sondern überstreicht ein dreidimensionales Volumen. Der Schatten ist also eine ausgedehnte räumliche Struktur. Sichtbar wird diese räumliche Licht- bzw. Dunkelheits-Verteilung allerdings nur, sobald ein streuendes Medium innerhalb des Lichtweges steht. In der Regel sehen wir nur den Schnitt einer Ebene mit dem Schattenvolumen (z.B. Schatten an einer Wand).

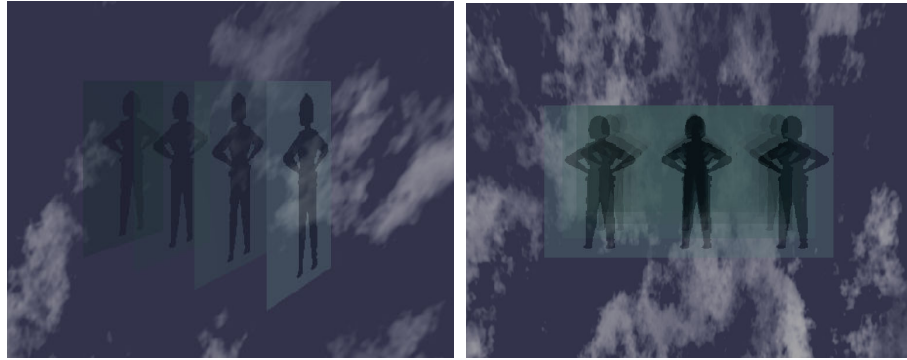
Schatten überstreichen Volumen im dreidimensionalen Raum



Abbildung 2.7.23: Brockengespinst: Lediglich der Schatten des Beobachters/Fotografen ist sichtbar. Schatten anderer Personen verschwinden. Zusätzlich ist eine Glorie (Beugungseffekt) sichtbar. Foto mit freundlicher Genehmigung von Ken Scott, www.touchingthelight.co.uk, Farbtafel: 12.0.2

Besonders eindrucksvoll (siehe Abbildung 2.7.23) zeigt sich die Dreidimensionalität beim sogenannten *Brockengespinst* (*spectre of the Brocken*). Stellen Sie sich

Brockengespinst: Eigener Schatten in Nebelwand. Benachbarte Schatten sind nicht sichtbar



(a) Lage der Teilebenen

(b) Beobachtersicht

Abbildung 2.7.24: Zustandekommen des Brockengespinst: Aufgrund der Perspektive sind weit entfernte Teile des Schattenvolumens verkleinert. Daher überlappen sich die Schattenebenen nur in Richtung des Antisolarpunkts – und damit in Richtung des eigenen Schattens – konstruktiv.

vor eine Nebelwand, die Sonne im Rücken²², und betrachten Sie Ihren Schatten im Nebel. Alternativ können Sie nachts bei starkem Nebel ca. 3 bis 5 m vor Ihr Auto stehen und sich von hinten durch die Auto-Scheinwerfer (bzw. am besten nur durch einen) beleuchten lassen. Sie sehen relativ deutlich Ihren Schatten im Nebel. Den Schatten einer neben Ihnen stehenden Person sehen Sie dagegen merkwürdigerweise nicht.

Abb. 2.7.24 verdeutlicht warum Sie nur Ihren eigenen Schatten sehen. Ihre Blickrichtung schneidet aus dem dreidimensionalen Schattengebiet Ihres Nachbarn nur ein geringes Volumen aus, während das Volumen Ihres eigenen Schattens sehr groß ist (Blickrichtung entspricht der Schattenausdehnung). Aufgrund der perspektivischen Verkleinerung mit zunehmender Entfernung gibt es einen Überlapp der Schattenschichten nur in Richtung des Antisolarpunkts, also in Richtung Ihres Schattens. Abbildung 2.7.24 zeigt am Beispiel von vier diskreten Ebenen im an sich kontinuierlichen Nebelvolumen das Zustandekommen des Effekts. Teilweise sieht man beim Brockengespinst ein zusätzliches farbiges Ringmuster. Dieses hat seinen Ursprung in der Beugung (bzw. Rückwärtsstreuung) des Lichts an den Nebeltropfen (siehe Abschnitt 7.7.33).

Wenn die Sonne teilweise von Wolken oder Bäumen (Wald) bedeckt wird, ergeben sich oft deutlich sichtbare Lichtstrahlen oder Schattenstrahlen (je nachdem, wie Sie es deuten wollen). Voraussetzung hierfür ist wieder Nebel oder ein gewisser Dunst in der Luft, an dem das Licht gestreut werden kann und so sichtbar wird (siehe Abb. 2.7.25). Man spricht von *Dämmerungsstrahlen* (*Crepuscular Rays*) bzw. von *Gegendämmerungsstrahlen* (*Anticrepuscular rays*), wenn die Beobachtung entgegen der Sonne erfolgt (siehe Abb. 2.7.26, 2.7.27).

Die Strahlen selbst laufen auf einen Fluchtpunkt zu. Beim Blick in Richtung Sonne ist die Sonne selbst der Fluchtpunkt. Beim Blick entgegen der Sonne konvergieren die Strahlen im Antisolarpunkt. Letztlich ist dies wieder ein reiner Perspektiveneffekt. Das aufgrund der großen Entfernung zur Sonne parallel einfallende Sonnenlicht macht entsprechend parallele Abschattungen. Bei der

²²Angeblich lässt sich das ziemlich gut im Harz machen, daher auch der Bezug zum Brocken, einem Berg im Harz.

Aufgrund der Perspektive ist nur der eigene Schatten sichtbar

Dämmerungsstrahlen konvergieren auf die Sonne zu

Gegendämmerungsstrahlen konvergieren auf den Antisolarpunkt zu



Abbildung 2.7.25: Dämmerungsstrahlen sind im Raum parallel. Im zweidimensionalen Bild (Foto, Netzhaut) konvergieren sie aber auf den Fluchtpunkt (Sonne). Foto mit freundlicher Genehmigung von Ian Britton, www.freefoto.com

Betrachtung der Parallelen mittels Auge oder Kamera ergibt sich aber der bereits bekannte Effekt des Zulaufens auf den Fluchtpunkt („Bahngleis“).

Am deutlichsten ist der Effekt sichtbar, wenn die Strahlen in oder entgegen der Richtung der Sonne beobachtet werden weil zum einen Vorwärts- und Rückwärtsstreuung relativ stark in diese Richtung sind (siehe Kapitel 4) und zum anderen das Schattenvolumen, durch das die Blickrichtung läuft vergrößert ist. Sehr selten – bei besonders starker Streuung – lässt sich der Effekt auch mit Mondstrahlen beobachten.

Nicht nur Wolken sondern auch *Kondensstreifen* werfen Schatten. Zu beachten ist allerdings, dass diese wegen der geringen Ausdehnung der Kondensstreifen (ca. 100 m) nur einen ca. 20 m breiten Kernschattenbereich am Boden (bei einer Höhe von 8000 m) ergeben. Typische Windgeschwindigkeiten sorgen dafür, dass man am Boden stehend nur sehr kurze Zeit (Sekunden) im Kernschattenbereich steht.

Von außerhalb des Schattens ist der Schatten praktisch nicht sichtbar, da die geringe Streuung der Luftmoleküle über die kurze Länge (20 m) einen zu geringen Kontrast gegenüber den benachbarten (schattenfreien) Bereichen ergibt. Wenn man allerdings im Schatten steht *und* in Richtung des Schattens selbst schaut, dann ist die Schattenausdehnung groß (evtl. mehrere Kilometer) und damit ist dann der Schatten sichtbar. Der Schatten eines Kondensstreifens kann aber auch auf einer tiefer liegenden Wolke oder der Erdoberfläche sichtbar werden (siehe Abbildung 2.7.28).

Schatten von Kondensstreifen sind nur sehr kurz als Verdunklung sichtbar.



Abbildung 2.7.26: Gegendämmerungsstrahlen sind im Raum gleichbedeutend mit den Dämmerungsstrahlen. Auch sie konvergieren im Bild auf einen Fluchtpunkt, den Antisolarpunkt. Foto mit freundlicher Genehmigung von John Britton



Abbildung 2.7.27: Gegendämmerungsstrahlen, Foto mit freundlicher Genehmigung von John Britton

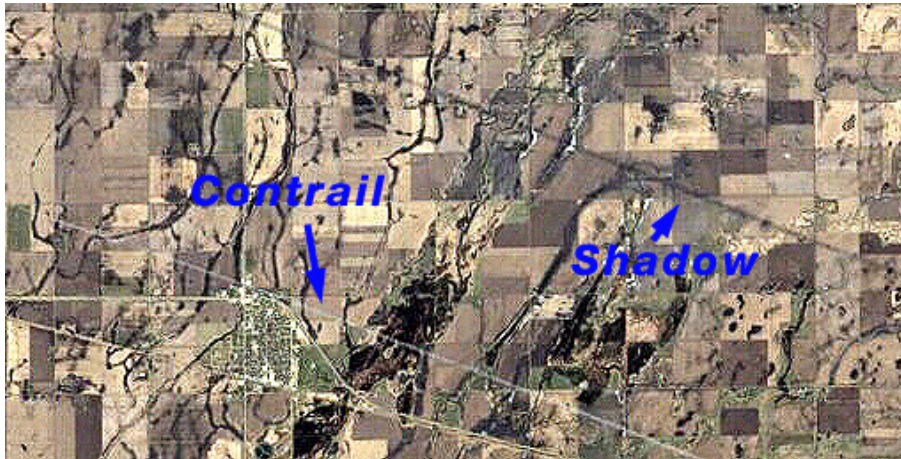


Abbildung 2.7.28: Schatten eines Kondensstreifens, aufgenommen durch Landsat 7, Quelle: NASA

2.8 Weiteres zum Thema Schatten und Perspektive

In diesem Abschnitt sollen in loser Zusammenstellung einige weitere Schattenphänomene dargestellt werden die thematisch schwer gruppierbar sind. Wir werden mit einem sehr subtilen Effekt, dem sogenannten Oppositionseffekt, starten. Dann sollen die Schatten an Zäunen und auf Wasser besprochen werden und schließlich folgt eine schattenbasierte Methode zur Höhenbestimmung und die Erklärung des sehr eindrucksvollen Searchlight Effekts.



Abbildung 2.8.29: Oppositionseffekt: In Richtung des Antisolarpunktes, also um den Kopf des Beobachterschattens bzw. die Kamera, ergibt sich eine Aufhellung. Foto mit freundlicher Genehmigung von Eva Seidenfaden, <http://www.paraselene.de>

Schatten zeigen teilweise ein subtileres Verhalten: Wenn Sie über eine gleichmäßige Fläche (am besten Vegetation, z.B. Prärie, Wald) fliegen und die Sonne genau entgegen Ihrer Blickrichtung liegt, sollten Sie die Gelegenheit nutzen und den Erdboden in Richtung ihres eigenen Schattens betrachten (siehe Abb.

2.8.29). Mit etwas Glück sehen Sie am Boden einen mit Ihnen wandernden hellen Fleck.

Oppositionseffekt: leichte Aufhellung am Boden in Richtung des eigenen Schattens

Der Grund für diesen sogenannten *Oppositionseffekt* liegt in einer grundsätzlichen Eigenschaft von Schatten: Wenn Sie aus derselben Richtung ein Objekt betrachten, aus der dieses Objekt beleuchtet wird, dann können Sie prinzipbedingt keinen Schatten sehen (siehe Abbildung 2.8.30 (a))²³.

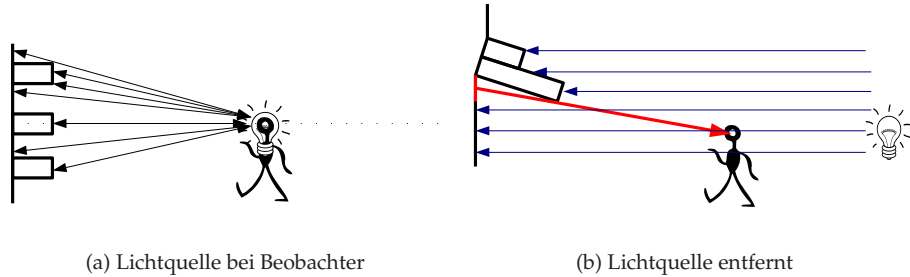


Abbildung 2.8.30: Oppositionseffekt: Der Grund für die Aufhellung in Richtung des Antisolarpunktes ist in der fehlenden Abschattung in dieser Richtung zu sehen.

Wenn die Lichtquelle sehr weit von Beobachter und Objekt entfernt ist (z.B. Sonne), dann erfolgt eine Beleuchtung mit parallelem Licht. In diesem Fall ergeben sich in der Regel Winkeldifferenzen für die Beleuchtungsrichtung eines Oberflächenpunktes und die Verbindung dieses Punktes mit der Beobachterposition. Viele interessante Effekte beobachten Sie in der Fortsetzung der Verbindung Ihres Kopfes mit der Lichtquelle (in der Regel Sonne), also in der Richtung in die Ihr eigener Schatten fällt (vgl. Abb. 2.8.31). Der Punkt im Unendlichen, der diese Richtung bezeichnet hat daher eine besondere Bezeichnung verdient und wird üblicherweise *Antisolarpunkt* genannt.

der Antisolarpunkt gibt die Verbindungsrichtung von der Sonne zum Beobachter an

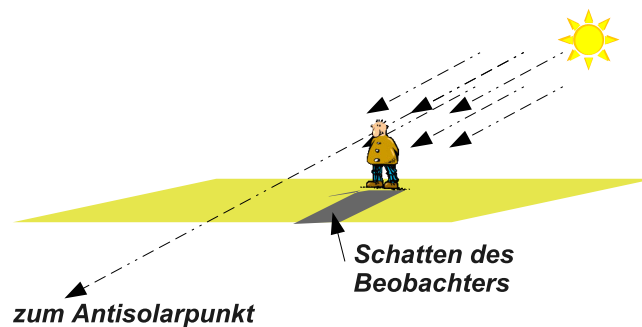


Abbildung 2.8.31: Zur Definition des Antisolarpunktes: Der Antisolarpunkt liegt in Verlängerung der Verbindungslinie Beobachter–Sonne im Unendlichen.

Nur für einen kleinen Teil des Objektfeldes in Richtung des Antisolarpunktes (wenn die Sonne im Rücken des Beobachters steht, dann ist dieser Teil gerade das Zentrum) werden keine Schatten gesehen. In einer leicht anderen Richtung ergeben sich aber aus Ihrer Sicht Schatten, so dass von diesen Bereichen der Oberfläche (die Sie ja betrachten) insgesamt weniger Licht ausgeht. In Abbildung 2.8.30 (b) ist dies veranschaulicht. Der rot gezeichnete Strahl kommt von einem Bereich (rot dargestellt), der aufgrund der Abschattung nicht direkt beleuchtet wird.

²³Sie können das experimentell einfach mittels einer Stirnlampe überprüfen.

Der Effekt ergibt sich übrigens auch beim Mond (und Mars): Der Mond ist bei der Opposition deutlich heller als sonst. Bei tiefstehender Sonne, wenn die Schatten lang sind, ist der Oppositionseffekt am besten beobachtbar, weil dann die Abschattungswirkung natürlich am extremsten ist („lange Schatten“).

Die reine Abschattung ist hier ein wichtiger Effekt. Aber auch die nicht abgeschatteten Bereiche ändern ihre Helligkeit. Die Bereiche, die aus derselben Richtung bestrahlt werden, aus der beobachtet wird, wirken deutlich heller als Bereiche, für die es eine Winkeldifferenz gibt (Abbildung 2.8.32). Der Grund für dieses *Kosinus-Gesetz* liegt einfach in der Zunahme der Fläche mit $1/\cos$ und damit einer verringerten ankommenden Leistungsdichte mit dem Kosinus. Dies führt zu einer verringerten Leuchtdichte der abstrahlenden Fläche. Sehr ähnliche Aufhellungen aufgrund der Oppositionsstellung können auch auftreten, ohne dass Abschattung im Spiel ist (siehe z.B. Abschnitt 5.8).

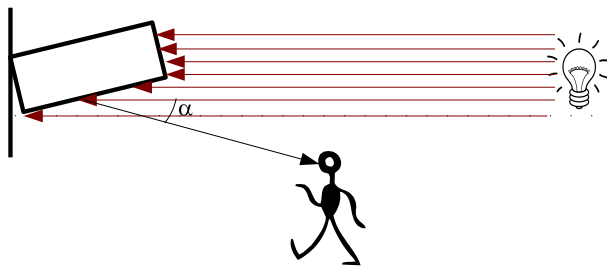


Abbildung 2.8.32: Auch ohne eine Abschattung nimmt die Leuchtdichte und damit die wahrgenommene Helligkeit einer bestrahlten Fläche ab, wenn Beleuchtungsrichtung und Beobachtungsrichtung nicht übereinstimmen.

Ein zunächst erstaunlich erscheinendes Phänomen können Sie bei tiefstehender Sonne an Zäunen beobachten: Die (Halb-)Schatten aufgrund von horizontalen Strukturen sind klar sichtbar während die Schatten aufgrund der vertikalen Strukturen beinahe unsichtbar sind (siehe Abbildung 2.8.33 (a)). Der Grund hierfür liegt einfach in der Projektion des Schattens auf die stark geneigte Bodenebene. Hierdurch wird der Schatten „in die Länge gezogen“. Eine waagrechte Strebe ergibt daher auf dem Boden eine große Schattenfläche. Die vertikale Strebe wird zwar genauso in die Länge gezogen, dementsprechend ist auch hier die Schattenfläche stark vergrößert — lokal in dem von Beobachter betrachteten Bereich ist die Schattenfläche aber deutlich geringer als für die lokale Strebe und daher kaum sichtbar.

Schatten können auf einfache Weise auch zur *Höhenmessung* verwendet werden. Wenn wir eine bekannte Höhe, z.B. unsere Körpergröße, zur Verfügung haben, können wir durch Messung der Schatten dieser bekannten Höhe und der gesuchten Höhe einfach auf die gesuchte Höhe zurück schließen (Abb. 2.8.34). Wenn unser Körperschatten beispielsweise gleich lang wie unsere Größe ist, dann ist ein Objekt, das einen 16 m langen Schatten wirft, logischerweise 16 m hoch. Der Grund hierfür liegt wieder in der parallelen Beleuchtung durch die weit entfernte Sonne.

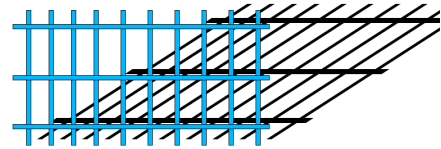
Angeblich hat auf diese Weise Thales die Pyramiden in Ägypten vermessen. Das Problem bei dieser Methode ist nur, dass man die Grundlinie, ab der die Schattenlänge gemessen wird, kennen muss. Diese Grundlinie (das Lot der Pyramidenspitze) liegt aber im Innern der Pyramide und ist daher nicht zugänglich. Man muss daher aufgrund von Messungen und Symmetrien an der Pyramide (z.B. Winkelmessungen) auf die Grundlinie zurückrechnen. Aus diesen Messungen kann man aber auch gleich auf die Höhe der Pyramide

Schatten bei Zäunen

Durch Vermessung des Schattens lassen sich Höhen bestimmen.



(a) Sichtbar sind praktisch nur die Schatten der Horizontalstreben



(b) Grund hierfür ist die perspektivische Verlängerung der Schatten in vertikaler Richtung bei tiefstehender Sonne

Abbildung 2.8.33: Schatten hinter einem Zaun bei tiefstehender Sonne. Lediglich die horizontalen Zaunstrukturen sind klar sichtbar. Aufgrund der Projektion des Schattens auf den Boden ist die „Schattendichte“ für senkrechte Strukturen deutlich anders als für waagrechte Strukturen.

schließen, ohne erst Schatten vermessen zu müssen. Die Schattenmethode ist daher nur dann elegant und sinnvoll, wenn die Grundlinie des Schattens zugänglich ist, wie dies beispielsweise bei sehr schlanken Türmen der Fall ist.

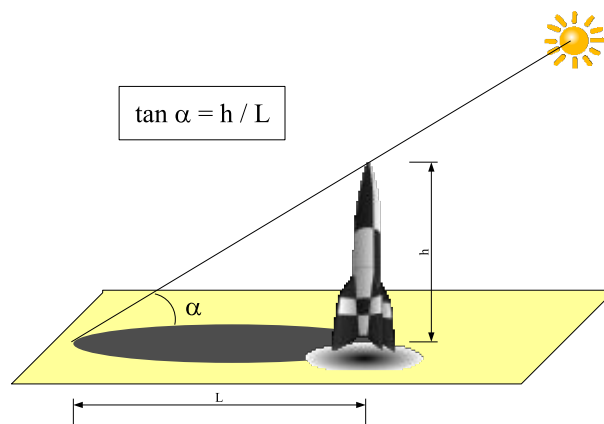


Abbildung 2.8.34: Bestimmung der Höhe eines Objekts

Auf spiegelnden Flächen sind keine Schatten zu sehen.

Betrachten Sie bei Sonnenschein die ruhige Wasseroberfläche eines klaren Sees. Sie werden keine Schatten (z.B. aufgrund eines Baums am Ufer) sehen. Erst wenn das Wasser unruhig wird, ist ein Schatten sichtbar. (Der Effekt lässt sich natürlich auch mit Kunstlicht (z.B. Kanalbeleuchtung) beobachten.)

Die Erklärung für dieses Verhalten ist einfach: Der See wirkt wie ein Spiegel. Dementsprechend wird das Licht der Sonne sowieso (ob abgeschattet oder nicht) Ihr Auge nicht erreichen. Kleine Wellen führen dazu, dass die Spiegeloberfläche teilweise zu Ihnen geneigt ist und Sie so über Teile dieses „Spiegels“ die Sonne sehen können. Erst dann macht eine Abschattung Sinn.

Wenn das Gewässer nicht klar ist, dann kommt allerdings zusätzlich eine Komplikation hinzu. In diesem Fall sehen Sie einen Abschattungsbereich (auch bei stillem Wasser), weil Sie mit Ihrem Auge das im Volumen (unterhalb der

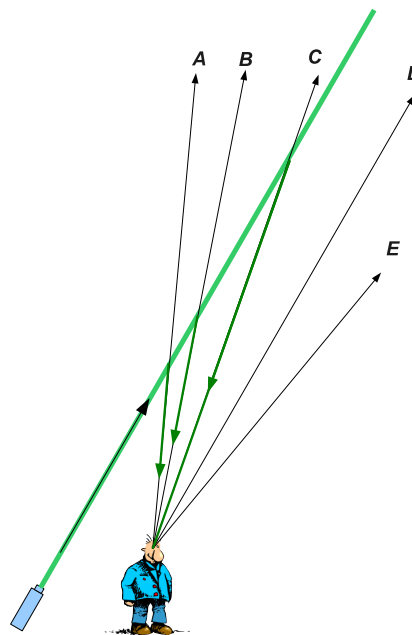
Wasseroberfläche) gestreute Licht der Sonne wahrnehmen. Das Spiegelmodell ist hier also nicht mehr zulässig.

Schatten können sich aufgrund der Art ihrer Entstehung mit großer Geschwindigkeit bewegen. Wenn Sie einen Schatten in den Nachthimmel, z.B. in Richtung Sirius, werfen, so wird dort der Schatten zum einen sehr groß sein und sich zum anderen sehr schnell bewegen. Dabei wird die Lichtgeschwindigkeit für die Schattenbewegung deutlich überschritten. Dies steht nicht im Gegensatz zur Relativitätstheorie, nach der sich „nichts“ schneller als das Licht bewegen darf. Diese Einschränkung gilt nur für materielle Körper und Information. Mit dem Schatten lässt sich aber auf diese Art keine Information bewegen und materiell ist er natürlich auch nicht.

Schatten können (und dürfen) sich schneller als Licht bewegen



(a) Luxor „sky beam“ in Las Vegas



(b) Skizze zur Erklärung des Searchlight Effekts

Abbildung 2.8.35: Searchlight Effekt: Ein in den Himmel gerichteter Lichtstrahl (bzw. ein Bereich parallelen Lichts) scheint plötzlich aufzuhören und erscheint uns abgeschnitten. Es handelt sich um einen rein geometrischen Effekt. Nur aus den Richtungen A,B und C kann Licht den Beobachter erreichen.

Wenn ein starker Scheinwerfer²⁴ oder Laser Richtung Himmel gerichtet wird, sehen Sie ein zunächst merkwürdig erscheinendes Phänomen: Der „Lichtstrahl“ scheint abrupt aufzuhören. Das Licht scheint also, bis zu einem Punkt zu laufen und sich dann plötzlich zu verlieren (siehe Abb. 2.8.35). Der Effekt wird (auch im Deutschen) meist *Searchlight-Effect* genannt. Dieses plötzliche Ende des Lichtstrahls widerspricht zunächst unserer Erfahrung und in der Tat erwartet man nach dem Lambert-Beerschen Gesetz, dass sich die Intensität des Lichts langsam kontinuierlich (gemäß einem negativ-exponentiellen Abfall) verringert. Das Licht muss ja weiterlaufen und kann nicht plötzlich stoppen.

Das Licht eines in Richtung Himmel gestrahlten Scheinwerfers stoppt scheinbar an einer Stelle

Abb. 2.8.35 (b) zeigt, warum die optischen Grundgesetze nicht gestört sind.

²⁴Technisch besteht der in Abb. 2.8.35 dargestellte „sky beam“ aus 39 Xenonlampen mit jeweils 7000 W elektrischer Leistung.

Ein Beobachter wird in den Richtungen A,B und C das an der Luft gestreute Licht des Strahls sehen. In Richtung D wird er aber kein Licht bemerken, denn diese Richtung läuft parallel zum eigentlichen Strahl (ohne auf ihm zu liegen). Höhere Winkel (Richtung E) ergeben natürlich auch kein Licht, denn hier schneidet sich der Sichtstrahl des Beobachters genauso wenig mit dem Beleuchtungsstrahl.

2.9 Moire

Ein spezielle Form der Abschattung ergibt sich, wenn sich zwei Abschattungen mit regelmäßiger, periodischer Struktur überlagern. Bei der Überlagerung feiner Gitterstrukturen ergeben sich oft ausgeprägte Muster, die als Schwebung der Grundstrukturen angesehen werden können. Diese Muster sind uns sowohl bei technischen Systemen (Fernsehen, Digitalkamera) als auch bei der Betrachtung unserer Umgebung mit bloßem Auge wohlvertraut. Man spricht von *Moire*. Abb. 2.9.36 zeigt einige typische Beispiele und Abb. 2.9.37 verdeutlicht das grundsätzliche Zustandekommen eines Moires.

Bei Beleuchtung mit konstanter Intensität $I_1(x, y) = 1$ ergibt sich hinter dem ersten Gitter $G_1(x, y)$ das Lichtfeld

$$I_2(x, y) = I_1(x, y) G_1(x, y) \quad (2.7)$$

$$= G_1(x, y) \quad (2.8)$$

Nach dem zweiten Gitter $G_2(x, y)$ ergibt sich dann

$$I_3(x, y) = I_2(x, y) G_2(x, y) \quad (2.9)$$

$$= G_1(x, y) G_2(x, y), \quad (2.10)$$

d.h. eine multiplikative Überlagerung der beiden Gitter²⁵. Abb. 2.9.38 verdeutlicht eine multiplikative Überlagerung zweier Sinusgitter mit leicht unterschiedlicher Frequenz. Es zeigt sich deutlich eine niederfrequente Schwebung. Die Frequenz dieser Schwebung ist gerade die Differenz der Grundschwingungen.²⁶

Bei vielen optischen Moire-Phänomenen ist die hochfrequente Grundschwingung nicht sichtbar bzw. fällt kaum auf im Vergleich zur niederfrequenten Schwebungsfrequenz.

Abb. 2.9.37 zeigt ein typisches Moire, das oft beobachtet wird. Die beiden Grundschwingungen, festgelegt durch die Abstände der Geländerstreben, sind identisch. Trotzdem ergibt sich ein Moire. Bei identischen Frequenzen der Grundschwingungen sollte keine Schwebung auftreten, da die Differenzfrequenz Null ergibt. Die Schwebung ist im Bild aber klar sichtbar. Die Ursache für die Frequenzdifferenz liegt in der perspektivischen Abbildung durch die Kamera bzw. unser Auge. Wie in Abschnitt 2.5 besprochen, werden weiter entfernte Objekte verkleinert dargestellt („Bahngleiseffekt“). Damit wird das weiter entfernte Geländer verkleinert, d.h. mit verringerter Frequenz dargestellt, somit sind die Voraussetzungen für ein Moire gegeben.

²⁵Neben multiplikativen Überlagerungen führen auch additive Überlagerungen zu Moires.

²⁶Dies lässt sich für den Fall von Sinusschwingungen einfach durch die trigonometrischen Additionstheoreme beweisen.

Multiplikation zweier (ähnlicher) Gitter führt zu Moires

Zwei Gitter mit gleicher Periode in unterschiedlicher Entfernung zum Beobachter ergeben Moiremuster



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 2.9.36: Moires an Gittern

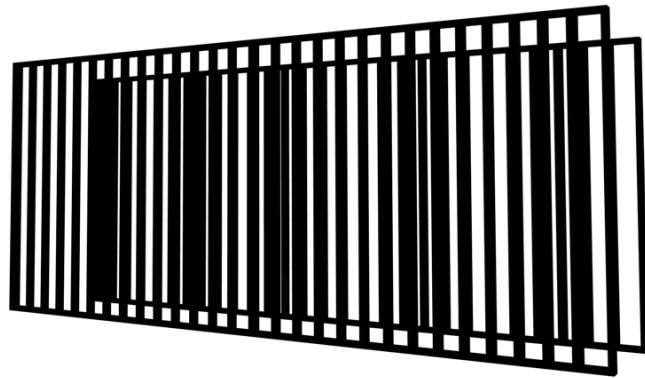


Abbildung 2.9.37: Grundprinzip eines Moires

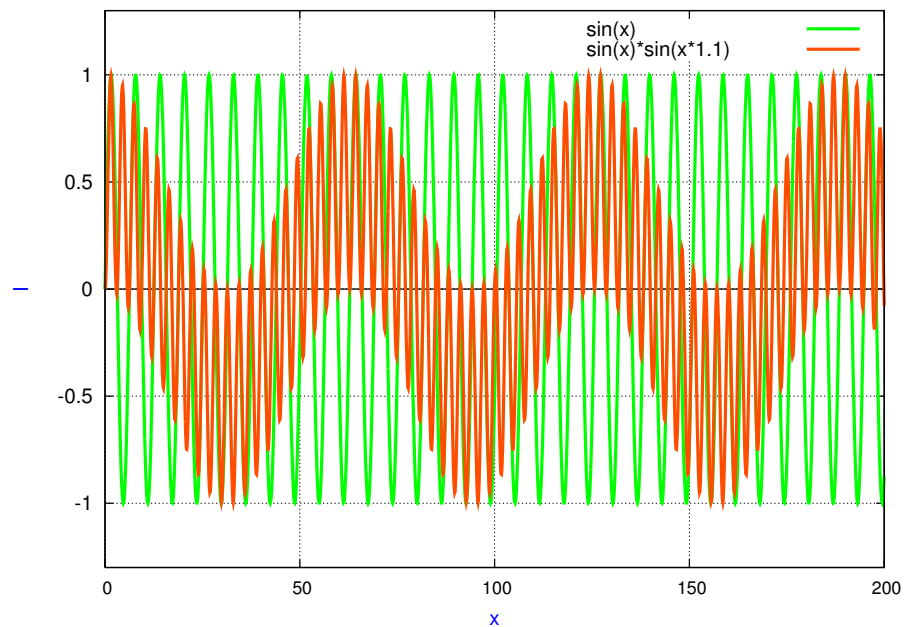


Abbildung 2.9.38: Moiré Plot: Eine multiplikative (oder additive) Überlagerung von zwei periodischen Signalen leicht unterschiedlicher Frequenz führt zu Schwebungen, also periodischen Signalen mit reduzierter Frequenz.

Der Kontrast für das Moire ist dann besonders gut, wenn die Gitter ein Tastverhältnis von 50:50 haben, d.h. gleichviel Licht blocken und durchlassen.

Übliche Digitalkameras verwenden einen einzelnen Bildsensor. Dieser Bildsensor hat zunächst für jeden Bildpunkt (Pixel) dieselbe spektrale Empfindlichkeit. Um dennoch zu einem Farbbild zu kommen, wird direkt vor die Pixel ein Mosaik von roten, grünen und blauen Farbfiltern gesetzt. Egal ob mit oder ohne Farbfilter, die Pixelierung kann zu einem Moireeffekt führen, sobald fein strukturierte, hochfrequente Muster (=Gitter) fotografiert werden. Das abgebildete Objekt und das Pixelraster des Bildsensors ergeben wieder eine multiplikative Überlagerung.

Durch den Einsatz von Mikrolinsen vor den Pixeln wird erreicht, dass nur sehr wenig lichtunempfindliche Bereiche des Pixels vorhanden sind. Damit wird der Kontrast des Moires deutlich vermindert²⁷.

die Farbmaske des Digitalfotos kann zu farbigen Moires führen



Abbildung 2.9.39: Moire (rechts im Bild) und Deflektometrie (vgl. Abschnitt 6)

Besonders unangenehm können die sich ergebenden Moires bei Farbsensoren werden. Hier kann es passieren, dass z.B. bei einem Schwarz-Weiß Objekt in einem ungünstigen Bereich z.B. keine blauen Pixel beleuchtet werden. Die Folge ist ein gelbes (additive Farbmischung von Rot und Grün, vgl. Kapitel 3) Muster in diesem Bereich. Es treten also teilweise massive Farbfehler auf, die den menschlichen Betrachter stark stören (siehe Abb. 2.9.40).

Diese Problematik wird durch den Einsatz eines Tiefpassfilters noch vor der Farbmaske²⁸ vermindert. Idealerweise sorgt der Tiefpass dafür, dass jeder Pixel auch die Information von vier benachbarten Pixeln sieht. Dadurch werden entsprechende Farbfehler vermieden. Andererseits kostet dieser Tiefpass, der ja eine Art Verschmierung der Bildinformation darstellt, Auflösung. Ein Kamerahersteller kann so durch Wahl der Tiefpassparameter seine Kamera zugunsten der Moireunterdrückung in der maximalen Auflösung beschränken oder aber

Ein Tiefpassfilter vor der Farbmaske eliminiert das Farbmoire, verringert aber die maximale Auflösung.

²⁷ und natürlich wird die Empfindlichkeit des Sensors erhöht

²⁸ Zum Einsatz kommen oft doppelbrechende Kristalle, die mittels ordentlichem und außerordentlichem Strahl aus einem Strahl vier Strahlen machen.



Abbildung 2.9.40: Moire bei der Digitalkamera, Foto mit freundlicher Genehmigung von Marc McClelland

eine sehr gute Auflösung erzielen und dabei das Risiko – je nach Motiv – von Moires eingehen.

Ganz entsprechend ergibt sich auch für Scanner das Problem der Moires. Auch hier wird das Bild periodisch abgetastet. Unabhängig vom Motiv verstärkt sich die Problematik, da die Vorlagen selbst (z.B. Zeitungsausschnitte) oft ebenfalls aufgrund des Druckvorgangs stark gerastert sind. Eine ungünstige Wahl der Rasterfrequenz beim Scan führt so zu starken Moires.

Außer bei der Aufnahme können Moires auch rein bei der Wiedergabe einer berechneten Grafik auftreten. Wenn die Grafikausgabe wie beim Computerschirm gerastert, also pixeliert, erfolgt, dann können bei der Darstellung feiner Strukturen natürlich wieder Moires vorhanden sein.

Neben den besprochenen „räumlichen“ Moires gibt es Moirephänomene auch für andere Variablen. Insbesondere das zeitliche Moire, das sich z.B. bei der Stroboskopbeleuchtung eines periodischen Vorgangs ergibt ist vergleichsweise bekannt.²⁹ Moires werden in der Regel als störende Verfälschung eines Bildes wahrgenommen.

²⁹z.B. Räder eines Autos, die im Film scheinbar sehr langsam rückwärts laufen

Kapitel 3

Farbe



*"Colors are the smiles of nature."
(Leigh Hunt)*

Sie sitzen an einem warmen Julitag auf einer Wiese und beobachten ihre Umgebung. Viele unterschiedliche Farben dominieren die Szene. Der Himmel ist blau¹, das Gras erscheint in einem satten Grün, rote Blumen, braune Erde und eine Vielzahl weiterer Farben. Letztlich sind für diesen Farbeindruck die Photonen, die ihr Auge treffen entscheidend. Bis ein Photon dort einen Sinneseindruck hervorrufen kann, hat es in der Regel einen langen und beschwerlichen Weg zurückgelegt und dabei viele Hindernisse überwunden (Abb. 3.0.1).

Die Reise beginnt mit der Entstehung des Photons in der Atmosphäre der

¹übrigens ist Blau sowohl bei Männern als auch Frauen die beliebteste Farbe

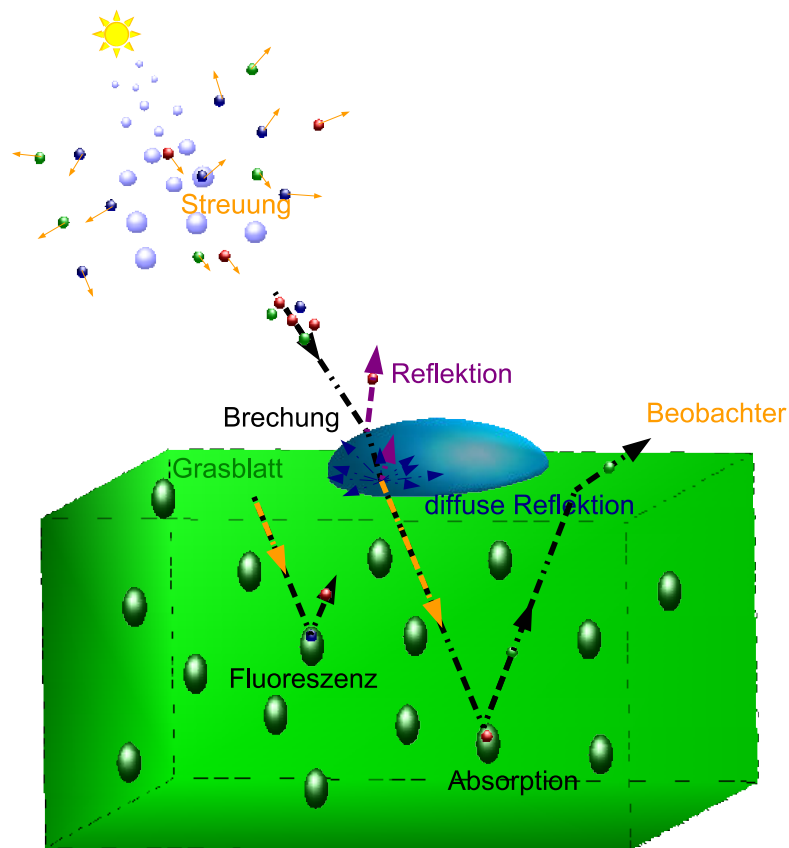


Abbildung 3.0.1: Die lange Reise eines Photons, hier dargestellt von der Erdatmosphäre bis in Richtung des Auges eines Beobachters

Sonne (siehe Kapitel 9). Von dort bewegt sich das Lichtteilchen – zusammen mit vielen anderen Photonen – mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 300.000 km/s in Richtung der Erde und passiert dort die Erdatmosphäre. In der Erdatmosphäre läuft es auf einer gekrümmten Bahn (siehe Kapitel 5), trifft Luftmoleküle und wird unter Umständen durch diese deutlich abgelenkt, d.h. es ändert seine Richtung (siehe Kapitel 4).

*Brechung an Erdatmosphäre
Streuung in Erdatmosphäre*

Unser spezielles Photon lässt sich nicht beirren und setzt seine Reise bis zum Erdboden fort, wo es auf einen Grashalm fällt. Bis der eigentliche Grashalm erreicht wird muss allerdings erst noch ein Tautropfen passiert werden. Einige der Photonen werden beim Übergang von Luft ins Wasser reflektiert. Unser Photon schafft den Übergang, ändert aber dabei leicht seine Richtung, ein Vorgang, der Brechung genannt wird (siehe Kapitel 5).

*Brechung und Reflexion an
Wasserschicht*

Durch das Wasser kommt das Photon unbeschadet. Nur sehr wenige Photonen erleiden das Schicksal, im dünnen Wasserfilm absorbiert zu werden. Dabei wird ihre Energie in Wärme, also Bewegung der Wassermoleküle, umgesetzt. Auch an der nächsten Grenzschicht vom Wasser in den Grashalm werden wieder einige Photonen reflektiert. Zusätzlich findet hier eine etwas merkwürdige Form der Reflexion, die sogenannte „diffuse Reflexion“ statt. Photonen, die dieses Schicksal erleiden werden nicht gemäß „Einfallswinkel=Ausfallswinkel“ (siehe Kapitel 6), sondern in andere Richtungen reflektiert. Die Rauigkeit der Oberfläche ist hierbei von besonderer Bedeutung, es handelt sich um einen Streuvorgang.

diffuse Reflexion

Genau wie an der Luft-Wasser-Grenzfläche haben wir auch hier eine Brechung.

*Brechung und Reflexion beim
Übergang in den Grashalm*

Und auch innerhalb des Grashalmes findet Absorption statt. Insbesondere der Farbstoff „Chlorophyll“ ist hierbei von großer Bedeutung. Je nachdem welche Energie (und damit „Farbe“) unser Photon hat, wird es beim Auftreffen auf das Chlorophyll eher absorbiert oder eher gestreut. Unser grünes Photon wird gestreut (ganz im Gegensatz zu roten, blauen und gelben Photonen), so dass es eine Richtung erhält, die es schließlich (nach weiteren zwei Brechungen) auf die Pupille unseres Auges auftreffen lässt. Zwischenzeitlich könnte es noch über einen Vorgang namens „Fluoreszenz“ seine Farbe ändern (siehe Abschnitt 9.2.9). Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist allerdings in diesem Fall ebenfalls gering. Auch vom Eintritt in das Auge bis zur Sinneswahrnehmung hat das Photon noch diverse Hindernisse zu bewältigen. Wieder ergeben sich verschiedene Grenzschichten, Absorptionen und Ablenkungen.

Absorption

Alles in allem passiert also eine Menge, bevor wir wirklich einen Punkt des Grashalmes als „Grün“ sehen können, und vieles hängt mehr oder weniger stark von der Wellenlänge bzw. „Farbe“ des Lichts ab. Die für unser Photon möglichen Effekte werden im weiteren Verlauf des Buches detailliert beschrieben. Zunächst soll es in diesem Kapitel darum gehen, die „Farbe“ des Photons und die Wahrnehmung der Farbe näher zu beleuchten.

3.1 Grundlagen der Farbwahrnehmung

Farbe ist für uns Menschen von zentraler Bedeutung. Wir verlassen uns auf unsere Farbwahrnehmung, um Objekte zu finden oder zu unterscheiden. Wir nutzen die Farbe z.B. um reife Früchte von unreifen zu unterscheiden und selbst im Straßenverkehr hilft uns unsere Farbwahrnehmung, wichtige Objekte (Ampel, Blaulicht, Verkehrsschilder) schnell und sicher zu detektieren.

Phänomenologisch können wir Licht durch vier Parameter beschreiben: Intensität, Wellenlänge, Phase und Polarisation. In diesem Kapitel werden wir uns mit der Wellenlänge des Lichts und damit der Farbe befassen. Dabei sind einerseits rein physikalische, wellenlängenselektive Prozesse wie Absorption und Streuung, andererseits aber auch das weite Feld der Farbwahrnehmung von Bedeutung. Die Farbe ist für viele optische Phänomene vom Regenbogen bis zur Fluoreszenz wichtig und macht viele Erscheinungen erst sehenswert.

Wenn wir Licht als eine elektromagnetische Welle betrachten, ist klar, dass die Welle eine gewisse *Wellenlänge* hat. Diese Wellenlänge bestimmt die „Farbe“ des Lichts. Gleichzeitig ist sie ein Maß für die Energie des Lichts. Für ein einzelnes Quant des elektromagnetischen Felds, ein *Photon*, kann die Energie aus der Wellenlänge über das *Plancksche Wirkungsquantum* $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js berechnet werden:

$$E = h \nu \quad (3.1)$$

Dabei sind die *Frequenz* der Welle ν , die *Wellenlänge* λ und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c mittels

$$c = \lambda \nu \quad (3.2)$$

verknüpft.

Wenn nun eine entsprechende Welle auf die Netzhaut (*Retina*) unserer Augen fällt, führt dies zu einer Sinneswahrnehmung, die je nach Wellenlänge des

Die Wellenlänge des Lichts gibt die „Farbe“ an.

Farbe ist eine Sinneswahrnehmung

Licht unterschiedlich ist. Diese unterschiedliche Wahrnehmung nennen wir „Farbe“. Beispielsweise führen elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen im Bereich 600 bis 700 nm zum Farbeindruck „rot“. Wellenlängen von ca. 550 nm werden als „Gelbgrün“ wahrgenommen. *Strenggenommen ist also „Farbe“ eine Sinneswahrnehmung, die als Folge von einfallendem Licht auf die Sinneszellen entsteht.*

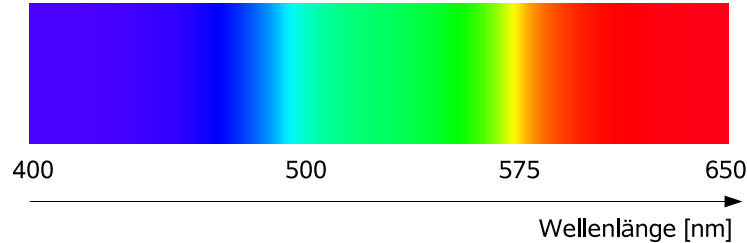


Abbildung 3.1.2: Zuordnung Farbe zu Wellenlänge. Beachte: Der Farbeindruck ist schwierig zu reproduzieren (einerseits wegen der Darstellung auf einem trichromatischen Monitor/Drucker, andererseits wegen der Helligkeitsvariation). Farbtafel: 12.0.3

Dementsprechend ist es eigentlich problematisch z.B. von einem „roten Laser“ zu reden. Stattdessen müsste man korrekterweise sagen, dass das von dem Laser produzierte Licht zu dem Sinneseindruck „rot“ führt. Da dies viel zu umständlich ist, wollen wir uns das im Folgenden sparen. Wir wissen, was mit der Kurzform „der Laser ist rot“ gemeint ist². Wir sagen also, dass z.B. eine Wellenlänge von 620 nm einem roten Farbeindruck entspricht.

Die Geschwindigkeit c des Lichts (*Lichtgeschwindigkeit*) ist in einem Medium um den Faktor

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (3.3)$$

gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c_0 = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ reduziert. n wird als die *Brechzahl* des Materials (bei einer bestimmten Wellenlänge) bezeichnet. Warum dies so ist werden in Kapitel 5 näher begründet.

eigentlich ist die Frequenz für den Farbeindruck entscheidend

Die Wellenlänge nimmt nach den Gleichungen 3.2 und 3.3 entsprechend im Medium ebenfalls ab, da die Energie eines Photons und damit die Frequenz der zugehörigen Welle beim Eintritt in das Medium unverändert bleibt. Dies bedeutet aber nicht, dass ein Taucher dem wir von außerhalb des Wassers ein rotes Signal senden dieses als Blau wahrnimmt. Die Wellenlänge ist zwar im Wasser verkürzt, das Auge (und auch technische Photodetektoren) reagieren aber auf die Frequenz des Lichts. Wenn wir also die „Farbe“ mittels der Wellenlänge spezifizieren, dann gilt dies in Luft bzw. im Vakuum.

Soviel zunächst zur Physik. Wir werden in den Kapiteln 10 und 11 detailliert auf das Auge und die visuelle Wahrnehmung eingehen. Bevor wir aber mit physikalischen Beschreibungen fortfahren können sind einige Grundinformationen über das menschliche Sehsystem notwendig.

Stäbchen: Helligkeitsempfindung, schnelle Bewegung, empfindlich
Zapfen: Farbsehen

Auf der *Netzhaut* unserer Augen finden sich unterschiedliche lichtempfindliche Zellen. Grob unterscheidet man *Zapfen* und *Stäbchen*. Die ca. 120 Millionen Stäbchen (ca. 25 μm lang, Durchmesser ca. 1 bis 2 μm) sind sehr lichtempfindlich und sind vor allem für die Wahrnehmung von Bewegungen im peripheren Sehfeld und das Sehen bei schlechten Lichtverhältnissen verantwortlich. Die etwa 6 Millionen Zapfen (1 bis 10 μm) treten dagegen in drei unterschiedlichen

²Wen das stört, sollte überdenken, ob er in Zukunft „Eiscreme“ durch „gefrorenes Milchprodukt“ ersetzen will.

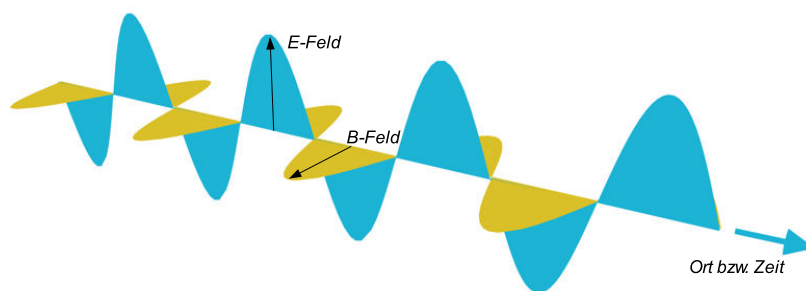


Abbildung 3.1.3: Licht als Welle. Elektrisches und magnetisches Feld sind senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Beide Felder oszillieren sowohl räumlich als auch zeitlich (siehe auch Kapitel 7).

Typen auf. Diese unterschiedlichen Zapfen besitzen verschiedene spektrale Empfindlichkeitskurven (siehe Abbildung 3.1.5). Vereinfacht kann man sagen, dass einige der Zapfen besonders für Rot (Maximum bei 565 nm), einige besonders für Grün (Maximum bei 535 nm) und andere besonders für Blau (Maximum bei 440 nm) empfindlich sind³. Abb. 3.1.4 zeigt den vereinfachten Ablauf der menschlichen Farbwahrnehmung.

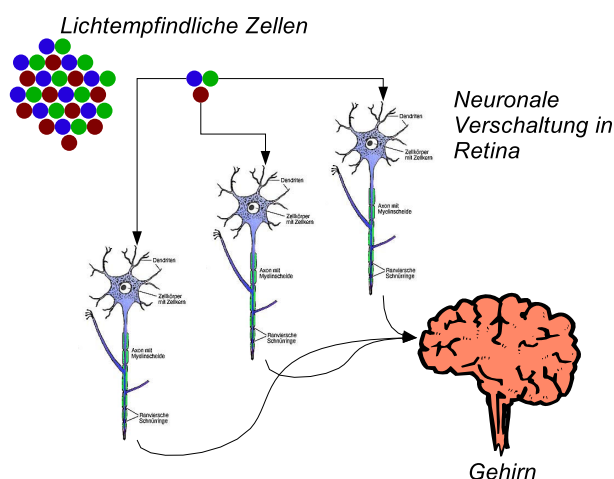


Abbildung 3.1.4: Vereinfachter Ablauf der Farbwahrnehmung: rote, grüne und blaue Farbdetektoren in der Netzhaut geben - nach einiger Vorverarbeitung - ihre Signale an das Gehirn weiter.

Durch die unterschiedlichen Zapfentypen sind wir in der Lage, rotes, grünes und blaues Licht zu unterscheiden. Dies ist natürlich auch der Grund warum farbfähige elektronische Geräte wie Farbfernseher, Digitalkamera oder Scanner meist ebenfalls diese drei Kanäle (RGB) aufweisen.⁴ Da die spektrale Empfindlichkeit der „roten“ und „grünen“ Zapfen so eng beinander liegen, sind wir in der Lage im Wellenlängenbereich zwischen Grün und Rot Farben sehr gut zu unterscheiden. Der Mensch erzielt so im „gelben“ Spektralbereich eine Auf-

Rot, Grün, Blau (RGB) bei technischen Geräten

³Die Bezeichnungen „Rot“, „Grün“ und „Blau“ sind etwas ungenau. Aufgrund des ausgedehnten Charakters der Spektralbereiche der Zapfen wird daher oft von kurzwelligen (S=Short), mittelwelligen (M) und langwelligen (L) Zapfen gesprochen.

⁴Der erste, der diesen Zusammenhang klar beschrieben hat war im übrigen der Arzt Thomas Young, der auch wesentliche Beiträge zur Beugungstheorie geliefert hat (u.a. Youngscher Doppelspalt).

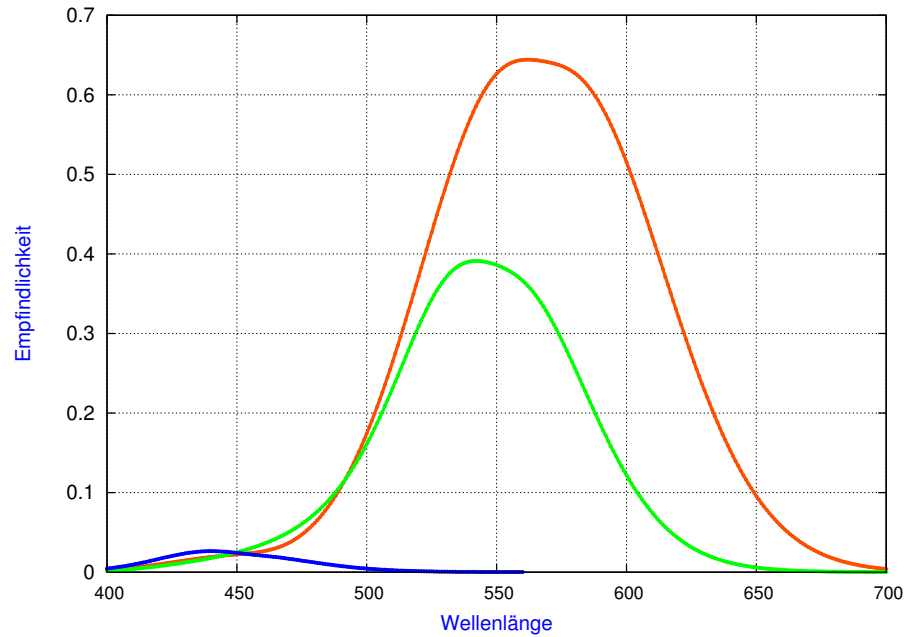


Abbildung 3.1.5: Spektrale Empfindlichkeit der Zapfen. Für kurze Wellenlängen ist die Empfindlichkeit stark reduziert. Die Empfindlichkeit von Zapfen im mittleren and langwelligen Spektralbereich sind sehr ähnlich. Die Daten basieren auf dem Programm PCSF von Hans Jrtel, das die Ergebnisse von Smith und Pokorny verwendet.

lösung von 1 nm, d.h. monochromatische Farben, die lediglich um 1 nm differieren können von uns unterschieden werden⁵.

Man geht heute davon aus, dass die Primaten vor ca. 35 Millionen Jahren von zwei auf drei Farbmultiplexer gewechselt haben. Die zunächst vorhandene Unterscheidung von einem kurzwelligen und einem langwelligen Bereich – wie sie bei den meisten Säugetieren vorherrscht – wurde durch eine Aufspaltung des langwelligen Bereichs in Rot und Grün erweitert. Dass sowohl die rot empfindlichen als auch die grün empfindlichen Zapfen sich aus demselben Zapfentyp entwickelt haben, sieht man auch an der sehr ähnlichen, nur eben leicht verschobenen, spektralen Empfindlichkeitskurve.

Verschiedene Erklärungen für diese Aufspaltung wurden vorgeschlagen. Eine aktuelle Hypothese sieht die Ursache in der besseren Unterscheidung von jungen (schmecken besser und enthalten mehr Eiweiß) und älteren Blättern. Vielleicht reicht aber auch schon die bessere Unterscheidung von z.B. roten Früchten im grünen Blätterdach als ausreichende Erklärung für die Aufspaltung des langwelligen Zapfentyps in zwei spektral leicht verschobene Zapfen.

Trotz aller Vorteile kann die Aufteilung in drei statt zwei Zapfentypen keinen extremen Überlebensvorteil bieten. Ansonsten wäre die *Rotgrünblindheit* nicht so hoch in der Bevölkerung vertreten (5% der männlichen⁶ und 0,5% der weiblichen Bevölkerung) und wäre wohl auch nicht erst im 18. Jahrhundert entdeckt

⁵Entsprechend sollten technische Systeme, die Farbe für den Menschen generieren (z.B. Farbmischanlage für Wandfarben) in diesem Spektralbereich besonders sorgfältig ausgelegt werden.

⁶Bei Männern ist die Rotgrünblindheit wesentlich stärker vertreten, weil die genetische Kodierung der beiden Sehpigmente auf dem X-Chromosom erfolgt. Ein Defekt auf dem X-Chromosom kann beim Mann (hat nur ein X-Chromosom) daher im Gegensatz zur Frau nicht ausgeglichen werden. Da Frauen 2 X-Chromosomen mit teilweise leicht unterschiedlichen Genen für das rote Sehpigment haben, wird von einigen Forschern davon ausgegangen, dass Frauen eine etwas bessere Farbdifferenzierung aufweisen können.

drei Farbkanäle seit 35 Millionen Jahren

Rotgrünblindheit ist für das Überleben kein großer Nachteil

worden. Eine komplette Farbblindheit ist wohl eher ein Nachteil und tritt auch entsprechend selten bei Menschen auf.

Andere Lebewesen haben teilweise gänzlich andere Farbpmpfänger. Viele Insekten (z.B. *Ameisen*, *Bienen*), aber auch die Mehrzahl aller Vögel⁷ sehen beispielsweise bis in den ultravioletten Spektralbereich. Ein schönes Beispiel sind die uns schwarz erscheinenden Raben. Diese sind für andere Vögel ganz und gar nicht „schwarz“ da das Federkleid im ultravioletten Spektralbereich gut reflektiert. *Goldfische* sehen wie wir Rot, Grün und Blau, sind aber auch – wie die Bienen – in der Lage, ultraviolettes Licht zu sehen. Diese Farbpmpfindlichkeiten können sowohl zur Kommunikation⁸ als auch zur Navigation⁹ genutzt werden.

Fast alle *Säugetiere* außer den Primaten haben nur zwei getrennte Farbzeptoren (z.B. auch *Stiere*, die daher nicht zwischen Rot, Grün und Gelb unterscheiden können). *Tiefseefische* sind gänzlich farbenblind während der *Schwalbenschwanz-Schmetterling* fünf und eine spezielle Art von *Schrimps* („Mantis Schrimps“) sogar zwölf bzw. sechzehn unterschiedliche Farbkanäle verarbeitet¹⁰. *Vögel*, *Reptilien* und viele *Fische* nutzen vier unterschiedliche Spektralkanäle¹¹. *Schlangen* (und auch einige Käfer) sind oft (und sehr ausgezeichnet) in der Lage, im infraroten Spektralbereich zu sehen. Damit können z.B. *Klapperschlangen* selbst geringe Temperaturdifferenzen von ca. 0.05 K noch detektieren. Die Boa Constrictor nutzt dabei das langwellige *Infrarot* bei einer Wellenlänge zwischen 8 und 12 μm .¹²

*Säugetiere haben meistens nur zwei Farbkanäle
Vögel, Reptilien und viele Fische haben vier statt drei Farbkanäle*

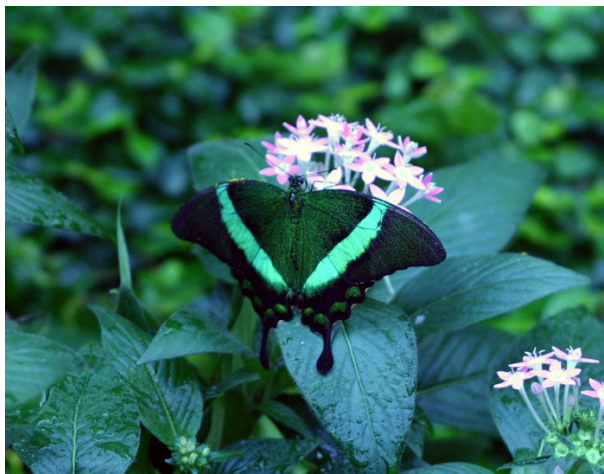


Abbildung 3.1.6: Der Schwalbenschwanz-Schmetterling (hier ein grüngestreifter Schwalbenschwanz) verfügt über fünf Farbkanäle. Im Gegensatz hierzu hat der Mensch lediglich drei (Rot, Grün, Blau) unterschiedliche Farbdetektoren. Farbtafel: 12.0.4

⁷ vgl. Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 96 (2007)

⁸ Z.B. wählen die Weibchen des afrikanischen Augenfalters ihre Partner nach der UV-Reflektivität aus.

⁹ Der Monarch Schmetterling nutzt das UV Licht des Himmels zur Navigation.

¹⁰ bioscience explained 1 S. 1 (2002)

¹¹ Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 96 (2007)

¹² Allerdings werden hierzu nicht die eigentlichen Augen der Schlange, sondern zusätzliche Se-gruben genutzt.

3.2 Absorption und Emission

Unsere Umgebung ist bunt. Der wichtigste Prozess, der zu dieser Farbigkeit führt ist die *Absorption*: Wenn ein auf ein Atom oder Molekül fallendes Photon von diesem absorbiert wird, wird die Energie des absorbierten Photons für die Anregung eines Elektrons verwendet, d.h. das Elektron wird auf ein höheres Energieniveau gehoben¹³ (siehe Abb. 3.2.7). Die so absorbierte Energie des Photons kann entweder wieder in Lichtenergie¹⁴ oder in andere Energieformen (vor allem thermische Wechselwirkung (Gitterschwingung) mit Nachbarmolekülen) umgesetzt werden. Besonders häufig ist dabei eine Umsetzung in mechanische Energie, also in eine Bewegung der Atome bzw. Moleküle. Man nennt diese Art der Energie üblicherweise „Wärme“. Es kann aber auch eine Speicherung in chemische Energie (Photosynthese) erfolgen oder eine Ladungstrennung stattfinden (z.B. in Photodioden).

Lichtabsorption: Elektronen werden auf höhere Energieniveaus gebracht

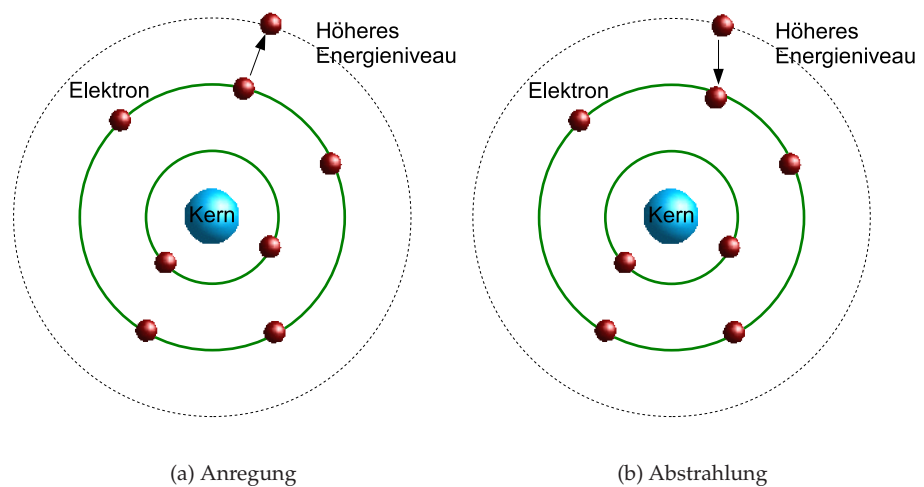


Abbildung 3.2.7: Absorption und Emission: Ein Elektron wird von einem einfallenden Elektron auf ein höheres Energieniveau gehoben. Von diesem kann es in den Grundzustand zurückkehren indem es die gewonnene Energie in Form von Licht oder Wärme wieder abgibt (blau = Atomkern, rot = Elektron).

Ob ein Photon absorbiert wird oder nicht, hängt natürlich zunächst davon ab, ob es auf ein entsprechendes Atom/Molekül trifft. D.h. wenn nur wenige Atome oder Moleküle vorhanden sind, z.B. in einem Gas geringer Dichte, ist die Wahrscheinlichkeit einer Absorption entsprechend gering.

Wellenlängenabhängigkeit der Absorptionswahrscheinlichkeit: kompliziert !

Desweiteren hängt die Absorptionswahrscheinlichkeit stark von der Wellenlänge und damit der Energie der Photonen (siehe Gl. 3.1) und den spezifischen Eigenschaften der Atome und Moleküle ab. Dabei ist auch wichtig, in welcher Umgebung (z.B. in welchem Kristallgitter) die Atome sich befinden. Die Details sind selbst für Gase sehr komplex und sollen uns hier nicht weiter beschäftigen. Für Flüssigkeiten und Festkörper werden die möglichen Energieniveaus durch Bänder beschrieben. Feste Substanzen sind in der Regel polykristallin. Dabei sind die kristallinen Gebiete aber von einer Ausdehnung deutlich größer als die Wellenlänge des Lichts, so dass man sich bei der Beurteilung des Absorptionsverhaltens eines Stoffes auf die Analyse

¹³Dieser Vorgang dauert in der Größenordnung 10^{-15} Sekunden.

¹⁴Ein typisches Beispiel sind transparente Stoffe wie Glas. Hier werden laufend Photonen absorbiert und reemittiert. Letztlich erklärt sich hierdurch die verringerte Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Material.

des kristallinen Zustands zurückziehen kann. Nichtsdestotrotz sind die Details der Absorption sehr kompliziert und in der Regel nur numerisch zu erfassen.

Allgemein kann aber gesagt werden, dass gepaarte Elektronen (und damit auch Elektronen in gefüllten Schalen) relativ schwer zu trennen sind und daher für die Anregung eines entsprechenden Elektrons hochenergetisches Licht (ultraviolett oder noch kurzwelliger) notwendig ist. Beispielsweise hat *Kochsalz* (*NaCl*) in der Ionenbindung nur gepaarte Elektronen und daher keine Absorption im sichtbaren Spektralbereich. Aus demselben Grund ist auch der Diamant mit seinen gepaarten Elektronen farblos.¹⁵ Allgemein gilt, dass Verbindungen der ersten drei Perioden des Periodensystems farblos sind, wenn nur wenige Atome involviert sind.



Abbildung 3.2.8: Der Hope Diamant. Foto mit freundlicher Genehmigung von Diva Eva. Farbtafel: 12.0.5

Geringe Modifikationen einer *Kristallstruktur* können aber zu massiven Farbänderungen führen. So ergibt sich z.B. für den *Diamant* eine starke Blaufärbung (wie beim berühmten Hope-Diamant), wenn einige wenige der Kohlenstoffatome durch Boratome ersetzt werden. Genauso führt bereits eine Ersetzung jedes hundertsten Aluminium-Ions im weißen *Saphir* (Al_2O_3) durch ein *Chrom*-Ion zur tiefroten Farbe des *Rubin*. Auch Fehlstellen führen zusätzliche Energieniveaus ein und eröffnen so die Möglichkeit einer Absorption in zusätzlichen Spektralbereichen. Wenn die Spektralbereiche im Sichtbaren liegen, spricht man von „Farbzentren“.¹⁶

Das *Chrom* beim Rubin zeigt deswegen einen so starken Farbeffekt, weil es sich um ein *Übergangsmetall* handelt. Bei diesen Elementen sind ungepaarte Elektronen in tieferen Schalen vorhanden und bei einigen Verbindungen mit anderen Elementen bleiben die ungepaarten Elektronen bestehen. Diese ungepaarten Elektronen lassen sich vergleichsweise leicht, also auch mit sichtbarem Licht, anregen. Dies führt z.B. zur charakteristischen grünen *Patina* von *Kupfer* wenn der an sich rötliche Kupfer Säuren (Regen !) ausgesetzt wird. In der Tat war die *Freiheitsstatue* in New York zunächst rötlich und hat erst im Laufe der Zeit ihren jetzigen grünlichen Farbton angenommen.¹⁷

Kleine Änderungen der Kristallstruktur machen Farbe

ungepaarte Elektronen (Übergangsmetalle) lassen sich auch durch sichtbares Licht anregen

¹⁵Der Diamant ist praktisch ein einziges gigantisches Molekül. In Verbindung mit den starken kovalenten Bindungen innerhalb dieses „Moleküls“ führt dies zu der ungewöhnlichen Härte des Diamanten.

¹⁶Details zu den Effekten bei der Farbgebung von Edelsteinen sind in Spektrum der Wissenschaft Spezial „Farben“ erläutert.

¹⁷Die Säuren setzen das Kupfer zu verschiedenen Kupferverbindungen um, in denen neben dem

Wasser ist aufgrund der Absorption blau

Wasser (H_2O) hat eine relative breite Absorption im roten Spektralbereich¹⁸. Daher sind Wasser und Eis in Transmission leicht blau¹⁹ (das rote Licht wird absorbiert, siehe Abb. 3.2.9). Teilweise wird auch behauptet, dass die blaue Färbung von Wasser auf *Rayleigh-Streuung* (vgl. Abschnitt 4.1) zurückzuführen sei. Rayleigh-Streuung tritt zwar in der Tat bei Wasser auf, der Effekt ist aber im Vergleich zur Absorption vernachlässigbar.²⁰ Die Absorption ist so stark, dass nach bereits 10 m Rot-, Orange und Gelbtöne praktisch nicht mehr vom Mensch wahrgenommen werden.



Abbildung 3.2.9: Eis und Wasser absorbieren leicht im roten Spektralbereich und sind daher bei genügender Dicke blau, Foto mit freundlicher Genehmigung von Adam Stein. Farbtafel: 12.0.6

manchmal wird die Farbe von Wasser durch Reflexion des Himmels bestimmt ...

... manchmal auch durch zusätzliche Substanzen

Dass Gewässer oft blau erscheinen und zu anderen (Wetter-)Bedingungen ihre Farbe ändern, liegt in der Regel auch daran, dass sich in ihnen der blaue (oder eben auch nicht blaue) Himmel reflektiert. Im übrigen ist Wasser auch nur dann in Transmission blau, wenn es nicht verunreinigt ist. Bei zusätzlichem *Schwefel* (heiße Quellen) ergibt sich eine gelbliche Färbung, bei feiner Suspension von *Sedimenten*, wie sie in *Gletschenseen* zu finden sind, ist das Wasser eher türkis. *Algen* und *Mineralien* führen zu grün-braunen oder rötlichen Farbtönen.²¹

türkis durch die richtige Wassertiefe und Reflexion am Sand

An Stränden ergibt sich ebenfalls oft ein türkis-farbener Eindruck. In diesem Fall kommt die Färbung nicht durch eine andere Zusammensetzung des Wassers zustande, sondern ergibt sich aus der Reflexion nahezu aller Wellenlängen am weißen Sand unterhalb der Wasseroberfläche. Das Wasser hat die richtige Tiefe (sehr flach), so dass zwar die roten Spektralanteile ausgefiltert werden, die grünen (und natürlich die blauen) Anteile aber noch enthalten bleiben. So ergibt sich eine blaugüne Färbung.²²

Kupfer auch Sulfate (SO_4), Chloride (Cl_2), Karbonate (CO_3), Hydroxide (OH) und Wasser zu finden sind.

¹⁸Dieses Spektrum ergibt sich in recht komplizierter Weise aufgrund der Wasserstoffbrücken zwischen den einzelnen Wassermolekülen.

¹⁹z.B. Pope und Fry, Applied Optics 36, S. 8710, 1997.

²⁰Falls die Streuung ausschlaggebend wäre, dann wäre — analog zum Sonnenuntergang — das durch das Eis transmittierte Licht rot.

²¹Phytoplankton kommt sowohl in grünlicher als auch in rötlicher Färbung vor.

²²Auch auf offener See lässt sich eine türkisene Färbung manchmal beobachten. In diesem Fall führen nahe der Oberfläche schwimmende (weiße) Kalkschalen zu demselben Effekt.

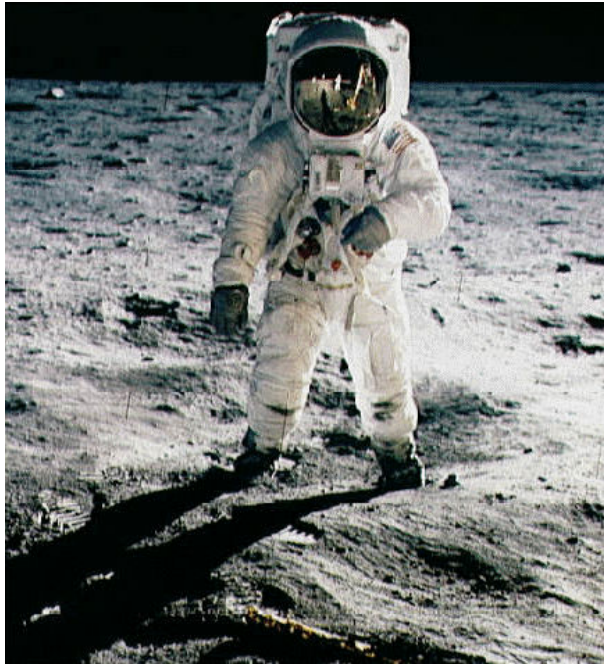


Abbildung 3.2.10: Dünne Metallschichten reflektieren langwelliges (Infrarot-)Licht. Eine entsprechende Schicht auf dem Visier eines Raumhelms reduziert so die thermische Belastung des Raumanzugs. Foto: NASA

Bei *Metallen* zeigt die charakteristische metallische Reflexion bereits, dass die Reflexion wesentlich ist. Die *Eindringtiefe* von Licht ist außerordentlich gering (z.B. 0,6 nm für Kupfer bei $\lambda = 100 \text{ nm}$ und 6 nm für $\lambda = 10 \text{ }\mu\text{m}$). Metalle sind daher nur dann für sichtbares Licht transparent, wenn die Metallschicht extrem dünn ist. Man kennt solche dünnen *Metallbedampfung*en z.B. bei *reflektierenden Sonnenbrillen*. Für diese starke Reflexion ist die hohe *Leitfähigkeit* aufgrund der freien Elektronen in Metallen verantwortlich.²³ Die hohe Leitfähigkeit (je höher die Leitfähigkeit, desto stärker der Glanz eines Metalls, vgl. Silber und Eisen) führt dazu, dass eine einfallende elektromagnetische Welle die Elektronen zum Schwingen anregt. Die schwingenden Elektronen emittieren wieder eine elektromagnetische Welle, die sich mit der einfallenden Welle destruktiv überlagert, so dass letztlich keine Welle transmittiert wird. In Reflexion ist die Sekundärwelle die einzige Welle, so dass in Reflexion keine destruktive Interferenz auftreten kann. D.h. die reflektierte Welle ist stark.

Die Elektronen sind allerdings nur bis zur sogenannten *Plasmafrequenz* in der Lage, der einfallenden Schwingung zu folgen. Daher wird hochfrequentes Licht nicht reflektiert. Da für *Gold* die Plasmafrequenz (im Gegensatz zu *Silber*) noch im sichtbaren Spektralbereich (bei Blau) liegt, reflektiert Gold blaues Licht nur gering und schimmert daher gelb-rötlich. In Transmission ist ein dünner Goldfilm (z.B. Blattgold) daher blau. Dieses Verhalten von Metallschirmen, nämlich die Abschirmung ab einer bestimmten Frequenz, ist günstig zur Abschirmung von Infrarotstrahlung. So wird bei *Raumanzügen* eine wechselnde Belastung des Kühlsystems (wechselnde Orientierung zur Sonne) vermieden, ohne dass die Sicht im sichtbaren Spektralbereich behindert wird.

Bei Farben bedeutet eine starke Absorption eines Spektralbereichs immer auch eine vergleichsweise starke Reflexion im selben Spektralbereich. Natürlich soll

²³Letztlich bestimmt die mittlere Stoßrate der Elektronen wie ausgeprägt die Leitfähigkeit und damit die optische Reflektivität und die Wärmeleitfähigkeit von Metallen ist („Drude Modell“).

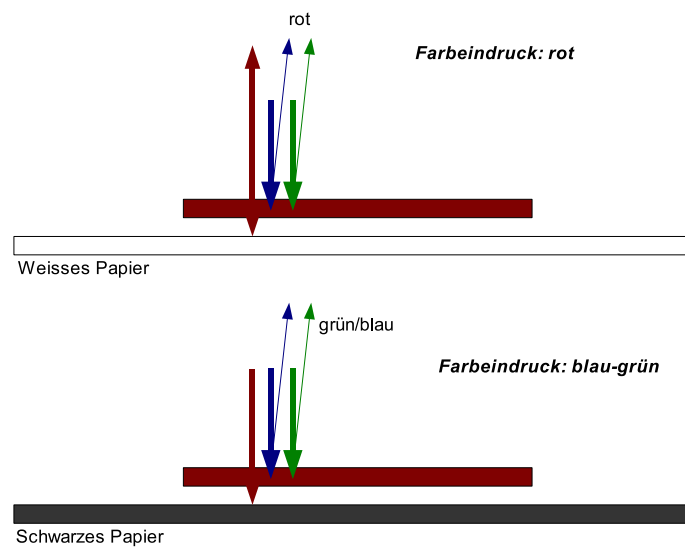
Licht dringt in Metalle praktisch nicht ein und wird daher reflektiert

freie Elektronen in Metallen führen zu hohen Reflexionsgraden

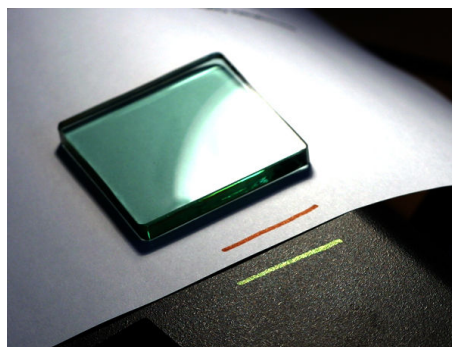
Gold: Die Plasmafrequenz bestimmt bis zu welcher Frequenz das Licht reflektiert wird

starke Absorption → starke Reflexion

das nicht bedeuten, dass stark absorbierende Stoffe auch stark reflektieren (das würde der Energieerhaltung widersprechen). Vielmehr führt die starke Transmission im nichtabsorbierenden Spektralbereich dazu, dass der reflektierte Anteil des Lichts gerade die Komplementärfarbe ergibt. Am einfachsten lässt sich der Zusammenhang an einem Beispiel (siehe Abbildung 3.2.11) verdeutlichen: Ein Strich mit einem roten Filzstift auf weißem Papier führt zu einem roten Strich weil blaues und grünes Licht absorbiert wird. Wenn Sie mit dem selben Stift auf schwarzem (möglichst glänzendem) Papier schreiben, werden Sie feststellen, dass der Strich in Reflexion blau-grün erscheint. Das rote, vom Farbstoff komplett transmittierte, Licht wird auf der schwarzen Unterlage absorbiert. Es bleiben die reflektierten blauen und grünen Lichtanteile. Entscheidend ist also, dass das Licht am Farbstoff nicht nur absorbiert, sondern teilweise eben auch reflektiert wird.



(a) Prinzip



(b) roter Filzstift

Abbildung 3.2.11: Starke Reflexion bedeutet auch starke Absorption: Ein roter Filzstift ergibt auf einer dunklen Unterlage eine blaugrüne Reflexion. An der Grenzschicht Farbe–Luft wird bei roter Farbe vor allem Blau und Grün reflektiert (starke Reflexion = starke Absorption). Auf weißem Untergrund dominiert aber der rote Anteil, der auf dem weißen Papier reflektiert wird (Blau und Grün werden ja von der Farbe absorbiert). Auf tief-schwarzem Papier entfällt dieser Anteil aber. Farbtafel: 12

3.3 Farbpigmente und Farben in der Natur

Bereits seit mehr als 35.000 Jahren benutzen Menschen Farben. Zunächst standen nur verschiedene Braun- und Rottöne (*Eisenoxid*) zur Verfügung. *Synthetische Farben* wurden wohl erstmals in Ägypten vor ca. 5000 Jahren eingesetzt: Die Mischung von Kalk, Quarzsand und Kupferoxid mit Soda ergibt nach Erhitzen (ca. 1000 °C) ein *Calcium-Kupfer-Silikat*, das verschiedene Blautöne aufweisen kann. Traditionell wurden neben Pflanzen und Tieren vor allem Gesteine bzw. Edelsteine zermahlen um Pigmente unterschiedlicher Färbung zu gewinnen. Der Preis entsprechender Pigmente war dabei teilweise sehr hoch, so dass einige Farben wie z.B. das Ultramarin²⁴ oder Zinnoberrot nur für Hauptfiguren bei Bildern (also z.B. Jesus) verwendet wurden. Erst ab 1826 wurde es möglich, Farbstoffe großtechnisch herzustellen und die Produktion von künstlichem *Indigo*, dem ersten synthetisch großtechnisch produzierten Blau, startete 1897 bei der Firma BASF. Der wertvollste Farbstoff ist das berühmte *Purpur*. Für ein einziges Gramm dieses Stoffes müssen 10.000 Schnecken verarbeitet werden. Nicht ganz so aufwendig zu gewinnen ist der rote Farbstoff, der aus der *Koschenille-Schildlaus* gewonnen werden kann (125.000 Läuse ergeben 50 g).

erste synthetische Farbe: 3000 vor Chr. in Ägypten



(a) blauer (vermutlich als Warnung gegenüber Feinden) Pfeilgiftfrosch

(b) grüne (vermutlich zur Tarnung) Schlange

Abbildung 3.3.12: Grüne Frösche und Schlangen sind aufgrund der subtraktiven Farbmischung (blau und gelb) grün. Dabei wird das Blau durch Rayleigh Streuung generiert (vgl. Kapitel 4). Wenn das gelbe Pigment fehlt, lässt sich auch Blau generieren. Farbtafel: 12.0.7

Pigmente sind mikroskopische Körnchen, die wesentlich größer als Farbstoffmoleküle sind. Einfallendes Licht wird an diesen Körnchen abhängig von der Wellenlänge absorbiert bzw. gestreut. Das einfallende Licht wird also diffus reflektiert (vgl. auch Abschnitt 3.4). Damit die „Farbe“ sinnvoll zu verarbeiten ist, werden die Pigmente durch ein Bindemittel (z.B. Ei, Öl, Kunstharz (z.B. Acryl), Leim) zu einer streichfähigen Masse verbunden, die an Luft nach einer gewissen Zeit trocknet.

In neuerer Zeit werden auch Pigmente, deren Wirkungsweise nicht auf Absorption beruht, eingesetzt. Ein Beispiel sind die *Helicone* der Firma Wacker. Es handelt sich um transparente, ca. 5 µm dünne Plättchen aus organischen Polymeren, die in Kombinationen mit traditionellen Pigmenten eingesetzt werden.

Pigmente sind größer als Farbstoffmoleküle

neue Pigmente basieren teilweise auf Interferenzeffekten

²⁴wird aus Lapislazuli (lat.: „blauer Stein“) hergestellt und musste aus Afghanistan importiert werden

Die an der Vor- und Rückseite der Pigmente reflektierten Lichtwellen interferieren ähnlich wie bei Seifenblasen (siehe Abschnitt 7.2.5). Damit werden bestimmte Wellenlängen abgeschwächt, während andere verstärkt werden (siehe Kapitel 7.2).

Während bei Pflanzen viele unterschiedliche Farbstoffe und Pigmente auftreten, werden im Tierreich vorrangig bräunlich/rötliche Pigmente verwendet. Grüne und blaue Farben werden meist auf andere Art realisiert. Blautöne werden vor allem über Streuung (siehe Abschnitt 4.1) und Interferenz erzeugt. Tiefblaue Töne ergeben sich dann, wenn der Hintergrund sehr dunkel (schwarz) ist. Grüntöne kommen (fast immer) zustande, wenn die durch Streuung oder Interferenz erzeugten Blautöne subtraktiv mit einem gelben Pigment gemischt werden. Typische Beispiele sind der *Frosch* sowie viele grüne *Schlangen* und *Vögel*. Mehrere Schichten innerhalb der Haut sind hierfür notwendig. Die unterste Schicht enthält schwarze Pigmente und dient als Hintergrund, um das Blaugrün, das sich in der nächsten Ebene durch Interferenz an kleinen *Guanin-Kristallen* ergibt (siehe Abschnitt 7.2), besonders leuchtend zu machen (vgl. Kapitel 7). Schließlich folgt eine Schicht gelber Farbpigmente, die durch subtraktive Farbmischung (s.u.) dann den eigentlichen Grünton erzeugt²⁵ (siehe Abb. 3.3.13).

Nicht selten spielen bei der Farbgebung von bunten Tieren *Interferenz-* und *Beugungseffekte* (siehe Kapitel 7) eine Rolle. Oft handelt es sich dabei um besonders strahlende oder schillernde Farben, wie man sie z.B. von besonders farbenprächtigen Schmetterlingen oder Pfauenfedern kennt. Man spricht dann von *struktureller Farbe*.

Farbe im Tierreich: rote/braune/gelbe Pigmente, der Rest wird meist durch Streuung, Interferenz und Beugung erreicht
Warum ist der Frosch grün?

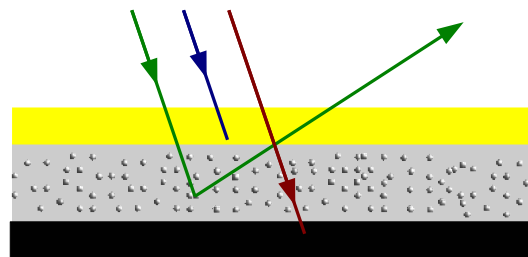


Abbildung 3.3.13: Das Grün der meisten Tiere entsteht durch subtraktive Farbmischung von gelben Pigmenten mit blau-grüner Rayleigh Streuung. Blaues Licht wird in der gelben Pigmentschicht absorbiert. Rotes Licht wird vom schwarzen Untergrund absorbiert. Lediglich grünes Licht wird ausreichend häufig gestreut und nicht von der gelben Schicht absorbiert. Farbtafel: 12.0.8

Vogelfedern verwenden neben dieser strukturellen Farben vor allem Pigmente aus der Klasse der Carotinoiden²⁶ und der Melanine. Die Carotinoide decken dabei einen Farbraum von Gelb über Rot bis Purpur ab. Aufgenommen werden die Pigmente über die Nahrung – entweder direkt aufgrund von Pflanzen oder indirekt über den Verzehr von Kleintieren. Zum Beispiel hat der Flamingo rötliche Federn weil er kleine Krebse frisst, die wiederum eine spezielle Algenart als Nahrungsgrundlage haben. Für die sehr gebräuchlichen Braun- und Schwarztöne sind vor allem *Melanine* verantwortlich.

²⁵Angeblich ist es möglich, dies an Fröschen zu verifizieren, indem man diese einer extremen Diät ohne Karotine unterzieht. Es ergibt sich dann ein Fehlen des gelb-roten Farbstoffes und damit dann ein blauer Frosch.

²⁶Zu dieser Klasse gehört das bekannte orange-farbene Betacarotin.

Das Grün von Pflanzen wird im wesentlichen durch das in den Chloroplasten enthaltene Chlorophyll bestimmt. Dieses Molekül absorbiert letztlich alle Farben des sichtbaren Spektrums mit Ausnahme von Grün. Eine wirkliche Ausnutzung des absorbierten Lichts erfolgt allerdings nur in einem relativ schmalen (40 nm) Bereich um 660 nm, also im roten Spektralbereich. Um diesen Bereich zu verbreitern ohne die Absorption zu verringern müsste man von einem Farbstoff zu einer Kombination von Farbstoffen übergehen.²⁷

Chlorophyll absorbiert alles außer Grün



Abbildung 3.3.14: Im Herbst werden die Blätter rot oder braun. Grund hierfür ist das rote Anthocyanin, das dafür sorgt, dass das wertvolle Chlorophyll nicht zu stark bei schlechten Umgebungsbedingungen belichtet und damit zerstört wird. Farbtafel: 12.0.9

In abgestorbenen Blättern fehlt dagegen das Chlorophyll und entsprechend nehmen die Blätter eine beige oder braune Farbe an. Diese Farbe wird durch andere Moleküle in den Blättern bestimmt, die auch schon beim lebenden Blatt vorhanden sind, vom Chlorophyll aber dann überdeckt werden. Warum werden die Blätter oft aber auch im Herbst zunächst rot? Eine Theorie sagt, dass der Stickstoff im Chlorophyll zu wertvoll für den Baum ist und über den Winter gerettet werden muss. Entsprechend wird das Chlorophyll zersetzt, um den Stickstoff zu recyceln. Die rote Farbe im Herbst kommt durch sogenannte Anthocyane zu Stande. Diese Stoffe werden erst beim Abzug des Chlorophylls gebildet. Bei den verhältnismäßig tiefen Temperaturen im Herbst kann zu viel Sonnenlicht zu einer Überlastung des Blattes führen. Viel Licht führt dann dazu, dass das Chlorophyll für die schlechten Bedingungen (Trockenheit, Nährstoffmangel, Kälte) des Herbstes zu viel Licht absorbiert. Dieses Licht wird durch das Chlorophyll dann unter anderem zur Produktion von zellschädigenden Stoffen, die unter den schlechten Bedingungen nicht schnell genug abgebaut werden können, und letztlich zum Tod des Blattes führen, verwendet. Die Lösung ist das rote Anthocyanin, das viel Licht absorbiert und damit dafür sorgt, dass das Chlorophyll nicht überlastet wird.

warum die Blätter im Herbst rot werden

²⁷Gerthsen, Kneser, Vogel: „Physik“, Springer (2007)

Für den visuellen Eindruck ist nicht nur die Farbe selbst, sondern auch der Glanz und die Struktur von entscheidender Bedeutung. Ein Goldbarren sieht eben deshalb charakteristisch wie ein Goldbarren aus, weil er nicht nur das „richtige“ Gelb hat, sondern eben auch weil der charakteristische Glanz hinzukommt.

Glänzende Farbe: Mal mehr gesättigt, mal weniger gesättigt

Glänzende Farben zeigen teilweise eine stärkere *Sättigung* als matte Farben. Der Grund hierfür ist, dass das von den Farbpigmenten nicht absorbierte Licht an der Grenzschicht zur Luft teilweise erneut hin zu den Pigmenten reflektiert wird und damit erneut die Chance hat, absorbiert zu werden. Andererseits erscheinen glänzende Farben natürlich dann sehr wenig gesättigt, wenn das von ihnen reflektierte Licht unser Auge trifft, denn die direkte Reflexion ist ein Vorgang, der (weitgehend) unabhängig von der Wellenlänge stattfindet. Ganz entsprechend liefert ein spiegelnder Computermonitor (unter normalen Sehbedingungen) etwas brillantere Farben, denn das Umgebungslicht wird nicht an der Oberfläche gestreut, sondern reflektiert. Wenn nun der Beobachter in der Reflexion sitzt, dann ist der Bildeindruck natürlich massiv gestört. Wenn die Reflexion aber nicht das Auge trifft, dann fehlt der Streulichtuntergrund und die Farbsättigung wird erhöht.

3.4 Farbmischung

Wenn gleichzeitig Photonen verschiedener Energie bzw. Wellenlänge auf die Netzhaut treffen, dann werden gleichzeitig verschiedene Zapfentypen angeregt. Natürlich gibt es auch für diesen Fall eine Wahrnehmung, also einen *Farbeindruck*²⁸. Damit ist klar, dass es für uns Farben gibt, die nicht im Spektrum des Lichts vorhanden sind (z.B. *violett*).

Wie kommt es zu „Violett“?

Gleichzeitig können verschiedene spektrale Verteilungen zur selben Anregung der Zapfen führen. Man spricht von *Metameren*. Farbige Objekte werden dadurch farbig, dass sie bestimmte spektrale Anteile des Licht absorbieren. Somit hängt die Farbe des Objekts nicht nur vom Material sondern auch von der Beleuchtung ab. Dies stellt insbesondere bei Metameren ein praktisches Problem dar. Zwei Objekte, die bei Kunstlicht anscheinend dieselbe Farbe aufweisen, können bei Tageslicht einen deutlichen Farbunterschied zeigen. Daher der alte Tipp, eine Farbwahl bei Kleidern nicht nur unter Kunstlicht zu treffen, sondern mit den Kleidern zu einem Fenster zu gehen, um Sonnenlicht zur Beleuchtung zu haben. Sehr stark ist der Effekt bei Grün- und Brauntönen²⁹ weil die spektrale Empfindlichkeit der roten und grünen Zapfen so ähnlich ist.

Metamere ergeben trotz unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung denselben Farbeindruck

Ein besonders extremes Beispiel ist der Edelstein *Alexandrit*. Bei Tageslicht erscheint Alexandrit grünlich während bei Kerzenlicht eine rötliche Färbung beobachtet wird. Nicht ganz so extrem tritt der Effekt insbesondere bei Kerzenlicht sehr oft auf. Abb. 3.4.15 zeigt ein blau-violettes Teelicht. Bei normalem Tageslicht (Sonnenlicht) wirkt das Wachs eher tiefblau. Sobald das Teelicht angezündet wird erscheint das Wachs aber rötlich-violett.

Umgekehrt ist es aber auch nicht für alle Spektralfarben möglich, diese durch drei (gegebene) Grundfarben zu mischen. Wir sind also nicht in der Lage,

²⁸Natürlich werden auch durch viele Photonen einer und derselben Wellenlänge verschiedene Zapfentypen angeregt.

²⁹„Braun“ ist im übrigen ein „Orange“ mit geringer Helligkeit. Entsprechend ergibt ein Gelb mit geringer Helligkeit den Eindruck „olivbraun“.



(a) Beleuchtung durch Sonnenlicht

(b) Beleuchtung durch Kerzenlicht

Abbildung 3.4.15: Metamerie bei Kerzenwachs. Das unterschiedliche Spektrum der Beleuchtung führt zu einem stark unterschiedlichen Farbeindruck. Beachten Sie: Aufgrund des automatischen Weißabgleichs des Digitalfotos ergibt sich eine Verfälschung, der Effekt ist aber genauso mit dem bloßen Auge (auch hier Farbabweichung!) drastisch.

auf einem Computerbildschirm dasselbe Blaugrün zu mischen, das wir mit einem Laser erzielen würden. Mathematisch kann man durch Linearkombination der drei Grundfarben dieselbe Farbkoordinate³⁰ und damit denselben Farbeindruck realisieren. Es zeigt sich aber, dass für viele Farbkoordinaten dies mit echten Lichtquellen nur dann möglich ist, wenn einige der Koeffizienten negativ werden, was physikalisch natürlich nicht realisierbar ist.³¹

Die bisher beschriebene Art der Überlagerung von Farben nennt man *additive Farbmischung*. Sie ist Grundlage der *Farbfotografie* und des *Farbfernsehens*, aber auch des *Pointillismus* und hochwertiger *Farbdrucke*. Aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau können wir alle Farben zusammensetzen, die vom Menschen wahrgenommen werden können.³² Im Gegensatz zum Farbfernsehen können bei Drucken oder Gemälden mittels additiver Mischung allerdings keine dunklen Farben hergestellt werden, so dass zusätzlich schwarze Tinte als vierte „Farbe“ benötigt wird.

Additive Farbmischung

Interessanterweise funktioniert die additive Farbmischung sogar (allerdings in deutlich verringerter Stärke) für die beiden getrennten Augen. Wenn dem einen Auge eine rote und dem anderen eine grüne Szene dargeboten wird, sieht unser Sehsystem insgesamt eine gelbe Szene. Sie können den Effekt einfach mit einer Rot-Grün-Brille („Stereobrille“) verifizieren.

Bei der Überlagerung aller drei Grundfarben ergibt sich der Farbeindruck „weiß“. Allerdings kann weißes Licht auch durch die Überlagerung von lediglich zwei Farben erzielt werden.³³ Neben seinen vielen (und bekannteren) Erfolgen hat Isaac *Newton* auch den sogenannten *Farbkreis* erfunden (siehe Abbildung 3.4.16). Am Rand des Kreises findet man die *gesättigten Farben*. Zum Zentrum hin nimmt die Sättigung ab, im Zentrum selbst findet man weiß. Im Farbkreis wurden die Farben erstmals nicht mehr wie bei einer Prismenaufspaltung linear sondern eben auf einem Kreisumfang angeordnet. Das ist sinnvoll,

Weiß lässt sich durch Mischung von zwei Farben erzielen

³⁰Die quantitative Beschreibung von Farben ist ein unerwartete komplexes Unterfangen und wir wollen hier nicht auf die Details eingehen. Der interessierte Leser sei auf die hervorragende Einführung von Andrew Young „What Color is it?“ im Internet verwiesen.

³¹Für virtuelle, nicht wirklich praktisch realisierbare Lichtquellen gilt das nicht.

³²Damit das perfekt funktioniert, müssen die spektralen Verteilungen dieser Grundfarben passend zu den Empfindlichkeitskurven der Zapfen gewählt werden.

³³Dies ist von großer technischer Bedeutung z.B. bei der Realisierung preiswerter weißer LEDs, vgl. Abschnitt 9.3.

da man Farbmischungen in diesem Kreis sehr gut darstellen kann.

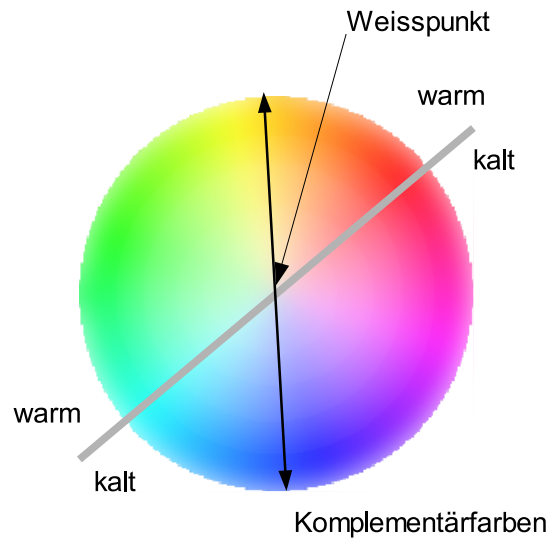


Abbildung 3.4.16: Newtonscher Farbkreis: Komplementärfarben liegen auf gegenüberliegenden Punkten des Kreises. Im Zentrum des Kreises befindet sich „weiß“. Die Farbsättigung nimmt also zum Zentrum der Kreisscheibe ab. Farbtafel: 12.0.10

Komplementärfarben liegen im Farbkreis gegenüber

Wenn Sie zwei auf dem Farbkreis gegenüberliegende Farben, sogenannte *Komplementärfarben*, mischen, ergibt sich Weiß. Dies sieht man durch einfache Vektoraddition der die beiden Farben kennzeichnenden Vektoren. Da diese gerade entgegengesetzte Richtungen haben, ergibt sich die Summe Null, also den Kreisursprung (und dort liegt „weiß“). Wenn beide Vektoren nicht gleich lang sind, also die eine Farbe stärker als die andere vorliegt, dann ergibt die Summe kein reines Weiß, aber auch keine reine, gesättigte Farbe.

Visuelle Spannung und Temperatur

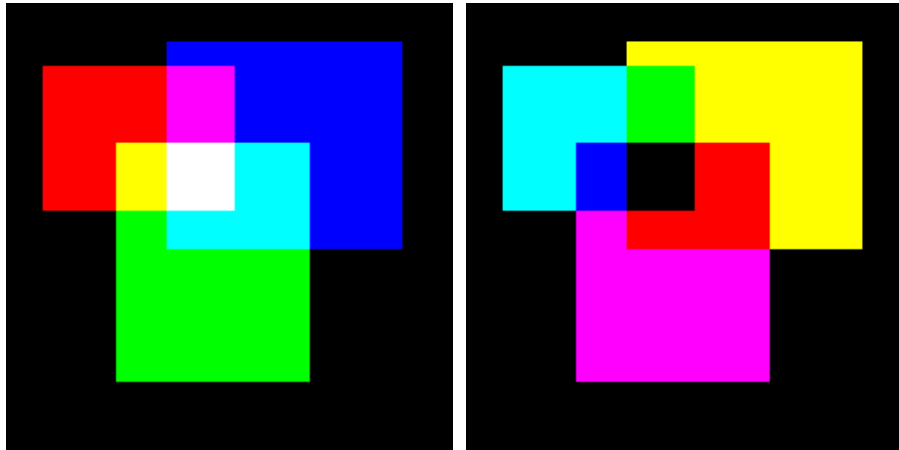
Komplementärfarben ergeben auch die größte „visuelle Spannung“. Eine rote Blume in einer ansonsten grünen Fläche fällt besonders stark auf. Warum diese Komplementärfarben einen starken visuellen Kontrast ergeben, werden wir später besser verstehen. Eine der beiden Komplementärfarben (z.B. Rot) ist dabei eine „warme“ Farbe, die andere (Grün) dann eine „kalte“ Farbe. Die größten visuellen Spannungen bestehen zwischen Gelb und Violett sowie zwischen Gelborange und Blauviolett. Als besonders „warm“ werden von Menschen Rot/Orange-Töne empfunden während dagegen ein Blau mit leichten Grünanteilen besonders „kalt“ wirkt.

warme und kalte Farben

Warum einzelne Farben eher als warm und andere eher als kalt empfunden werden ist nach wie vor eine schwierige Frage, für die zwar viele, aber keine wirklich überzeugenden Hypothesen genannt werden. Das ändert aber nichts an der Gültigkeit dieser Unterscheidung. So werden z.B. im Durchschnitt bläulich gestrichenen Räume angeblich stärker beheizt als Räume, die in rötlichen Tönen gehalten sind. Die „Kälte“ einer Farbe kann in der Praxis auch zum Mischen von Farben eingesetzt werden. Um eine Farbe exakt auf eine andere Farbe abzustimmen, können Sie versuchen, sich an der Kälte der Farbe und der Kälte der Zielfarbe zu orientieren und entsprechend kalte bzw. warme Farbe zugeben.

*Subtraktive Farbmischung:
Gelb(Grün) + Blau(Grün) =
Grün*

Die additive Farbmischung ist physikalisch direkt einleuchtend, widerspricht aber unserer Erfahrung, denn wir wissen seit unseren ersten Malversuchen im



(a) additiv (z.B. Farb-Fernseher)

(b) subtraktiv (z.B. Wasserfarben)

Abbildung 3.4.17: Farbmischungen. Farbtafel: 12.0.11

Kindergarten, dass z.B. Rot und Grün ein Braun und nicht etwa Gelb ergibt. Wir sind die sogenannte *subtraktive Farbmischung* gewohnt.

Abbildung 3.4.18 zeigt am Beispiel „Blau und Gelb ergibt Grün“, wie die subtraktive Farbmischung funktioniert: Einfallendes weißes Licht (z.B. von der Sonne) fällt auf *Farbstoffe* der blauen und der gelben Farbe. Die Farbstoffmoleküle der blauen Farbe absorbieren besonders stark langwellige Spektralbereiche, also Rot während die gelben Farbstoffmoleküle sowohl langwellige wie auch sehr kurzwellige Spektralbereiche absorbieren. Daher wird letztlich alles außer Grün absorbiert und die Farbe erscheint uns grün. Wichtig ist dabei, dass die verwendeten Grundfarben keine reinen Spektralfarben sind. Das Blau darf also nicht alles Licht außer Blau absorbieren, sondern muss damit es für die Mischung geeignet ist, auch Grün passieren lassen. Die eigentlichen subtraktiven Grundfarben sind genaugenommen (gut sichtbar bei Tintenstrahldruckern) Zyan, Magenta und Gelb. Diese Grundfarben sind komplementär zu den Grundfarben der additiven Farbmischung.

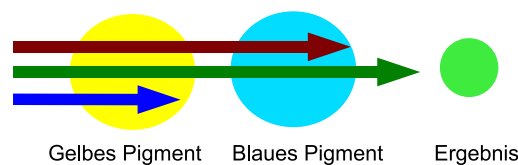


Abbildung 3.4.18: Subtraktive Farbmischung am Beispiel „Blau und Gelb ergibt Grün“: Das gelbe Farbstoffmolekül absorbiert nur Blau und lässt Rot und Grün passieren. Das blaue Farbstoffmolekül (eigentlich Cyan) lässt dagegen Gelb und Blau passieren. Wenn Licht beide Farbstoffe/Pigmente passieren muss, wird alles außer Grün absorbiert.

Im Prinzip können Sie durch die Farbmischung alle Farben aus wenigen Grundfarben mischen. In der Praxis versuchen Maler aber, wenn möglich, nicht nur die Grundfarben zu verwenden. Ein „reines“ Orange ist z.B. deutlich effektiver als Rot und Gelb zu mischen denn das gelbe Pigment absorbiert einen Teil des roten Lichts und das rote Pigment absorbiert einen Teil des gelben Lichts, so dass letztlich vom weißen Sonnenlicht Anteile absorbiert werden, die zusammen Orange ergeben. Besser ist hier also die Verwendung eines orange-

Farben mischen ist sinnvoll. Aber besser ist die Verwendung spezieller Pigmente.

farbenen Pigments, das gezielt Rot und Gelb passieren lässt.

Noch leuchtendere Farben erzielt man durch fluoreszierende Farbstoffe (siehe Abschnitt 9.2.9). Photopapier ist aus diesem Grund so beschichtet, dass ultraviolettes Licht sehr gut reflektiert wird. Das reflektierte UV-Licht fällt dann auf die aufgedruckten fluoreszierenden Pigmente und ergibt so eine leuchtende Farbe. Beim „normalen“ Papier wird das UV-Licht nicht so stark reflektiert sondern teilweise direkt in längerwelliges Licht umgewandelt. Die Fluoreszenz im aufgedruckten Pigment ist dann halbiert.

Neben der Malerei finden wir die subtraktive Farbmischung auch in der Drucktechnik. In diesem Fall werden die unterschiedlichen Grundfarben aufeinander gedruckt bzw. zerlaufen ineinander. Hier wird in der Regel ein zusätzliches „Schwarz“ verwendet, sowohl um den Kontrast zu verbessern als auch um Druckkosten (separate schwarze Tintenpatronen bei Druckern) zu sparen. Eine Mischung der drei Grundfarben ergibt kein reines Schwarz, da keine vollständige Absorption über das Spektrum erfolgt. Die Herstellung eines wirklich guten schwarzen Farbstoffes ist im übrigen ziemlich problematisch. Bei genauer Betrachtung sieht man meist einen leichten Farbschimmer (oft Rot oder Gelb³⁴). Durch die Bepflanzung einer Oberfläche mit Kohlenstoff Nano-Röhrchen sind allerdings heute Reflexionsfaktoren unter 1% möglich.

Generell sind die Vorgänge, die sich in einem Farbanstrich abspielen alles andere als simpel und einfach vorhersehbar. Abb. 3.4.19 zeigt einige der Prozesse.

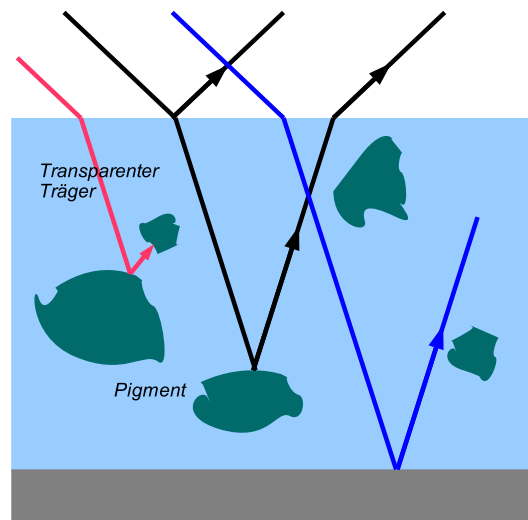


Abbildung 3.4.19: Einige Prozesse innerhalb einer Farbschicht: Im transparenten Farbräger sind Farbpigmente verteilt, die einfallendes Licht wellenlängenabhängig absorbieren und streuen. Eingezeichnet sind (Farben willkürlich gewählt) verschiedene Lichtwege.

Neben der Absorption ergeben sich Reflexionen und Streuungen sowohl an den Pigmenten und anderen Bestandteilen in der Farbe als auch an der Oberfläche der Lösung, in der die Pigmente sind. Als transparente Lösemittel für die Pigmente kommen unter anderem Wasser (Wasserfarbe), Öl (Ölfarbe), Acrylate und Azetate in Frage. Für den resultierenden Farbeindruck spielen sowohl die Pigmentgröße als auch die Pigmentkonzentration und der Einsatz der Farbe eine Rolle.

die Prozesse innerhalb einer Farbschicht sind kompliziert

³⁴weil rote und gelbe Pigmente vergleichsweise breitbandig sind

Die Brechungsindizes von Farbstoff und Umgebung entscheiden aufgrund der Fresnelschen Gleichungen (siehe Abschnitt 6.3) über den Reflexionsgrad und damit über den Farbeindruck. Besonders drastisch zeigt sich dies beim Putzen. Verschüttete Milch führt nach dem Trocknen zu einem leichten weißen Schleier. Wenn man nun mit Wasser die Fläche putzt, verschwindet der Schleier. Nach dem Trocknen erscheint der Schleier aber oft wieder. Der Grund hierfür liegt in dem ähnlichen Brechungsindex von Wasser und Milchrückständen. Damit ergibt sich an den Milchrückständen wenig Streuung bzw. Reflexion solange diese Partikel in Wasser gelöst sind. Der weiße Eindruck verschwindet also im nassen Zustand.

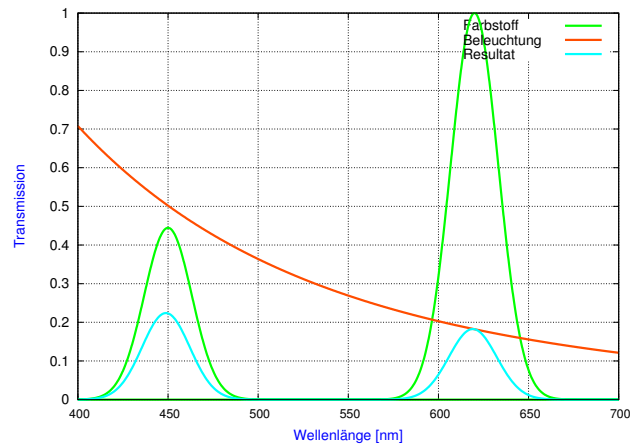
Warum es schwierig ist, Milchflecken wegzuputzen



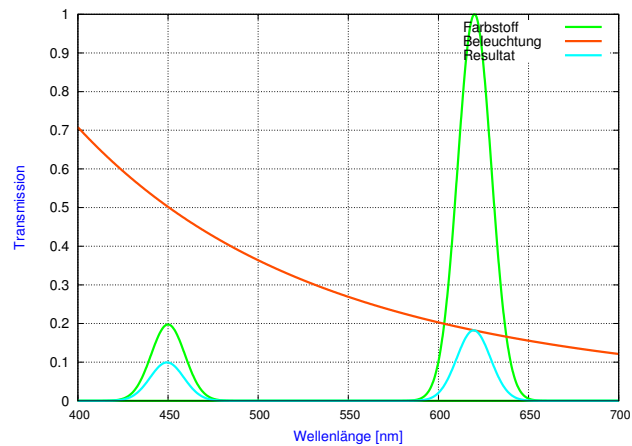
Abbildung 3.4.20: Usambara Effekt: Durch die erhöhte effektive Dicke (wir schauen durch viel Glas) im linken und rechten Bereich des Glases ändert sich der Farbeindruck von Blau zu Violett.

Auch die Dicke einer Farbschicht kann von erheblicher Bedeutung sein. Abb. 3.4.20 zeigt ein Beispiel für den *Usambara Effekt*. Das bläuliche Cola-Glas wirkt am linken Rand deutlich violett. Der Grund hierfür ist in der unterschiedlichen Materialdicke durch die wir sehen gegeben. Links, am Rand des Glases sehen wir durch vergleichsweise viel Glas durch. Wenn nun die bläulichen Spektralanteile im Glas stärker absorbiert werden und die roten Anteil nahezu unverändert transmittiert werden, dann wird sich das Verhältnis von rotem zu blauem Licht bei zunehmender Dicke des Materials deutlich ändern (vgl. Abb. 3.4.21). Oft ist dieser unscheinbare und daher leicht zu übersehende Effekt bei bläulichem Plastik sichtbar.

Usambara Effekt: Änderung des Farbeindrucks mit Objekt-dicke



(a) Dicke 1



(b) Dicke 2

Abbildung 3.4.21: Usambara Effekt anhand eines blau/violetten Stoffes. Grundsätzlich lässt das Material blaue und rote Spektralanteile durch. Die Beleuchtung ist spektral so, dass bläuliche Spektralanteile stärker gewichtet werden. Bei doppelter Dicke wird doppelt so viel blaues Licht absorbiert während die komplette Transparenz im roten Spektralbereich bleibt. Dadurch verschiebt sich das Verhältnis von kurzen zu langen Wellenlängen und der Farbeindruck wird violett mit einem verstärkten Rotanteil.

3.5 Farbabgleich, Farbkonstanz und Farbwahrnehmung

Die Farbwahrnehmung beim Menschen wird nicht allein durch die Farbrezeptoren der Netzhaut, sondern auch durch die Verarbeitung in der Netzhaut und im Gehirn bestimmt. Wesentlich ist hierbei insbesondere, dass das Sehsystem eine Art *Weißabgleich* durchführt (siehe Abb. 3.5.22). Z.B. sind wir auch bei Beleuchtung einer Szene mit rotem Licht in der Lage, die Eigenfarben von Teilen der Szene recht gut zu schätzen. Konkret nehmen wir auch im rötlichen Licht des *Sonnenuntergangs* eine Zitrone als gelb wahr. Man spricht von *Farbkonstanz*, eine für das Überleben sicher sinnvolle Fähigkeit unseres Sehsystems.³⁵

Abgleich ist notwendig



(a) Ohne Weißabgleich

(b) mit Weißabgleich

Abbildung 3.5.22: Sowohl in technischen Systemen (Foto) als auch beim Mensch findet ein Weißabgleich statt. Farbtafel: 12.0.12

Eine Normierung analog zum eben beschriebenen „Weißabgleich“ des menschlichen Sehens zeigt sich auch in der Einschätzung von Helligkeiten: Auch bei geringer Beleuchtung werden weiße Flächen als hell und „weiß“ wahrgenommen. Ganz entsprechend fehlt bei der Betrachtung von Himmelskörpern oft ein passendes intensives Weiß zur Normierung. So kommt es, dass uns z.B. der Mond vor dem tiefschwarzen Hintergrund des Nachthimmels³⁶ weiß erscheint obwohl das Mondgestein eher wie dunkler Asphalt aussieht.

Edwin Land (der Erfinder des Polaroidfilms und des Folienpolarisators) hat diese Zusammenhänge als erster in ein konsistentes *Farbmodell* des menschlichen Sehens, die sogenannte *Retinex Farbtheorie* überführt. Am besten versteht man die Funktionsweise an einem Beispiel: Wir beleuchten eine Szene mit rotem Licht (Sonnenuntergang). Als RGB Werte der Beleuchtung nehmen wir $R=100, G=20, B=10$, kurz (100,20,10), an. Weiße Bereiche in der Szene führen damit zu einer entsprechenden Anregung unserer Zapfen mit (100,20,10). Ein *Schattenbereich* der Restlicht (z.B. Mischung von blauem Himmelslicht und

Retinex Farbmodell: Weißabgleich zur besseren Objekterkennung

³⁵Diese Farbkonstanz funktioniert für Beleuchtungen mit einer kontinuierlichen spektralen Verteilung, insbesondere dem Spektrum eines schwarzen Körpers, wie es die Sonne, unsere wichtigste Lichtquelle, aufweist. Künstliche Leuchtmittel (z.B. Mischung von LED Licht) mit stark diskontinuierlichen Spektren (bei wenigen LEDs) machen uns eine Farbschätzung schwierig oder unmöglich und werden daher teilweise als subjektiv störend empfunden.

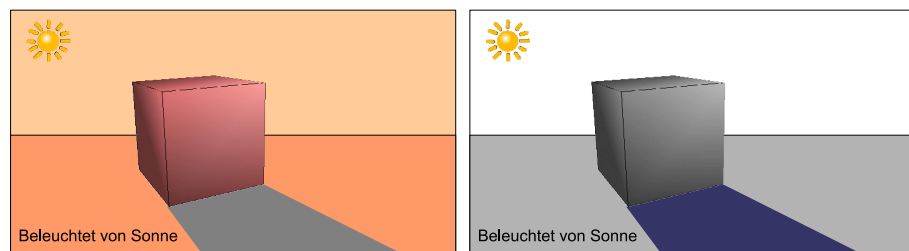
³⁶in Wirklichkeit ein tiefes Blau (vgl. Kapitel 4) mit sehr geringer Intensität

gestreutem roten Sonnenlicht) empfängt hat damit z.B. $(10,2,1) + (0,5,10) = (10,7,11)$. Diese Werte haben wir nun erst mal rein willkürlich gewählt.

Das Sehsystem berechnet zunächst aus dem dominierenden Farbwert einen Weißwert. Wenn die Szene aus vielen weißen Objekten (z.B. Schnee) besteht, dann muss also beim Weißabgleich $(100,20,10)$ zu einem ausgewogenen $(100,100,100)$ umgerechnet werden. D.h. beim obigen Beispiel wird jeder Rotwert mit 1 multipliziert, jeder Grünwert mit 5 und jeder Blauwert mit 10.

Das von dem Schattenbereich empfangene Licht wird genauso mit diesen Faktoren gewichtet so dass sich $(10, 35, 110)$ ergibt, d.h. der Schattenbereich auf Schnee erscheint beim Sonnenuntergang blau (oder bei violetter Beleuchtung sogar leicht grünlich). Der Weißabgleich beim menschlichen Auge ist in der Realität nicht ganz so simpel und auch nicht so extrem, der Effekt lässt sich aber sehr deutlich beobachten.³⁷

Nochmal farbige Schatten:
Grund ist der Weißabgleich



(a) Ohne Weißabgleich

(b) mit Weißabgleich

Abbildung 3.5.23: Nochmal blaue Schatten: Blaue Schatten können – abgesehen durch eine Bestrahlung der Schattenfläche mit blauem Himmelslicht – auch durch den Weißabgleich des Auges (oder einer Kamera) zustande kommen.

Psychologische Grundfarben
durch Verschaltung in der
Retina: Rot, Grün, Blau und
Gelb

Psychologisch gehen wir im übrigen nicht von drei sondern von vier Grundfarben, nämlich Rot, Grün, Blau und Gelb, aus. Man spricht von *psychologischen Grundfarben*. Andere Farben, z.B. türkis, werden von uns als Farbmischung wahrgenommen.

Letztlich wird bei der Verarbeitung der Farbsignale in der Retina eine Verschaltung wie in Abbildung 3.5.25 dargestellt vorgenommen. Wesentlich sind also drei Arten von Zwischenvariablen: Gelb–Blau, Rot–Grün und Schwarz–Weiß. Ein tiefes Blau führt so z.B. zu einem negativen Wert der Blau–Gelb Variablen V1, während ein Gelb zu einem positiven Wert dieser Variable führt. Entsprechend wird Rot durch einen starken Wert der Rot–Grün Variablen V2 und Grün durch einen entsprechenden schwachen Wert dieser Variablen repräsentiert. Somit ergeben sich schließlich die vier Grundfarben. Die dritte Variable V3 bestimmt die Helligkeit eines Reizes.

Alle Farben lassen sich für uns als Mischung dieser vier Farben beschreiben, z.B. „Orange = Gelb–Rot“ oder „Türkis“ = Blau–Grün. Aufgrund der Verschaltung ist es aber für uns eben eine anschauliche Mischung von Rot und Grün nicht möglich. aus Andererseits bleiben für uns die Farbmischungen „Blau–Gelb“ oder „Rot–Grün“ ohne Bedeutung bzw. sind nicht als Farbe vorstellbar.

³⁷Sie können das auch mit farbigen Glühbirnen testen. Der Schatten nimmt dabei jeweils die Komplementärfarbe der Beleuchtung an. Wichtig ist generell, dass immer auch noch weißes Licht in geringem Maß vorhanden ist, sonst ergibt auch die beim Weißabgleich stattfindende Verstärkung der Komplementärfarbe bei der Multiplikation nur einen geringen Wert für die Komplementärfarbe.



Abbildung 3.5.24: Spielzeug ist nicht umsonst meist in den vier psychologischen Grundfarben gehalten: Die Unterscheidung dieser Farben gelingt aufgrund der neuronalen Verschaltung in der Retina besonders gut. Farbtafel: 12.0.13

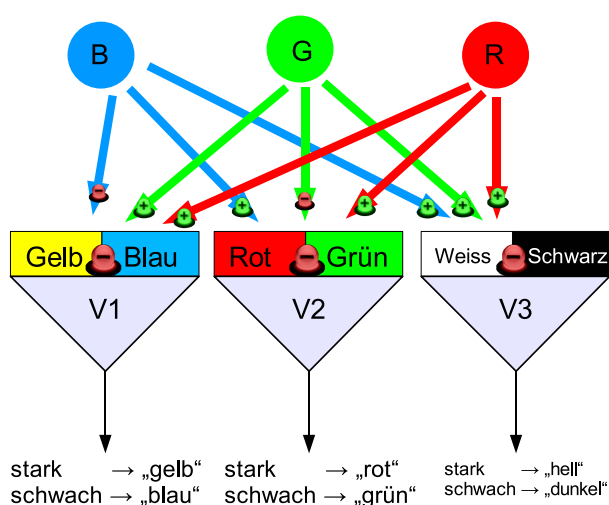


Abbildung 3.5.25: Psychologische Grundfarben: Farbverschaltung auf der Netzhaut. Aus den drei Farbdetektorsignalen werden zwei Farbsignale generiert, die damit $2^2 = 4$ vier Grundfarben kodieren. Die Wirkung des blauen Lichtanteils auf V3, also die Helligkeitsdetektion ist extrem gering bzw. vernachlässigbar.

Für die Helligkeitskodierung (V3) spielt der blaue Lichtanteil praktisch überhaupt keine Rolle. So erfolgt beim Blick durch gelbe Sonnenbrillengläser zwar physikalisch eine deutliche Abschwächung der Helligkeit, psychologisch ist die Abdunklung durch die Gläser aber gering.³⁸

Teilweise wird auch behauptet, dass die Sehschärfe durch die gelben Sonnenbrillen verbessert wird (Abb. 3.5.26). Im allgemeinen gibt es hierfür aber keine Anhaltspunkte³⁹. Für die typische Anwendung gelber Sonnenbrillen bei Piloten wird natürlich der Kontrast stark verbessert, denn der Hintergrund (blauer Himmel) wird durch das Ausfiltern des Blauanteils gegenüber dem Vordergrund verdunkelt. Aber auch andere Farben werden propagiert: So gibt es z.B. die MaxSight Kontaktlinsen, die ebenfalls nur einen geringen Teil des kurzwelligeren Lichts durchlassen, aber entweder als Orange oder aber Grau-

Gelbe Sonnenbrillen führen zu einer erhöhten subjektiven Helligkeit

³⁸Für einige Menschen scheint die Helligkeit durch die gelben Gläser sogar zu zunehmen. Verantwortlich hierfür könnte entweder eine leichte Negativgewichtung des Blaukanals für V3 oder aber eine leichte Vergrößerung des Pupillendurchmessers (es fällt ja weniger Licht ein, also wird die Pupille geöffnet) sein.

³⁹Optometry & Vision Science 77, S. 73-81, 2000

grün angeboten werden. Orange im Gegensatz zu Gelb hat bei Ballsportarten auf grünem Untergrund den Vorteil, dass eben der Kontrast des Balls zum Untergrund verstärkt wird.



Abbildung 3.5.26: Gelbe Sonnenbrillengläser führen (teilweise) subjektiv kaum zu einer Helligkeitsreduktion und führen zu Kontrastverbesserung bei Objekten vor blauem Hintergrund (z.B. Himmel). Farbtafel: 12.0.14

Farbwirkung hängt von Kontext und Kultur ab

Die *psychologische Farbwirkung* selbst hängt in großem Umfang von der Kultur in der eine Person aufwächst, ab. „Schwarz“ (psychologisch gesehen ist „Schwarz“ „eine Farbe“) ist beispielsweise bei uns eine Farbe mit der Tod und Trauer assoziiert sind, während dies in fernöstlichen Kulturen nicht der Fall ist.

Farbwirkung hängt von der Form ab

Die subjektiv wahrgenommene Farbe hängt aufgrund unseres Vorwissens auch von der Form und Umgebung der Objekte ab. Schneidet man beispielsweise aus demselben roten Karton ein Rechteck und die Form eines Apfels aus, so wirkt der ausgeschnittene Apfel rötlicher als das Rechteck.

Farbe und Helligkeit: Übersteuerung

Farbunterschiede lassen sich schlecht beurteilen, wenn die Quelle des Lichts sehr hell ist. Sehr helles Licht wird als weiß wahrgenommen da die Farbsensoren praktisch in die Sättigung gehen. Dieser Effekt tritt beim Menschen genauso wie bei technischen Systemen (Digitalkameras) auf. Aus diesem Grund können Sie den Farbunterschied heller Lichter besser über die Reflexion (und damit Verringerung der Lichtintensität) in Wasser oder einer Glasscheibe oder aber durch Verwendung einer Sonnenbrille beurteilen (wichtig bei der Beobachtung von vielen Farbphänomenen, z.B. irisierende Wolken, siehe Abschnitt 7.7). Dies ist auch der Grund, warum „weiß-glühendes“ Metall bei ca. 2000° eben weiß wahrgenommen wird und andererseits ein ebenfalls 2000 °C heißer Stern rot erscheint. Das Licht des weit entfernten Sterns wird soweit abgeschwächt, dass die Farbe sichtbar ist.

3.6 Farbänderung

langsame Farbänderungen erfolgen durch hormonelle Änderungen

Viele Tiere sind in der Lage, über lange Zeiträume ihre Farbe zu variieren. So führt der jahreszeitliche Wechsel z.B. beim *arktischen Fuchs* zu einer Änderung des Fells von weiß (Winter) zu braun (Sommer). Dies wird durch eine *hormonelle Änderung* bewirkt, die zu einer veränderten Produktion von Farbstoffen, sogenannten *Biochromen* führt⁴⁰.

⁴⁰Sobald die Biochrome in tieferen Hautschichten liegen, werden sie *Chromatophore* genannt



Abbildung 3.6.27: Die Farbänderung beim Chamäleon erfolgt durch Chromatophore und mehrere Farbschichten (siehe Text).

Deutlich beeindruckender sind natürlich schnelle Änderungen, wie sie bekanntermaßen beim *Chamäleon* oder (weniger bekannt) beim *Tintenfisch* auftreten. Dabei ist jede Chromatophore von einem miniaturisierten Muskel umgeben und kann so entweder eine große Fläche einnehmen (platt gedrückt) und damit gut sichtbar sein oder eher eine längliche Form haben. Die Pigmente in den Chromatophoren werden beim Zusammenziehen des Muskels in Richtung der Hautoberfläche gedrückt und bilden die ausgedehnte Fläche. Die Pigmente dominieren damit den Farbeindruck der Hautoberfläche. Wenn in verschiedenen Hautschichten unterschiedlich gefärbte Chromatophore vorliegen lassen sich vielfältige Färbungen generieren. Dabei dient die Farbänderung nicht nur zur Tarnung, sondern auch im wesentlichen zur Kommunikation. Insbesondere Chamäleons, bei denen die schnelle Farbänderung ähnlich – aber mit vier verschiedenen Schichten sehr komplex – realisiert ist, verwenden den Effekt vor allem, um ihre Stimmung auszudrücken.

Die Umgebung von Atomen und Molekülen in Feststoffen und damit ihre Energieniveaus (und deshalb die Farbe) lässt sich bei einigen Materialien auch durch äußere Einwirkung verändern. Beim *Thermochroismus* führt eine Erhitzung zu einer thermischen Ausdehnung des Materials und hat damit eine Änderung der Energieniveaus für die Atome zur Folge. Die geänderten Energieniveaus führen dann zur Farbänderung.

Die Ausdehnung ist aber nicht die einzige Möglichkeit thermochroitischen Verhalten zu erzielen. Für viele Produkte werden entweder sogenannte *Leukofarbstoffe* oder *Flüssigkristalle* eingesetzt (siehe Abb. 3.6.28 und Abb. 3.6.29).

Am berühmtesten sind wahrscheinlich die sogenannten „*Mood-Rings*“ aus den 70er Jahren. Diese Ringe ändern die Farbe je nach Körpertemperatur des Ringträgers und sollen so die Stimmung anzeigen können. Basis hierfür sind

Chromatophore = Farbzellen mit Pigmenten, deren sichtbare Flächen sich über miniaturisierte Muskeln variieren lassen

das Chamäleon wechselt die Farbe nicht zur Tarnung sondern zur Kommunikation

Thermochroismus: Farbänderung durch Temperatur

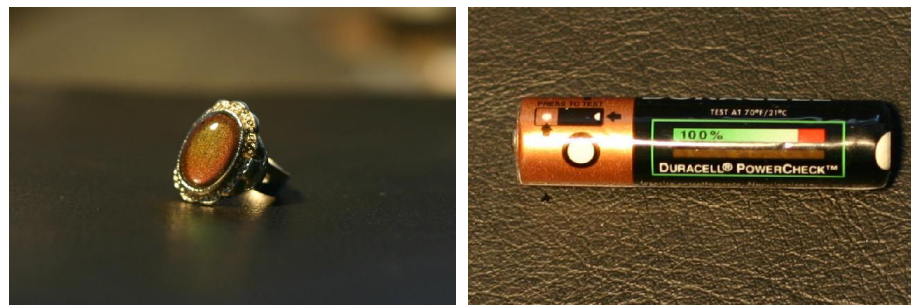
z.B. durch Ausdehnung, Flüssigkristallschichten (Interferenz) oder Leukofarbstoffe

Mood-Rings ändern ihre Farbe bei Temperaturänderung durch Beugung an Flüssigkristallschichten



(a) Mood-Ring (Interferenz an Flüssigkristallschichten)

(b) Mood-Ring, Temperatur 2



(c) Mood-Ring, Temperatur 3

(d) Batterietester (Phasenänderung in Leukofarbstoffen)

Abbildung 3.6.28: Änderung der Farbe bei Temperaturvariation (Thermochromismus). Farbtafel: 12.0.15

Flüssigkristalle. Letztlich bilden die eingesetzten Flüssigkristalle eine Schichtstruktur, die sich in Abhängigkeit der Temperatur ändert. An den Schichten erfolgt jeweils eine teilweise Reflexion. Die an verschiedenen Schichten reflektierten Lichtanteile überlagern sich dann – je nach Wellenlänge – destruktiv oder konstruktiv. Daher werden bestimmte Wellenlängen verstärkt und andere abgeschwächt. Es handelt sich also um eine Interferenzerscheinung ähnlich den Farbspielen auf einer mit Öl benetzten Wasseroberfläche oder einer Seifenblasenhaut (siehe Abschnitt 7.2).

Ganz anders funktioniert der Farbumschlag von Schwarz–Blau nach Rot beim Kochen von Hummer. In diesem Fall ergibt sich durch die Temperatur ein Aufbrechen eines Proteinkäfigs, in dem Farbpigmente gefangen sind. Ohne den Käfig ergibt sich eine Änderung der Energieniveaus der Farbpigmente und damit eine Farbänderung.⁴¹

Leukofarbstoffe haben, wenn sie kalt sind eine Eigenfarbe und verlieren diese, sobald sie (um mindestens 3 bis 6°) erwärmt werden. Natürlich kann man durch Kombination mit einem konventionellen Farbstoff auch einen Farbübergang zwischen zwei Farben bewerkstelligen. Die für den Farbwechsel notwendigen Substanzen werden üblicherweise in ca. 3 bis 5 μm große Mikrokapseln eingeschlossen. Letztlich führt die Temperaturänderung zu einer *Phasenänderung* der Substanz und damit zu einer Farbänderung (über eine Änderung des Absorptionsspektrums).⁴²

Leukofarbstoffe: Temperaturänderung führt zu Phasenänderung

⁴¹Journal of the American Chemical Society 127, S. 1438

⁴²Journal of Microencapsulation 22, S. 715 (2005)

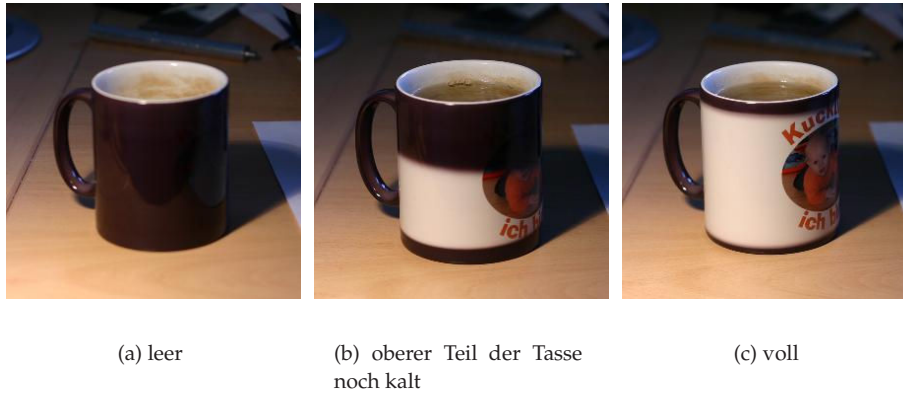


Abbildung 3.6.29: Thermochromismus: Eine Tasse beschichtet mit Leukofarbstoff

Die bekannten Einwegbatterien mit eingebauter *Ladezustandsanzeige* basieren ebenfalls auf diesen Leukofarbstoffen. Wenn die *Batterie* getestet wird, fließt ein Strom (über die Haut) durch die Farbschicht und führt zu einer Erwärmung (natürlich nur, wenn noch genügend Kapazität vorhanden ist). Dementsprechend findet ein Farbumschlag statt.

Aber auch einige natürliche Stoffe ändern ihre Farbe reversibel beim Erhitzen. Roter Rubin wird z.B. beim Erhitzen grün und reines Zinkoxid wechselt seine Farbe temperaturabhängig zwischen Weiß und Gelb.

Ganz ähnlich kann auch eine *Kompression* zur Farbänderung führen (*Piezochromismus*). Für *anisotrope Kristalle*, also Kristalle, deren Eigenschaften nicht in allen Richtungen des Raumes gleich sind, kann *Pleochromismus* auftreten. Die Farbe hängt dann von der Ausbreitungsrichtung des Lichts im Kristall ab.

Die sich selbst verdunkelnden Sonnenbrillen ändern ihr Farbverhalten aufgrund vom einfallendem ultravioletten Licht und werden daher *photochrom* bezeichnet (siehe Abb. 3.6.30). Hier ändert sich bei Bestrahlung die chemische Struktur des Farbstoffes. *Hydrochrome Stoffe* reagieren dagegen auf Wasser mit einer Farbänderung. Aber auch ein Farbumschlag durch ein elektrisches Feld kann realisiert werden (*Elektrochrome Filter*).⁴³

Piezochromismus: Farbänderung durch Druck

Photochromismus: Farbänderung bei (UV-)Lichteinfall

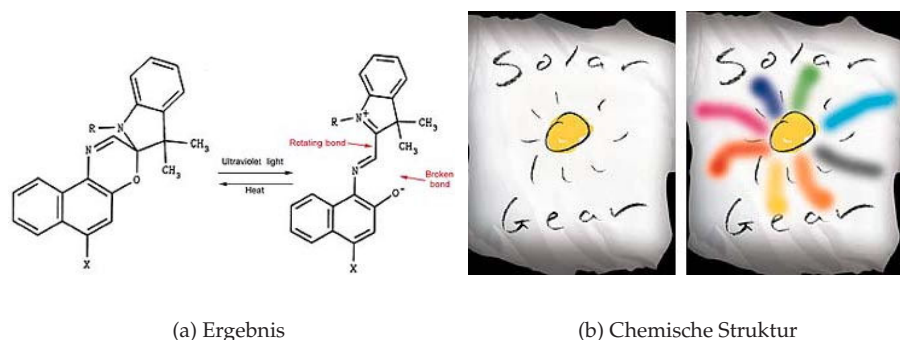


Abbildung 3.6.30: Photochromismus: T-Shirt mit Farbänderung bei Bestrahlung mit UV-Licht, Foto mit freundlicher Genehmigung der Color Change Corp., J. Homola, www.colorchange.com

⁴³Photonik / 2007, S. 76 folgend

3.7 Pulver, Schäume und Schnee

Absorption findet nicht an der Oberfläche, sondern im Volumen statt

Bei leitfähigen Stoffen ist die Eindringtiefe gering.

Leitfähige Stoffe behalten ihre Farbe auch als Stäube

Die meisten festen Stoffe absorbieren nicht direkt an der Oberfläche. Stattdessen dringt das Licht in das Material bis zu einer gewissen Tiefe ein und wird absorbiert oder gestreut. Lediglich bei *Metallen* und einigen anderen sehr intensiv gefärbten Substanzen (z.B. *Graphit*) ist die *Absorption* aufgrund der geringen Eindringtiefe (nm) ein reiner *Oberflächeneffekt*. Diese Stoffe behalten auch als Stäube ihre Farbe bei.



Abbildung 3.7.31: Schnee und Wolken sind weiß. Beim Schnee liegt die Ursache in der großen Anzahl an Reflexionen und der im Vergleich hierzu vernachlässigbaren Absorption. Bei den Wolken ergibt sich das Weiß durch Vielfachstreuungen (siehe Kapitel 4)



(a) Salzgewinnung auf Lanzarote



(b) Schaum

Abbildung 3.7.32: Salze, Schäume und Pulver sind aus dem selben Grund weiß wie der Schnee. Die Absorption ist gegenüber den vielen Reflexionen an den Grenzschichten vernachlässigbar.

Ansonsten gilt aber, dass die Absorption im Vergleich zu Oberflächeneffekten – und dabei ist die *Reflexion* der wichtigste – umso stärker in den Hintergrund tritt, je feiner sie pulverisiert sind. *Pulver, Schnee, Salze* und *Schäume* dieser Stoffe sind daher weiß, weil sie wenig Licht absorbieren und gleichzeitig viele Oberflächen aufweisen. Das an den Oberflächen reflektierte Licht wird in alle möglichen Richtungen abgelenkt. Das an einer Grenzfläche transmittierte Licht fällt irgendwann erneut auf eine Grenzfläche und hat so nochmals die Chance, reflektiert zu werden. Wesentlich ist also, dass die Stoffe eine hohe Transmission für breite Spektralbereiche haben. Dies ist bei Schäumen der Fall (z.B. weißer Schaum auf gelbem *Bier*), genauso bei Schneekristallen, Pulvern und Salz. Solange keine Absorption auftritt, muss alles Licht, das auf den Stoff fällt, diesen auch wieder verlassen. Das Material erscheint daher bei weißer Beleuchtung hellweiß. Auch Stoffe, die normalerweise absorbieren, erhalten als sehr feines Pulver einen weißlichen Anteil. Die Absorption tritt dann in den Hintergrund, weil jedes Pulverteilchen so dünn ist, dass keine nennenswerte Absorption auftritt. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Grenzflächen und damit die Anzahl der Reflexionen deutlich zu. Manchmal ergibt sich auch ein weniger ausgeprägtes Verhalten. So erhält man beim Zerreiben von tiefblauem Kupfersulfat ein helles Türkisblau als Mischung von insbesondere weißem (reflektiertem) Licht und der blauen Grundfarbe.

*Viele Oberflächen und dünne
Elemente → Reflexion
überwiegt Absorption
→ Schäume, Stäube, Pul-
ver, Salze, Schnee „sind weiß“*

Kapitel 4

Streuung



*“Every cloud has a silver lining.”
(Unbekannt)*

Streuung ist der Vorgang, bei dem Licht auf unterschiedliche Richtungen mehr oder weniger zufällig umverteilt wird. Sie tritt immer dann auf, wenn Licht auf sehr feine Strukturen trifft. Ein typisches Beispiel zeigt Abb. 4.0.1, die Streuung eines Lichtstrahls an einer optisch rauhen Oberfläche.¹ In der Abbildung ist die Umverteilung der Lichtrichtung von parallelem Licht durch Reflexion an der Oberfläche deutlich sichtbar. Es handelt sich hier um eine sehr einfache Näherung, die mit Vorsicht zu genießen ist, da bei diesen Dimensionen das Strahlenmodell des Lichts nicht mehr zuverlässig angewendet werden kann.

¹Eine Oberfläche ist dann optisch rau, wenn die Unebenheiten groß bzw. nennenswert im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts sind. „Nennenswert“ heißt hier, dass in etwa Höhendifferenzen von mindestens $\lambda/5$ im Mittel auftreten.

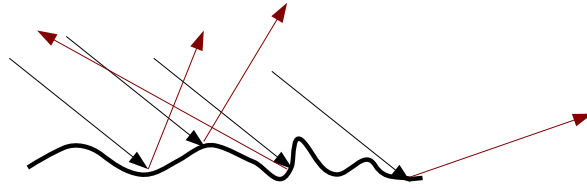


Abbildung 4.0.1: Geometrisch-optische Veranschaulichung der Streuung von Licht an einer rauhen Oberfläche.

Wenn die Mikrostruktur der Oberfläche nicht isotrop, d.h. nicht in alle Richtungen gleich ist, ist auch die Streuung an der Oberfläche für unterschiedliche Oberflächen unterschiedlich stark. So zeigt z.B. ein in einer Richtung bearbeitetes (z.B. geschliffenes) Werkstück eine besonders starke Streuung in einer Richtung senkrecht zur Bearbeitungsrichtung. Im mikroskopischen Modell nach Abb. 4.0.1 ist dies direkt einsichtig.

*Streuung findet an an
Mikrostrukturen statt*



(a) schräger Einfall



(b) nahezu senkrechter Einfall

Abbildung 4.0.2: Bei schrägem Einfall auf eine Grenzfläche wird viel Licht reflektiert. Die diffuse Streuung ist reduziert.

Abb. 4.0.2 zeigt, dass die Streuung ebenfalls vom Einfallswinkel des Lichts abhängt. Starke Streuung tritt dann auf, wenn die Rauheit der Oberfläche größer als die Lichtwellenlänge ist. Dabei ist allerdings die effektive Wellenlänge des Lichts entscheidend. Diese effektive Wellenlänge ergibt sich aus der Wellenlänge und der Projektion auf die Oberflächennormale $\cos \alpha$, also $\lambda' = \lambda / \cos \alpha$. Damit wird also für kleine Winkel zum Boden die Streuung gegenüber der Reflexion stark vermindert und man kann eine Spiegelung erkennen. Zusätzlich wird bei schrägem Einfall der Reflexionsgrad aufgrund der Fresnelgleichungen stark vergrößert (siehe Abschnitt 6.3). Dieser Effekt ist bei glatten Oberflächen, die an sich schon spiegeln (z.B. stilles Gewässer) ausschlaggebend.

Streuung tritt aber nicht nur an Oberflächen auf. Wenn wir einen Lichtstrahl in Luft „sehen“, dann sehen wir ihn nur dadurch, dass er an Teilchen in der Luft gestreut wird. Auch hier wird die Lichtrichtung bei der Streuung (z.B. an einem Luftmolekül) geändert, so dass ein Anteil des Lichts in Richtung des Auges des Beobachters abgelenkt wird.

4.1 Rayleigh–Streuung

Die Streuung an Teilchen mit einem Durchmesser kleiner der Wellenlänge des Lichts wird als *Rayleigh–Streuung* bezeichnet. Wesentliches Merkmal ist hier eine starke (proportional $1/\lambda^4$) Abhängigkeit der Streuwahrscheinlichkeit von der Wellenlänge.²

Die Rayleigh–Streuung erklärt unter anderem das Blau des Himmels. Luftmoleküle (insbesondere O_2 , CO_2 und N_2) sind deutlich kleiner als die Wellenlänge sichtbaren Lichts. Dementsprechend ergibt sich für sie eine stark wellenlängenabhängige Streuwahrscheinlichkeit. Blaues Licht wird deutlich (Faktor 3,2 bei 450 nm im Vergleich zu 600 nm) öfter gestreut als rotes Licht.

Wenn wir auf einen Bereich des Himmels schauen, der nicht in direkter Richtung zur Sonne liegt, können wir Sonnenlicht, das sich ja wie jedes Licht geradlinig ausbreitet, nur dann sehen, wenn es auf dem Weg von der Sonne kommend in der Erdatmosphäre gestreut wird (siehe Abbildung 4.1.3). Da nun das blaue Licht häufiger gestreut wird, kommt aus diesen Bereichen vorrangig blaues Licht in unsere Augen, der Himmel ist also blau. In großer Höhe, also z.B. auf einem hohen Berg, liegt zwischen uns und den Sternen wenig Luft. Die Streuung wird dadurch vermindert und der Himmel wirkt dadurch deutlich dunkelblauer als unter normalen Bedingungen. Auf dem Mond ist der Himmel schwarz, da keine Atmosphäre vorhanden ist. Es gibt keine Luftmoleküle, an denen das Sonnenlicht in Richtung eines Beobachters gestreut werden könnte.

Die Rayleigh–Streuung ist auch die Ursache für den roten Sonnenuntergang bzw. Aufgang. Wenn die Sonne sehr tief steht, läuft das von ihr ausgehende Licht durch erheblich mehr Atmosphäre als wenn die Sonne im Zenit steht (genauer, um den Faktor 38 mehr Atmosphäre, siehe Abb. 4.1.4 und 4.1.5). Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein blaues Photon auf seinem Weg durch die Atmosphäre *nicht* abgelenkt wird sehr klein. Die blauen Photonen werden also weggestreut und die Sonne erscheint rot (siehe Abb. 4.1.6).

Kleine Wassertröpfchen, Aerosole und Staub streuen das Licht des roten Sonnenuntergangs. Dadurch erscheint der gesamte Himmel rötlich (Abendrot bzw. Morgenrot). Natürlich gilt das im selben Maße auch für den Mond, so dass ein tiefstehender Mond ebenfalls deutlich rot erscheint.

Oft wird dieses Abendrot als Vorbote schlechten Wetters (Wolken) betrachtet, denn bei uns herrschen Westwinde vor. Wolken, die abends im Westen erscheinen, werden bei uns am nächsten Tag ankommen. Heutzutage – mit doch erheblicher Luftverschmutzung – kann die Streuung aber genauso an Aerosolen in der Luft stattfinden, so dass das Abendrot wenig als Wetterzeichen taugt.

Rayleigh–Streuung: Streuung an Teilchen kleiner der Lichtwellenlänge λ

Streuwahrscheinlichkeit $\sim 1/\lambda^4$

Rayleigh–Streuung \rightarrow blauer Himmel

roter Sonnenuntergang: blaues Licht wurde beim langen Weg durch die Atmosphäre weggestreut

²Eine genaue Analyse führt zu einer $\lambda^{4.08}$ Abhängigkeit, siehe M. Vollmer, „Lichtspiele in der Luft“, Spektrum Akademischer Verlag

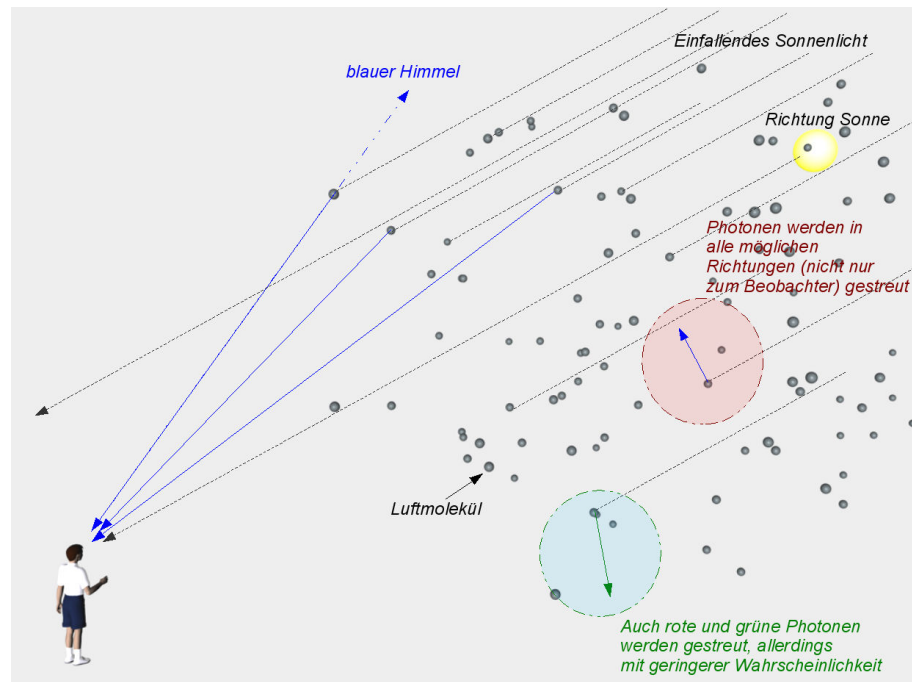


Abbildung 4.1.3: „Warum ist der Himmel blau?“: kurzwelliges Licht wird an den kleinen Luftmolekülen (Rayleigh Streuung) bevorzugt gestreut und kann daher in Richtung des Beobachters abgelenkt werden.

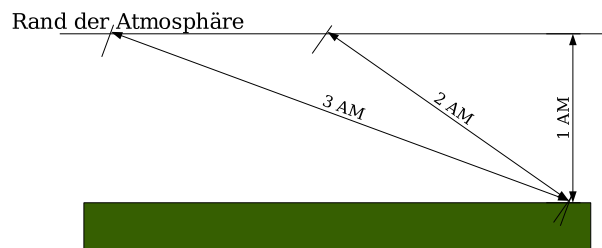


Abbildung 4.1.4: Die Luftmasse, die vom Licht der Sonne bis zum Beobachter durchlaufen werden muss, hängt stark von der (Winkel-)Position der Sonne ab (in erster Näherung über $\sec(\alpha)$).

Auch wenn die Sonne im Zenit steht, erscheint sie leicht rötlich (im Vergleich zu einer Sonne ohne Atmosphäre und Streuung). Da aber in diesem Fall eben nur eine geringe Luftmasse vom Licht durchlaufen wird, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Lichtteilchen weggestreut wird, vergleichsweise gering (0,1 für ein grünes Photon), so dass der Effekt mit bloßem Auge kaum sichtbar ist.

Wie kommt es nun aber überhaupt zur Rayleigh Streuung? Einfallendes Licht regt in den Molekülen der Luft einen Dipol an (Ladungstrennung durch das elektrische Feld) und dieser Dipol erfährt im elektromagnetischen Wechselfeld des Lichts eine Kraft und wird so schließlich zur Schwingung angeregt.

Eine exakte Ableitung der Rayleigh-Streuung soll hier nicht vorgenommen werden. Sie findet sich in den meisten Lehrbüchern der Elektrodynamik.³ Wir können aber den ursprünglichen Weg, den Lord Rayleigh 1871 eingeschlagen hat, nachvollziehen. Zur Ableitung des $1/\lambda^4$ -Gesetzes nutzte er die *Dimensionsanalyse*.

Dimensionsanalyse: Eine einfache Möglichkeit, Formeln zu erraten.

³z.B. M. Wagner: „Elemente der Theoretischen Physik 2“, Vieweg Verlag

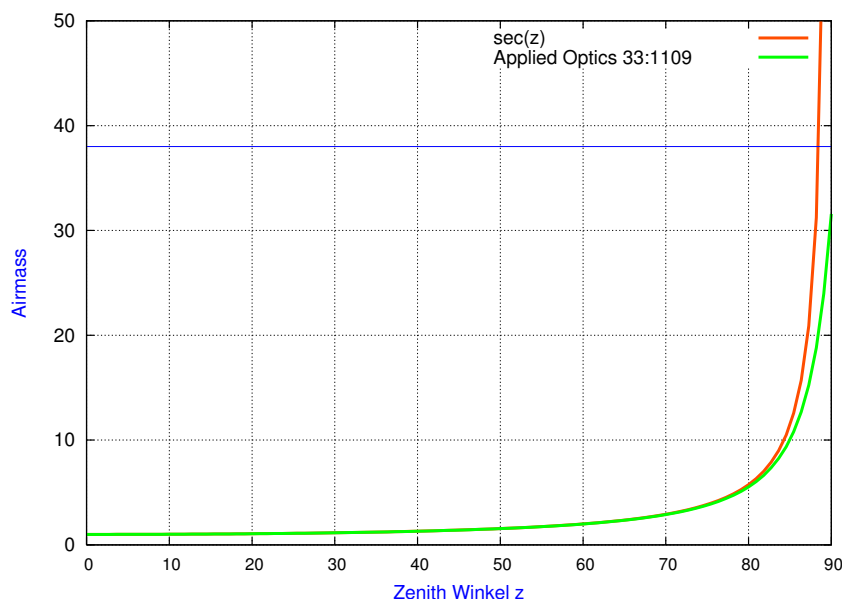


Abbildung 4.1.5: Die Luftmasse, die vom Licht der Sonne bis zum Beobachter durchlaufen werden muss, hängt stark von der (Winkel-)Position der Sonne ab. Wenn die Sonne im Zenit steht ($z=0$) wird von einer Luftmasse von „1“ ausgegangen. Steht die Sonne am Horizont ($z=90^\circ$), dann wird eine deutlich größere Luftmasse durchlaufen. Wenn man den gekrümmten Lichtweg beim Sonnenstand nahe des Horizonts in Betracht zieht, ergibt sich sogar nochmal ein leicht erhöhter Wert (38 am Horizont).

Wenn wir das elektrische Feld nach dem Streuvorgang mit E_s und das einfallende elektrische Feld mit E_i bezeichnen, so können wir anschaulich folgende Behauptungen aufstellen:

- E_s ist proportional E_i .
Dies ist im Photonenbild unmittelbar einsichtig: Wenn wir die Anzahl der einfallenden Photonen verdoppeln, so erwarten wir, dass sich auch die Anzahl der gestreuten Photonen verdoppelt.
- E_s ist proportional zu $1/r$ wenn r der Abstand vom Streuzentrum ist.
Dies ist eine direkte Folge der Energieerhaltung. Die Oberfläche einer Kugel mit Radius r wächst quadratisch mit r . Die Flächendichte der Energie des elektromagnetischen Feldes ist ebenfalls proportional $1/r^2$. Aus Gründen der Energieerhaltung muss durch die Kugeloberfläche unabhängig vom Kugelradius dieselbe Energie fließen.
- E_s ist proportional zum Streuvolumen V

Wir können also

$$E_s = k E_i \frac{1}{r} V \quad (4.1)$$

angeben.

Interessant ist nun die Konstante k , die alle noch nicht betrachteten Zusammenhänge beinhaltet. Zumindest die Dimension von k lässt sich einfach angeben, wenn man die Einheiten von Gleichung 4.1 betrachtet:

$$V/m = [k] V/m \cdot 1/m \cdot m^3 \quad (4.2)$$

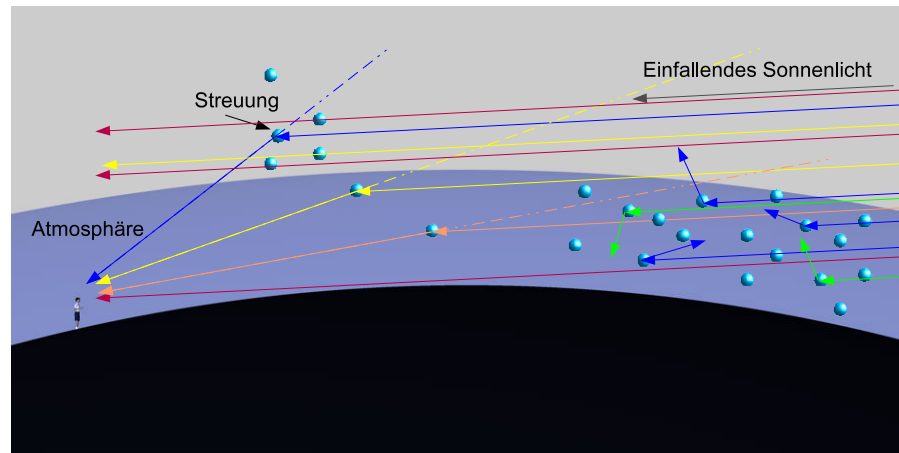


Abbildung 4.1.6: Prinzip Sonnenuntergang: Das Licht der untergehenden Sonne in Richtung des Sonnenuntergangs ist rötlich gefärbt. Kurzwellige Lichtanteile werden an den Luftmolekülen gemäß Rayleigh (weg-)gestreut und erreichen daher nicht das Auge des Beobachters. Das noch vorhandene langwellige Licht (rot) wird an weiteren Luftmolekülen oder Partikeln (z.B. Staub) oder Wolken gestreut und gelangt so ins Auge des Betrachters. Je tiefer die Sonne steht, desto größer ist das durchlaufene Luftvolumen. Dadurch wird kurzwelliges Licht mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Bahn gestreut, das verbleibende Licht erscheint rot. Der Himmel in Richtung Zenit bleibt blau (siehe Abb. 4.1.3)

Damit ergibt sich

$$[k] = \frac{1}{m^2} \quad (4.3)$$

Die Energie und damit die Lichtintensität ist proportional zu E^2 und damit auch zu k^2 . Die Einheit von k^2 ist $1/m^4$.

Nun kommt der entscheidende (und gewagte) Schritt: Wir identifizieren — rein aufgrund der Einheit — k^2 mit $1/\lambda^4$. Natürlich könnten auch andere Effekte, die letztlich eine Länge als Einheit haben in k^2 enthalten sein und daher muss eine durch die Dimensionsanalyse nahe gelegte Formel experimentell verifiziert werden. Es zeigt sich im Fall der Rayleigh Streuung aber in der Tat der erwartete Zusammenhang.

4.2 Weiteres zur Farbe des Himmels

Von hohen Bergen aus scheint das Himmelsblau besonders intensiv zu sein. Der Grund hierfür liegt in der geringen Menge an Luft (50% Luftmasse in 5,5 km Höhe). Dadurch ergibt sich weniger Streulicht und der Himmel wirkt dunkler.⁴ Der dunklere Himmel wird als intensiver gefärbt wahrgenommen.

Nachts ist im übrigen der Himmel nicht etwa schwarz sondern ebenfalls blau. Da der Mond direkt durch die Sonne beleuchtet wird und seine Reflektivität im sichtbaren Spektralbereich weitgehend unabhängig von der Wellenlänge ist, hat das Mondlicht dasselbe Spektrum wie die Sonne. Es wird – genau wie das Sonnenlicht – an den Molekülen der Erdatmosphäre gestreut. Das menschliche

⁴Ein bereits von Luis Trenker in „Sterne am Mittag“ beschriebener Effekt: Der Himmel wird immerhin so dunkel, dass man helle Sterne teilweise tagsüber sehen kann.

Sterne am Mittag: Himmelshelligkeit in großer Höhe sehr gering

Auge kann die Himmelsfarbe in diesem Fall nicht wahrnehmen, da die Lichtintensität zu gering⁵ ist als dass die Zapfen, die für das Farbsehen verantwortlich sind, aktiviert werden können.⁶ („Nachts sind alle Katzen grau.“)

Wie bereits erwähnt ist der Himmel auf dem Mond aufgrund der fehlenden Atmosphäre schwarz. Wie sieht es aber auf dem Mars aus? Die von NASA und ESA gezeigten Marsbilder zeigen meist einen rötlichen Himmel obwohl doch auf dem Mars die physikalischen Gesetze dieselben sind und daher dort die Rayleigh Streuung an den Molekülen der Marsatmosphäre ebenfalls zu einem blauen Himmel führen sollte (siehe Abb. 4.2.7). Der Grund für den Unterschied ist in der Absorption zu suchen. Bis ca. 10 km Höhe in der Marsatmosphäre gibt es vergleichsweise viele Eisenoxid Partikel (ca. 400 nm bis mehrere 10 μm groß), die durch Absorption zu einer rötlichen Färbung („Rost“) führen⁷ (siehe Abb. 4.2.7). Wenn wir durch ein Teleskop den Mars betrachten erscheint uns der Planet eher rot-orange-farben. Während wir direkt auf dem Mars stehend eher einen orange-bräunlichen Eindruck haben würden. Der Unterschied liegt hier wieder in der menschlichen Farbwahrnehmung begründet, denn die Umgebung übt aufgrund des automatischen Farbabgleichs (vgl. Abschnitt 3.5) einen erheblichen Einfluss auf unsere subjektive Wahrnehmung aus. Und diese Umgebung ist beim Blick durchs Teleskop (kleiner Planet vor riesigem schwarzen Hintergrund) natürlich stark geändert.

Himmel auf dem Mars: Streuung, aber auch Absorption an Eisenoxid → rot/braun

Am Himmel lässt sich kurz nach der Abenddämmerung bzw. kurz vor der Morgendämmerung ein weiteres Streuphänomen ausmachen. Nahe des Horizonts kann man bei günstigen Beobachtungsbedingungen einen leichten Schleier sehen, das sogenannte *Zodiaklicht*. Ursache hierfür ist die Streuung des Sonnenlichts an interplanetarem Staub, der sich vor allem in der Ekliptik befindet⁸.

Der Himmel nimmt während der Dämmerung⁹ teilweise sehr interessante Farben an. Es ergibt sich ein Farbübergang von Rot über Orange von Gelb nach Blau. Der Grund hierfür ist in der Streuung des Lichts an Luftmolekülen, Partikeln und Aerosolen¹⁰ zu sehen. Dabei sind Überlagerungen von verschiedenen Streuungen von Bedeutung. Teilweise (aber eher selten) kann auch ein grünlicher oder türkiser Streifen beobachtet werden.

⁵ca. um den Faktor 10 Millionen geringer als die Intensität der Sonne

⁶Einige nachtaktive Tiere, z.B. Motten und Geckos, erhalten sich auch nachts ein gewisses Farbsehen.

⁷Vom All betrachtet sieht man weiter außen liegende Teile der Marsatmosphäre. Diese streuen wie erwartet vor allem blaues Licht in Richtung Beobachter.

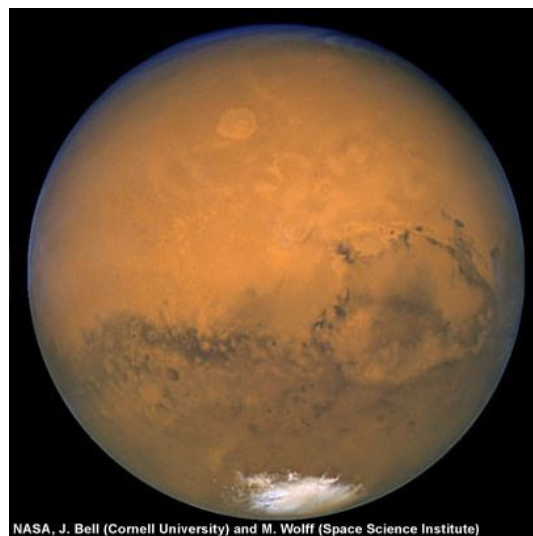
⁸Details siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Zodiaklicht>

⁹Von „bürgerlicher Dämmerung“ wird gesprochen, wenn nicht mehr im Freien gelesen werden kann während die „astronomische Dämmerung“ vergleichsweise scharf dadurch definiert ist, dass man Sterne bis zur 5. Größe mit bloßem Auge wahrnehmen kann. Dies ist der Fall, wenn die Sonne bereits 17° unter dem Horizont steht.

¹⁰Aerosole haben ihren Ursprung in Verbrennung, Meersalz und der Erosion von Boden. Die meisten Aerosole haben bodennah einen Durchmesser von weniger als 10 μm , wobei Pollen bis zu 100 μm groß werden. Die Aerosoldichte schwankt von ca. 600 Teilchen pro cm^3 (Antarktis) bis zu 10⁶ pro cm^3 (Waldbrände).



(a) Der Himmel ist auf vielen Aufnahmen rot bzw. bräunlich



(b) Aus dem Weltall sieht man die äußeren blauen
Atmosphärenbereiche

*Abbildung 4.2.7: Ist der Himmel auf dem Mars rot? Rayleigh-Streuung ist auch auf dem Mars vorhanden, die Absorption (Eisenoxid) dominiert aber oft die Gesamtfarbe.
Fotos: NASA. Farbtafel: 12.0.16*

Entgegen der Sonne sieht man beim Sonnenuntergang (oder -aufgang) zunächst den Schatten der Erde selbst als dunkles Band (siehe Abb. 4.2.8). Damit der Schatten sichtbar wird, muss er auf etwas – in der Regel einen Berg oder die Atmosphäre – fallen. Wenn ein Schatten bereits vor dem eigentlichen Sonnenuntergang gesehen wird, handelt es sich nicht um den Schatten der Erde, sondern den Schatten der Erdatmosphäre.

Beim Sonnenuntergang und Sonnenaufgang kann man den Schatten der Erde sehen



Abbildung 4.2.8: Erdschatten in Richtung der Gegendämmerung. Der Schatten der Erde wird sichtbar, sobald die Sonne unterhalb des Horizonts liegt. Foto mit freundlicher Genehmigung von Marko Riikonen, www.ursa.fi/riikonen/. Farbtafel: 12.0.17



Abbildung 4.2.9: Venusgürtel: Ein rosa/violettes Band in Richtung der Gegendämmerung wird beim Sonnenuntergang sichtbar. Es handelt sich um eine Überlagerung von roten (Sonnenuntergang) gestreuten Photonen und doppelt-gestreuten blauen Photonen aus höheren Luftschichten. Foto mit freundlicher Genehmigung von Christine Churchill. Farbtafel: 12.0.18

In entgegengesetzter Richtung zur Sonne ist der Venusgürtel sichtbar

Die Farbe des Himmels in Richtung der *Gegendämmerung* ist durch einen rosa-violetten Streifen gekennzeichnet. Man spricht vom sogenannten *Venusgürtel* (siehe Abb. 4.2.9). Die Färbung ergibt sich aufgrund der Überlagerung von zwei Lichtanteilen. Zum einen tritt eine starke Rückstreuung des roten Lichts des Sonnenuntergangs auf. Zum anderen ist ein blauer Lichtanteil vorhanden. Dieser kommt dadurch zustande, dass von horizontfernen Himmelsbereichen gestreutes Licht ein zweites Mal gestreut wird und so ebenfalls aus Richtung des Horizonts den Beobachter trifft. Dieses Lichts ist aufgrund der Rayleigh-Streuung bevorzugt blau. Somit ergibt sich also nahe des Horizonts eine Überlagerung von blauem und rotem Licht, also eine violette Himmelsfärbung. Am besten ist der Effekt bei klarer Luft (weite Sicht) und aus großer Höhe (Berg) sichtbar.

Purpurlicht: Überlagerung von doppelt gestreuten blauen Photonen und einfach gestreuten roten Photonen

besonders intensiv in Großstadtnähe oder bei Bränden/Vulkanausbrüchen

In ganz ähnlicher Weise kommt es zum *Purpurlicht*. Hier sieht man eine purpurne, violette Färbung in Richtung der Sonne (siehe Abb. 4.2.11). Wieder ergibt sich eine Überlagerung von blauen Photonen aus oberen Atmosphärenschichten (Rayleigh-Streuung an Luftmolekülen) und roten Photonen aus tieferen Bereichen. Die Photonen aus tieferen Bereichen sind rot, weil sie eine große Luftmasse durchlaufen haben. Sie wurden an Staub in der Atmosphäre letztlich in Richtung Beobachter gestreut (Mie-Streuung) (siehe Abb. 4.2.10). Die Purpurfärbung ist damit vor allem dann sichtbar, wenn viel Staub in der Atmosphäre vorhanden ist. Dies ist insbesondere nach Vulkanausbrüchen und Waldbränden und in Großstadtnähe der Fall.

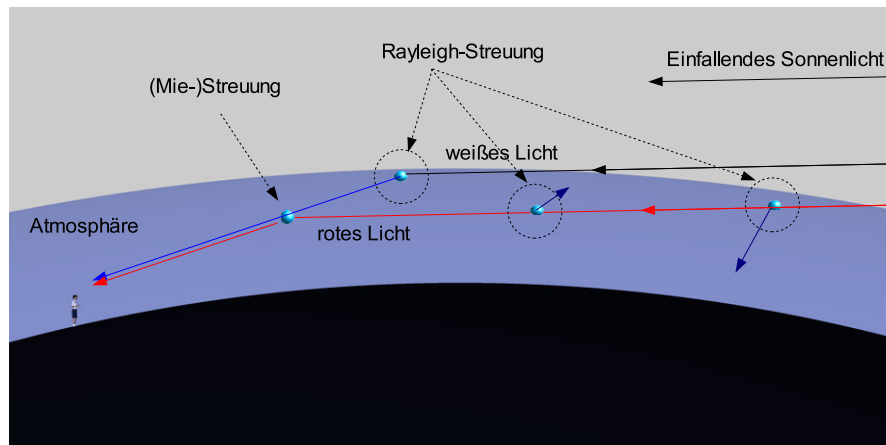


Abbildung 4.2.10: Prinzip des Entstehens von Purpurlicht: Auch hier kommt die violette Färbung durch Überlagerung von doppelt gestreuten blauen (Rayleigh) Photonen aus hohen Luftschichten und den an großen Partikeln (Mie) gestreuten roten Photonen der tiefstehenden Sonne zustande.



Abbildung 4.2.11: Purpurlicht: Überlagerung von mehrfach gestreutem blauen Licht und den roten Photonen des Sonnenauf/untergangs. Der Effekt ist besonders stark sichtbar, wenn (Großstadtnähe) viele stark streuende große Partikel in der Luft vorhanden sind. Farbtafel: 12.0.19

Das *Alpenglühen* ist einfach reflektiertes Licht des Sonnenuntergangs (siehe Abb. 4.2.12). Wenn dieses Licht auf (am besten durch Regen befeuchtete) Berge fällt, dann erscheint der Berg durch die Reflexion in ein rotes, purpurnes Licht getaucht.

Alpenglühen: Reflexion des roten Lichts des Sonnenuntergangs



Abbildung 4.2.12: Alpenglühen: Das rote Licht des Sonnenuntergangs wird an weit entfernten Bergen reflektiert. Foto mit freundlicher Genehmigung von Michael Kunze, www.michaelkunze.de . Farbtafel: 12.0.20

4.3 Airlight

blaue Berge: Airlight aufgrund von (trockener) Luft zwischen Beobachter und den Bergen

Airlight ist besonders stark in Großstadtnähe und bei Dunst

wegen der Streuung können wir nicht unendlich weit sehen

über Meer: intensive Sonnenuntergänge und weite Sicht

Purple Mountains: Mischung von rotem Licht mit blauem Airlight

Blaue Augen durch Rayleigh-Streuung

Berge in großer Entfernung erscheinen oft leicht bläulich. Berühmt sind z.B. die „Blue Ridge Mountains“ in Virginia, aber der Effekt lässt sich auch bei anderen Gebirgen gut beobachten. Auch hier ist die Ursache in der Rayleigh-Streuung zu sehen. Die Luftmasse zwischen dem Beobachter und den Bergen wird von direktem Sonnenlicht bestrahlt. Es ergibt sich Rayleigh-Streuung, d.h. es wird bevorzugt blaues Licht in Richtung des Beobachters gestreut. Dadurch erscheinen die Berge im Hintergrund leicht bläulich. Wenn in der Luft vor allem größere Partikel dominieren – dies ist z.B. bei Luftverunreinigungen in Großstadtnähe und bei Dunst der Fall – entfällt die Wellenlängenabhängigkeit der Streuung und die Berge erscheinen eher gräulich bzw. mit vermindertem Kontrast.¹¹ Die Überlagerung von Streulicht mit dem eigentlichen vom Objekt ausgehenden Licht nennt man *Airlight* oder *Path radiance*. Es kann dazu führen, dass tagsüber die Sicht weniger weit reicht als bei Dämmerung. Bei Dämmerung fehlt das Airlight. Daher ist der Kontrast vergleichsweise gut und Sie können auch weit entfernte Objekte noch sehen.

Die Kontrastminderung durch Streuung ist auch letztlich der Grund, warum wir nicht beliebig weit sehen können. Ein menschlicher Beobachter ist noch in der Lage, einen Kontrastunterschied zwischen Hintergrund und Objekt von 2% noch zu erkennen.¹² In der Praxis ergibt sich aufgrund der Streuung an den Luftmolekülen in der Erdatmosphäre damit eine Begrenzung auf ca. 330 km.¹³

Das Airlight ist auch die Ursache dafür, dass der Himmel manchmal eher milchig-blau und manchmal sehr intensiv blau ist. Bei Dunst ist dem blauen Himmel weißes Airlight überlagert. Über dem Meer ist der Himmel oft besonders intensiv blau, da die Luftmasse über dem Meer mit weniger Staub belastet ist. Andererseits sind Sonnenuntergänge über dem Meer ebenfalls besonders intensiv rot, da in unteren Luftschichten direkt über dem Meer die Luft mit vielen Salzpartikeln durchsetzt ist. Dadurch ergibt sich starke Rayleigh-Streuung. Die Absorption von kurzwelligem Licht durch Wasserdampf und Ozon verstärkt den Effekt. Ebenfalls schöne Sonnenuntergänge lassen sich nach Vulkanausbrüchen beobachten, da auch hier sehr viele Streuer (die meisten Partikel haben einen Durchmesser von ca. 10 nm) in der Luft sind.

Das Licht weit entfernter Berge wird natürlich – genau wie das Licht beim Sonnenuntergang – rot gefärbt. Allerdings wird dadurch die Helligkeit für den Beobachter reduziert. Ein violetter Farbeindruck („purple mountain“) kann sich ergeben, wenn sich dieses rote Licht mit dem blauen Airlight mischt.

4.4 Wo Rayleigh-Streuung noch auftritt

Die Rayleigh-Streuung ist nicht nur für die Himmelsfärbung ausschlaggebend. Sie ist ebenfalls für viele Farbtöne bei Tieren verantwortlich (siehe Abb. 4.4.13). Z.B. kommt das Blau der *blauen Augen* durch die Rayleigh Streuung zustande. Babys haben zunächst – unabhängig von der späteren Augenfarbe – blaue Augen. Später, im Lauf der ersten Lebensmonate bilden sich die Pigmente, die

¹¹Der Dunst in Großstadtnähe hat allerdings oft einen bräunlichen Charakter. Ursache hierfür ist die zusätzliche Absorption durch Stickstoffdioxid.

¹²Peter Pesic, Eur. J. Physics 26, S. 183-187, 2005

¹³Bohren et al. Am. J. Physics 54, S. 222-7

dann die spätere Augenfarbe bestimmen. Wenn keine Pigmente dazukommen, dann bleiben die Augen blau¹⁴. Bei gelben Pigmenten ergibt sich durch subtraktive Farbmischung mit dem Blau der Streuung letztlich ein Grünton. Dunkle Pigmente führen zu braunen oder schwarzen Augen. Und wenn Sie sehr alt werden, dann kann die fortwährende Bleichung der Pigmente dazu führen, dass Sie wieder (wie als Baby) blaue Augen bekommen.

Bei Albinos fehlen die Pigmente komplett.¹⁵ Damit folgt dann eine additive Überlagerung des Blau aufgrund der Streuung mit dem Rot der durchbluteten Netzhaut und damit dann ein Blau-Rosa als Augenfarbe. Aus der Funktion der Pigmente, nämlich der Reduzierung des einfallenden Lichts, ergibt sich auch, dass Menschen aus Gebieten mit hoher Sonneneinstrahlung eher dunklere Augen haben.



Abbildung 4.4.13: Blautöne im Tierreich werden in der Regel über Streuung (hier im Falle dieses Papagais) oder per Interferenz/Beugung realisiert.

Die rosige Hautfarbe von hellhäutigen Menschen kommt ebenfalls durch eine additive Farbmischung und Streuung zustande: Ein Teil des Lichts wird direkt an der Hautoberfläche diffus reflektiert (weiß). Ein weiterer Lichtanteil dringt in obere Hautschichten ein und wird dort gemäß Rayleigh gestreut (blau). Schließlich ergibt sich noch (Absorption) ein Anteil roten Lichts durch die Durchblutung der Haut. Wenn es sehr kalt wird und sich die Blutgefäße der Haut immer mehr zusammenziehen fehlt dieser rote Anteil. In diesem Fall bekommt die Haut eine bläulich-weiße Färbung.¹⁶ Umgekehrt ergibt sich bei einer sehr starken Durchblutung, wie sie z.B. bei starker körperlicher Anstrengung notwendig (Abtransport von Hitze) ist, eine stark rötliche Hautfarbe.

Deutlich sichtbar ist die Rayleigh-Streuung auch bei Rauch. Rauch, der aus nicht zu großen Partikeln besteht und der nicht zu dicht ist, erscheint leicht

¹⁴Für Babys mit schwarzer Hautfarbe gilt dies allerdings nicht. Hier sind die Augen in der Regel bereits bei Geburt braun.

¹⁵Daher sind oft Sonnenbrillen notwendig, um den Lichteinfall ins Auge zu reduzieren.

¹⁶Allerdings führt Sauerstoff-ungesättigtes Blut ebenfalls zu einer bläulichen Färbung, so dass im Falle von verbleibendem, verbrauchtem Blut auch ein Teil der Färbung auf diesen Effekt zurückzuführen ist.

Grüne Augen

Bei Albinos fehlen alle Pigmente

Hautfarbe: Überlagerung von blau-weißlichen Licht (Streuung) und rotem Licht (Absorption durch Blut)



(a) Rauch (Ziegen nicht beachten!)

(b) Blaue Augen, Foto mit freundlicher Genehmigung von Mark Kochanowicz (©2005)

Abbildung 4.4.14: Beispiele für Rayleigh Streuung. Farbtafel: 12.0.21

blauer Dunst: Kleine Rauchpartikel führen zu Rayleigh-Streuung

bläulich. Wenn man durch den Rauch in Richtung einer weißen Lichtquelle blickt, ergibt sich dagegen wie beim Sonnenuntergang eine Rotfärbung. Besonders deutlich ist der Effekt beim Zigarettenrauch, dem „blauen Dunst“. Wenn der Zigarettenrauch allerdings aus der Lunge ausgeatmet wird, ergeben sich kleine Wassertröpfchen da in der feuchten Lunge der Wasserdampf an den Rauchpartikeln kondensiert. Entsprechend enthält die ausgeatmete Luft Mie-Streuer und damit streut der ausgeatmete Rauch wellenlängenunabhängig, also weiß (vgl. Abschnitt 4.5). Neben der Bedeutung für Färbungen in der Natur wird die Rayleigh Streuung auch zur technischen Messung von Gasen eingesetzt.¹⁷

4.5 Mie-Streuung

Wenn die Streupartikel größer als die Wellenlänge sind¹⁸, ändert sich das Streuverhalten. Man spricht von *Mie-Streuung*. In diesem Fall entfällt die Wellenlängenabhängigkeit der Streuwahrscheinlichkeit. Darüber hinaus ändert sich die räumliche Streuerverteilung. Während bei der Rayleigh-Streuung die Streucharakteristik annähernd isotrop (also winkelunabhängig) ist, zeigt sich bei der Mie-Streuung eine deutliche Bevorzugung der Vorwärtsrichtung, also der Richtung der einfallenden Photonen. Sie können diesen Effekt in Großstadtnähe (viele große Schmutzpartikel) deutlich beim Sonnenaufgang bewundern: In Richtung der Sonne, aber in genügend großem Winkelab-

Mie-Streuung für Partikel > Wellenlänge λ

Streuwahrscheinlichkeit ist unabhängig von der Wellenlänge

starke Vorwärtsstreuung

¹⁷z.B. Miles et al., Meas. Sci. Technol. 12, R33, 2001.

¹⁸Ab welcher Größe und bis zu welcher Größe von Partikeln das Mie-Modell sinnvoll ist, hängt von mehreren Faktoren, insbesondere auch der Partikelgeometrie und der konkreten Aufgabenstellung.

stand zu ihr, ergibt sich eine massive Aufhellung durch die bevorzugte Vorwärtsstreuung.

Der Effekt ist ebenfalls sehr gut bei der Streuung an einer dreckigen oder beschlagenen Windschutzscheibe beim Autofahren zu beobachten: Bei der Fahrt in Richtung der Sonne führt die starke Vorwärtsstreuung zu einer sehr schlechten Sicht. Wenn die Fahrt entgegen der Sonne erfolgt, ist der Streulichtanteil deutlich reduziert und die Sicht ist entsprechend viel besser. Bei stark unsymmetrischen Streupartikeln ergibt sich im übrigen oft eine stark irreguläre Streucharakteristik.

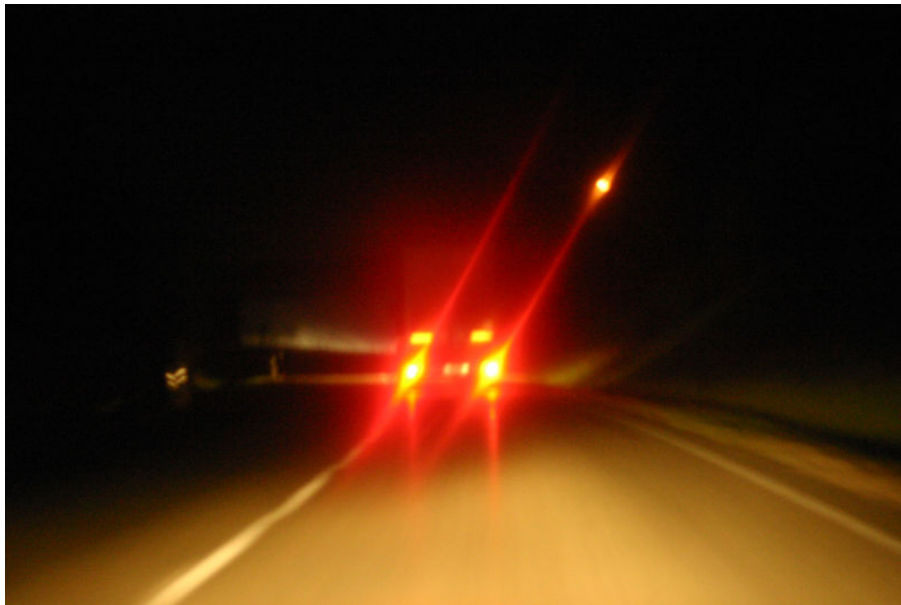


Abbildung 4.5.15: Die Streuung an den durch den Scheibenwischer verursachten Rillen führen zu einer Streuung senkrecht zur Rillenrichtung.

Obwohl in einem Wassertropfen viele Wassermoleküle vorhanden sind, führt die Streuung an den Milliarden von Wassermolekülen innerhalb des Tropfens zu einem anderen Verhalten als die Streuung an einzelnen, getrennten Wassermolekülen. So ist auch die Streuwirkung pro Molekül im Tropfen deutlich verstärkt. Dieselbe Menge an Wassermolekülen führt daher in Wolken oder im Nebel zu einer extrem reduzierten Sicht, während sie im unkondensierten Fall (Wasserdampf) die Sicht nur gering behindert.

4.6 Mehrfachstreuung

Betrachten Sie die Farb- und Helligkeitsverteilung des Himmels (siehe z.B. Abb. 4.6.16). Am Horizont (bzw. ab ca. 5°) ist der Himmel deutlich weniger blau als am Zenit.

Letztlich ist für die mangelnde Farbe des Horizonts wieder die vergrößerte (Faktor 38) Streumasse, die ein Photon vom Horizont aus zu unserem Auge durchqueren muss, verantwortlich. Die vielen Streukörper entlang des Weges führen dazu, dass praktisch jedes Photon mindestens einmal gestreut wird. Damit geht die Wellenlängenabhängigkeit verloren (siehe Abb. 4.6.17). Die blauen Photonen werden zwar öfter gestreut, d.h. aus ihrer Bahn abgelenkt,

der Himmel ist am Horizont weiß

Grund: Mehrfachstreuung



Abbildung 4.6.16: Warum ist der Himmel am Horizont weiß? Die Vielfachstreuung dominiert, so dass praktisch jedes Photon – unabhängig von seiner Wellenlänge – gestreut wird. Foto mit freundlicher Genehmigung von Alexander Sohmer.

die Wahrscheinlichkeit, dass die letztliche Richtung aber hin zum Beobachter erfolgt, ist nicht größer wie bei einer einzelnen Streuung.

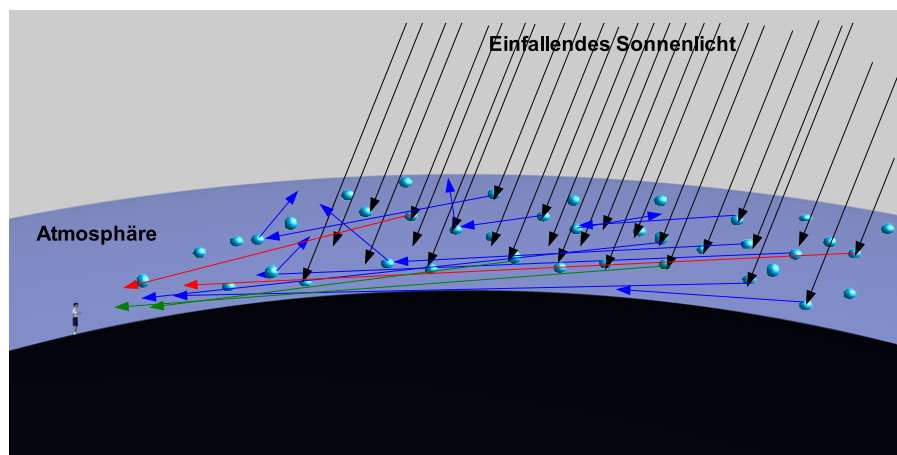


Abbildung 4.6.17: Warum ist der Himmel am Horizont weiß? Die Luftmasse in Richtung des Horizonts ist ca. 38 mal größer als in Richtung des Zenits. Daher dominiert die Vielfachstreuung und praktisch jedes Photon wird – unabhängig von seiner Wellenlänge – mindestens einmal gestreut. Blaue Photonen werden zwar zunächst öfter in Richtung des Beobachters gestreut, die Wahrscheinlichkeit, dass sie aus dieser Richtung wieder weggestreut werden, ist aber ebenfalls (um denselben Faktor) erhöht.

Man könnte nun auch denken, dass die viele Streuung ja stört. Solange aber kaum bzw. keine Absorption im Spiel ist, geht kein Licht wirklich verloren. Der Horizont erscheint also weiß. Aus demselben Grund sind auch Wolken weiß. Auch dort ergibt sich Mehrfachstreuung und dadurch eine

Wolken sind weiß aufgrund der Mehrfachstreuung

wellenlängenunabhängige Streuung.¹⁹ Letztlich ist die Wolke weiß, weil es keine Absorption in der Wolke gibt. Im übrigen wird die Mehrfachsstreuung auch in der Tierwelt eingesetzt, um Weiß zu erzielen. Ein spezieller, auf weißen Pilzen lebender, Käfer (*Cyphochilus*) nutzt die Vielfachsstreuung, um auf kleinsten Dimensionen ein strahlendes Weiß zu realisieren.

Ein weiterer Effekt, der zum weißen Horizont führt, ist die wellenlängenunabhängige Streuung an großen Partikeln (vor allem Dunst und Staub). Nach starkem Regen sind die großen Partikel reduziert und der Effekt des „weißen Horizonts“ ist dann ebenfalls vermindert.



Abbildung 4.6.18: Wolken sind weiß aufgrund der Vielfachstreuung. Der gesamte auf die Wolke treffende Strahlungsfluss muss die Wolke wieder verlassen da praktisch keine Absorption auftritt.

Abb. 4.6.19 zeigt ein interessantes scheinbares Paradoxon: In der Originalszene ist der Horizont wieder wie zu erwarten weiß. Die reflektierte Szene zeigt allerdings diese Aufhellung nicht. Reflektionen an Wasseroberflächen sind aber farbunabhängig und ändern weder die Farbsättigung noch die relative Szenenhelligkeit (vgl. die Reflexion der Sterne). Der Grund für die Diskrepanz von Szene und gespiegelter Szene ist darin zu sehen, dass der scheinbar gespiegelte Horizont eben nicht wirklich zu einem Teil des Himmels nahe des Horizonts korrespondiert. Vielmehr muss bei der Spiegelung beachtet werden, dass Objekte, die im Bild benachbart sind (Berg und scheinbarer Horizont) nicht zwangsläufig auch im dreidimensionalen Raum benachbart sind (siehe Abb. 4.6.20).

¹⁹Teilweise wird als Grund auch angegeben, dass die streuenden Teilchen in Wolken, nämlich Wassertropfen, Mie-Streuer sind und dadurch die wellenlängenunabhängige „weiße“ Streuung herrührt. Dass die Tröpfchen Mie-Streuer sind (Größe in Wolken ca. 2 bis 100 μm) ist korrekt, allerdings würde eben auch bei Rayleigh-Streuer die Wolke weiß erscheinen.

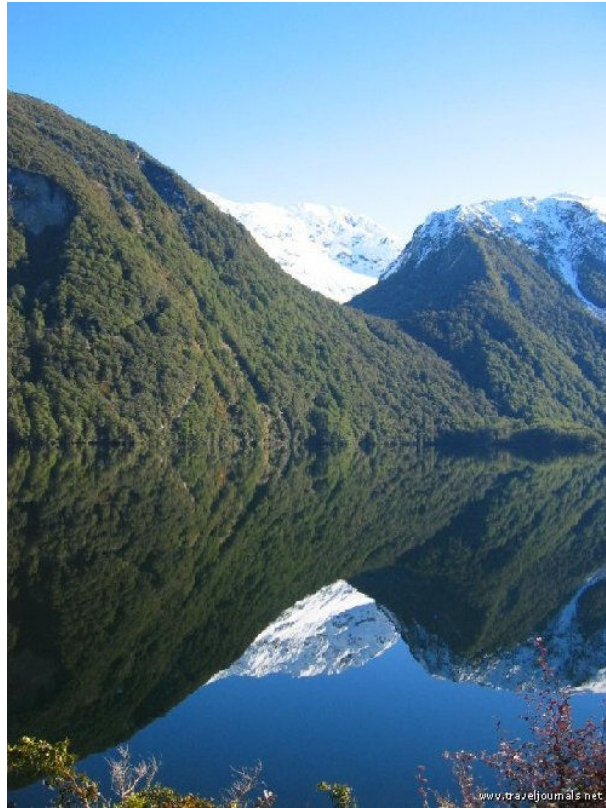


Abbildung 4.6.19: Der Himmel am Horizont ist in der Reflexion nicht hell (siehe auch Abb. 4.6.20), Foto mit freundlicher Genehmigung von Gemma Daniel, www.traveljournals.net.

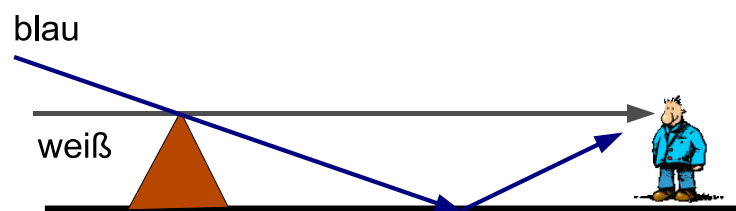


Abbildung 4.6.20: Der Himmel am Horizont ist in der Reflexion nicht hell. Die Ursache für dieses scheinbare Paradox liegt darin, dass das scheinbar vom Horizont kommende Licht in der reflektierten Szene von einem Bereich oberhalb des Horizonts kommt.

Zur Wolken- oder Taubildung kommt es, wenn bei einer relativen Luftfeuchtigkeit²⁰ von 100 % die Temperatur weiter gesenkt wird. Es setzt dann Kondensation (an Ionen oder Aerosolen²¹) ein und es bilden sich kleine Wassertröpfchen. In der Atmosphäre liegt Wasser, also im allgemeinen sowohl molekular als Wasserdampf als auch in kondensierter Form (Wassertropfen) vor. Im Gegensatz zu gewöhnlichen, weißen *Wolken* sind „mächtige“ Wolken dunkel bzw. schwarz da das Licht nicht durch die dicke, absorbierende Schicht dringt.²²

Bei Dunst, Nebel und den Wassertropfen in Wolken²³ ergibt sich eine Kondensation (vor allem an winzigen Salz-Kondensationskeimen oder Aerosolen) des Wassers in der Luft. Die Tröpfchen haben dann meist einen Durchmesser zwischen 10 und 20 μm . Von *Dunst* spricht man, wenn die Sichtweite größer 1 km ist. Bei geringeren Sichtweiten spricht man von *Nebel*. Wenn der Dunst eher aus trockener Luft besteht, sind die Wassertröpfchen sehr klein (ca. 100 nm) und es dominiert die Rayleigh-Streuung. In diesem Fall ergibt sich also eine Blaufärbung der Luft. Bei feuchter Luft ist dagegen eine gräulich-weiße Sichtbehinderung gegeben, da die Mie-Streuung dominiert.

Die Sichtweite in Nebel oder Dunst hängt exponentiell von der Wasserkonzentration in der Luft ab. D.h. eine extreme Fernsicht ist dann vorhanden, wenn die Luft sehr trocken und sauber ist. Landschaftsaufnahmen können Sie beim Fotografieren mittels eines UV-Filters kontrastreicher gestalten. Das UV-Licht wird am Dunst stark gestreut. Es ergibt sich also viel Airlight welches durch den Filter geblockt wird.

Dass Wolken mit einem hohen Wassergehalt und viel Volumen dunkel erscheinen liegt einfach daran, dass die Wolken von oben beleuchtet werden und die Streuung so stark ist, dass nur ein kleiner Teil des Lichts bis zur Unterseite der Wolke gelangt. Beachten Sie aber, dass andererseits auch beschattete (durch andere Wolken) Wolken schwarz erscheinen und sehr dünne Wolken ebenfalls dunkler sind (weil die Streuung bei diesen Wolken zu gering ist).

Bei schweren *Unwettern*, z.B. bei *Hagel*, und tiefstehender Sonne kommt es teilweise zu einer unnatürlich wirkenden gelben oder gelbgrünen Färbung des Himmels. Die Ursache hierfür ist nicht vollständig geklärt. Eine Vermutung ist, dass von dem durch den Sonnenuntergang rot gefärbten Licht der langwellige (rot) Teil des Spektrums durch das viele Wasser (bzw. Eis) in der Wolke absorbiert wird. Es verbleiben also mittlere Spektralbereiche (Gelb und Grün).²⁴

Unabhängig von dieser eher seltenen Gelbfärbung erscheinen Wolken dann farbig, wenn sie von farbigem Licht beleuchtet werden (Sonnenuntergang)²⁵, die Himmelsfarbe durchscheint (bläulich oder violett) oder das Licht auf dem Weg zum Beobachter wellenlängenselektiv absorbiert oder gestreut (Rayleigh) wird.

Angeblich hat „jede Wolke einen *silbernen Rand*“. Dies ist nur korrekt, wenn die Sonne mehr oder weniger hinter der Wolke steht. In diesem Fall wird das Son-

²⁰Man muss hier zwischen absoluter und relativer Feuchte unterscheiden. Details zur Kondensation in der Atmosphäre findet man bei Vollmer: „Lichtspiele in der Luft“, Elsevier 2005.

²¹= „in der Luft schwebende Teilchen“ (ausgenommen Luftmoleküle und Wasser(dampf))

²²Die Dichte von Wolken ist trotz des hohen Wassergehalts vergleichsweise gering und beträgt in Meereshöhe bei 0° nur 5 g/m³. Bei 25° sind es immerhin 23 g/m³.

²³Für Regen müssen die Tropfen erst noch weiter auf Durchmesser von bis zu mehreren Millimetern anwachsen. Neben dem Verschmelzen von Tröpfchen zu größeren Tropfen (Koaleszenz) sind dabei Eiskristalle von entscheidender Bedeutung.

²⁴Gallagher und Beasley, Applied Optics 42, S. 505, 2003.

²⁵Bei sogenannten *Blinks* ergibt sich eine Färbung durch ein farbiges Gelände unterhalb der Wolke, durch welches die Wolke indirekt beleuchtet wird.

Schwarze Wolken: Wolken sind so „dicht“, dass das Licht nicht nach unten kommt

Dunst: Sichtweite > 1 km

Nebel: Sichtweite < 1 km

trockene Luft → blauer Dunst (Rayleigh)

Bei Hagel ergeben sich teilweise gelbgrüne Wolken.

Gründe für farbige Wolken

Silberner Rand: Nur wenn die Wolke von hinten beleuchtet wird



Abbildung 4.6.21: Gewitterwolken sind schwarz, weil der Wassergehalt so hoch ist, dass kein Licht bis zur Wolkenunterseite gestreut wird, Foto mit freundlicher Genehmigung von Richard Carlson, <http://www.pals.iastate.edu/carlson/>

nenlicht am Rand gestreut und dieser Rand erscheint hell weiß. Der zentrale Teil der Wolke ist dunkler, weil eben nur ein Teil des Lichts bis zur Unterseite der Wolke gelangt. Entscheidend ist also, dass das Streuvolumen am Rand der Wolke reduziert ist.



Abbildung 4.6.22: Leuchtende Nachtwolken, Foto mit freundlicher Genehmigung von Mika Yrjölä

Leuchtende Nachtwolken lassen sich vor allem im Norden Deutschlands (und auf anderen Stellen der Welt mit geographischer Breite größer 55° Nord oder kleiner 55° Süd) beobachten (bevorzugt im Sommer). In diesem Fall ergeben sich ca. 1 bis 2 Stunden nach Sonnenuntergang hell leuchtende Wolken vor dem Nachthimmel nahe beim Horizont (Abb. 4.6.22 und 4.6.23). Dies ist nur dann möglich, wenn die Wolken sehr hoch (ca. 80 bis 90 km anstatt den üblichen Höhen bis 10 km) stehen und daher von der bereits untergegangenen Sonne weiter beleuchtet werden.

In den genannten geographischen Breiten herrscht aufgrund globaler Luftzirkulation in hohen Luftschichten eine extrem tiefe Temperatur (-130°C), so dass trotz des geringen Drucks eine Wolkenbildung möglich ist.²⁶

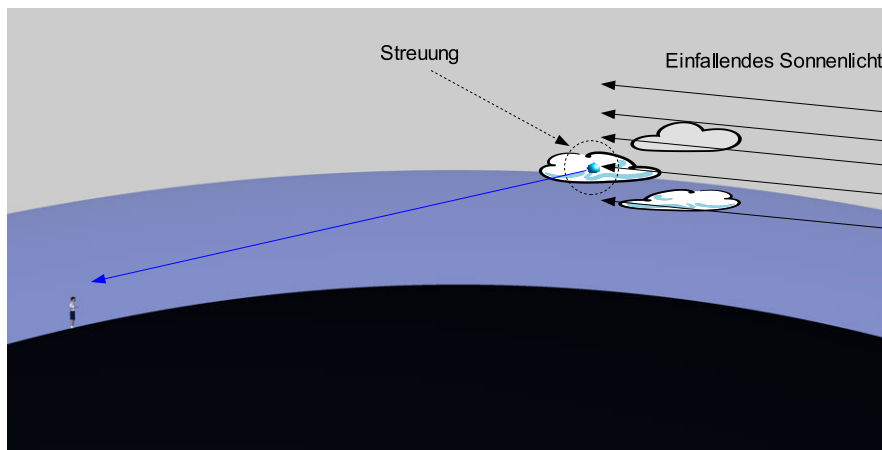


Abbildung 4.6.23: Hoch stehende Wolken (ca. 25 bis 80 km) können auch noch nach dem Sonnenuntergang vom Sonnenlicht beleuchtet werden und damit Licht zum Beobachter streuen. Man spricht von leuchtenden Nachtwolken.

Ab einer bestimmten Zahl von Streukörpern bewirkt eine Erhöhung ihrer Zahl keine weitere Steigerung der Helligkeit. Aus diesem Grund wird auch eine Schneedecke (wenn bei dieser auch eher Reflexion als Streuung der Grundmechanismus ist) nicht dadurch noch heller, dass noch weiterer Schnee auf die bereits geschlossenen Schneedecke fällt.

Die Streuwahrscheinlichkeit kann auch für eine Wellenlänge besonders stark werden. Dies kann zu einer selten beobachtbaren Färbung des Mondes führen. Im Angelsächsischen gibt es dementsprechend für ein seltenes Ereignis die Redensart *Once in a blue moon*. Auch andere Färbungen als Blau sind möglich. Voraussetzung hierfür ist, dass alle Streuteilchen (Nebel) dieselbe Größe aufweisen. Der Durchmesser der Teilchen liegt dabei im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Beobachtbar waren diese Blaufärbungen beispielsweise beim Ausbruch des Krakatau Ende des 19. Jahrhunderts. Angeblich können Raucher – genügend Übung vorausgesetzt – ebenfalls manchmal für den ausgeatmeten Rauch entsprechendes Streuverhalten (z.B. Grün) erreichen. Dazu muss der Rauch genau die richtige Zeitdauer in der Lunge verweilen.

Wellenlängenabhängige Streuwahrscheinlichkeit bei mittel-großen Partikeln

²⁶ Angeblich konnte in den letzten Jahren eine Häufung aufgrund des Treibhauseffekts beobachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass damit eine Erwärmung der Troposphäre erfolgt und daraus dann eine Abkühlung der Mesopause resultiert.



Abbildung 4.6.24: Nebel ist aufgrund der Vielfachstreuung genauso weiß wie Schnee (aufgrund der Vielfachreflexion). Sowohl bei Nebel als auch bei Schnee ist die Absorption vernachlässigbar. Foto mit freundlicher Genehmigung von C. Kohler.

Kapitel 5

Brechung

“The soul would have no rainbow had the eyes no tears.”
(John Vance Cheney)



Abbildung 5.0.1: Regentropfen. Foto mit freundlicher Genehmigung von Mila Zinkova.

Beim Durchgang von Licht durch eine Grenzfläche zwischen zwei (dielektrischen) Medien ändert das Licht seine Ausbreitungsrichtung. Dieser als Brechung bezeichnete Vorgang ist für die überwiegende Mehrzahl aller optischen Systeme von zentraler Bedeutung. Natürlich ist die Bedeutung der Linse als abbildendes Element sowohl in der Natur (fast alle höheren Tiere verwenden Linsen zur Abbildung) als auch der Technik herausragend. Daneben ist die Brechung aber auch noch für eine große Zahl weiterer optischer Effekte von Bedeutung. Für die Optik der Atmosphäre spielt die Brechung neben der Streuung eine wichtige Rolle und viele Phänomene (Regenbogen, Luftspiegelungen, verschiedene Halos) basieren auf der Brechung.

5.1 Fermat'sches Prinzip

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Brechungsgesetz abzuleiten. Den wahrscheinlich elegantesten Zugang bietet das *Fermatsche Prinzip*. Neben der Eleganz ergibt sich der Vorteil, dass der Lichtweg auch für komplizierte Gegebenheiten (siehe Abschnitt 5.4) berechnet werden kann.

Fermat hat 1657 das nach ihm benannte Prinzip formuliert:¹

Licht verläuft zwischen zwei Punkten so, dass die Reisezeit für ein Lichtteilchen extremal, also maximal oder minimal, wird.

Der einfachste Fall ist dann gegeben, wenn beide Punkte, also Start- und Zielpunkt, im selben homogenen Medium (z.B. Luft) liegen. In diesem Fall ist die geradlinige Verbindung der beiden Punkte sicher die Verbindung mit der geringsten Reisezeit für ein Photon und damit extremal. Das Fermatsche Prinzip erklärt also sofort die geradlinige Ausbreitung von Licht in homogenen Medien.²

Komplizierter wird es, wenn Start- und Zielpunkt des Lichts in unterschiedlichen Medien liegen. Von *Brechung* spricht man, wenn Licht an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien seine Richtung ändert, also abgelenkt wird. Dies ist nur dann der Fall, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit in beiden Medien unterschiedlich ist.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht beträgt im Vakuum $c_0 = 3.0 \cdot 10^8$ m/s. In Medien wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit c durch die *Brechzahl* n beschrieben (vgl. Gl. 3.3):

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (5.1)$$

Die verringerte Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im Medium kann in einem Modell³ ähnlich der Rayleigh Streuung (siehe Kapitel 4.1) behandelt werden. Im Gegensatz zur Rayleigh Streuung in Gasen ist im Festkörper die Dichte der Streukörper allerdings extrem hoch. Die Überlagerung aller Sekundärwellen dieser Streuer führt zu einer Auslöschung des Lichts in alle Richtungen mit Ausnahme der Vorwärtsrichtung. Das Licht breitet sich also im homogenen Medium weiter aus und wird nicht aus der ursprünglichen Richtung gestreut. Bei jedem Streuvorgang ergibt sich aber für die anregende Welle und die emittierte Welle eine (stoffabhängige) Verzögerung. Es wundert daher nicht, dass beim Durchgang durch ein großes Volumen sich die Verzögerungen letztlich summieren und sich so eine Gesamtverzögerung ergibt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird also reduziert.

Interessant ist auch der Unterschied zwischen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen. Im Vergleich zum Gas ist die Dichte der Moleküle in der Flüssigkeit natürlich viel höher und dementsprechend erwartet man eine viel stärkere Streuung in der Flüssigkeit. Andererseits wird dieser Effekt teilweise durch die vergrößerte Homogenität (Dichteschwankungen) in der Flüssigkeit ausgeglichen so dass in einer reinen Flüssigkeit sowohl die seitliche als auch die rückwärtige Streuung deutlich reduziert wird. Ganz entsprechend ergibt sich das Verhalten für Festkörper. Je größer die Ordnung (sehr gute Kristalle) im

¹Eine tiefere und anschaulich Begründung findet das Fermatsche Prinzip in der Pfadintegralformulierung der Quantenelektrodynamik.

²Ein Beispiel für den Fall eines Maximums wird z.B. in E. Hecht: „Optik“ besprochen.

³Ewald und Oseen Modell, siehe z.B. Hecht: „Optik“

Fermatsches Prinzip: Licht läuft auf extremalen Bahnen

geradlinige Lichtausbreitung

die Brechzahl beschreibt die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung

Material ist, desto geringer ist eine Streuung sichtbar und das Licht breitet sich ausschließlich in Vorwärtsrichtung aus.

Die Frage ist nun, wie sich das Licht von einem Punkt A zu einem Punkt B bewegt, wenn A und B in Medien mit unterschiedlicher Brechzahl liegen. Wir wissen bereits, dass innerhalb beider Medien die Ausbreitung geradlinig ist. Wir suchen nun den Punkt C auf der Grenzfläche zwischen den beiden Medien, der zu einer minimalen Reisezeit der Photonen von A nach B führt. Hierzu betrachten wir Abb. 5.1.2.

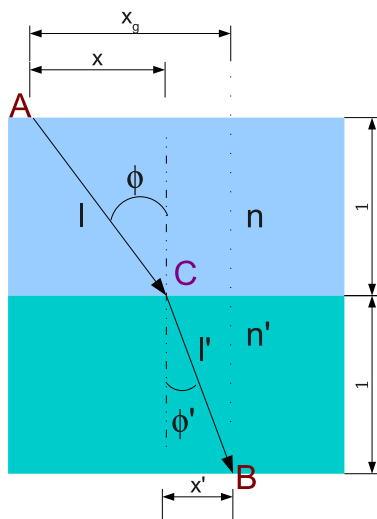


Abbildung 5.1.2: Zur Ableitung des Brechungsgesetzes: Das Licht wird so an der Wasseroberfläche gebrochen, dass die Laufzeit von A nach B minimal wird.

Für die Reisezeiten entlang der Wege l und l' ergibt sich

$$\Delta t = l \frac{n}{c} \quad (5.2)$$

$$\Delta t' = l' \frac{n'}{c} \quad (5.3)$$

Die Gesamtreisezeit ist dann

$$\Delta T := \Delta t + \Delta t' = l \frac{n}{c} + l' \frac{n'}{c} \quad (5.4)$$

Wenn wir die Weglängen l und l' nach Pythagoras durch die Achsenabschnitt ausdrücken dann erhalten wir (die y-Achsenabschnitte sind ja jeweils 1):

$$\Delta T = \frac{c}{n} \sqrt{x^2 + 1} + \frac{c}{n'} \sqrt{(x_g - x)^2 + 1} \quad (5.5)$$

Dies soll extremal werden:

$$\frac{d\Delta T}{dx} \stackrel{!}{=} 0 = \frac{-n_2(x_g - x)}{\sqrt{(a - x)^2 + 1}} + \frac{nx}{\sqrt{x^2 + 1}} \quad (5.6)$$

Und damit dann unter Berücksichtigung von

$$l = \frac{x}{\sin \phi} \quad (5.7)$$

$$l' = \frac{x'}{\sin \phi'}. \quad (5.8)$$

letztlich das *Brechungsgesetz*

$$n \sin \phi = n' \sin \phi' \quad (5.9)$$

Brechungsgesetz
 $n \sin \phi = n'$

Grundsätzlich wird beim Auftreffen eines Lichtstrahls auf die Grenzschicht zwischen zwei Medien in Wirklichkeit nicht das ganze Licht gebrochen, sondern ein Teil reflektiert. Wir kommen auf diesen Zusammenhang in Kapitel 6 nochmals ausführlicher zurück.



(a) Orientierung 1: Totalreflexion

(b) Orientierung 2: keine Totalreflexion

Abbildung 5.1.3: Totalreflexion am Beispiel einer Armbanduhr unter Wasser

Was passiert aber nun, wenn im Brechungsgesetz (Gl. 5.9) der gebrochene Winkel größer 90° wird? Ein Winkel geringfügig kleiner als 90° bedeutet ja, dass das gebrochene Licht in das zweite Medium übertritt und dann nahezu parallel zur Grenzfläche läuft. Sobald der Winkel aber größer 90° wird, dringt das Licht offensichtlich überhaupt nicht in das zweite Medium ein. In diesem Fall macht aber auch die von uns vorgenommene Ableitung des Brechungsgesetzes keinen Sinn mehr. Das Brechungsgesetz versagt, stattdessen gilt das Reflexionsgesetz. Der Strahl wird also wie an einem Spiegel reflektiert (siehe z.B. Abb. 5.1.3). Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen metallisierten Spiegel wird aber wirklich 100 % des Lichts reflektiert. Dies erklärt, warum Prismen oft zur verlustfreien Strahlumlenkung eingesetzt werden.

Damit die Totalreflexion auftritt, muss der Winkel innerhalb des zweiten Mediums größer 90° sein. Dies ist dann der Fall, wenn

$$n' \sin 90^\circ = n \sin \phi \quad (5.10)$$

gilt.

D.h. der Einfallswinkel ϕ muss mindestens

$$\phi \geq \arcsin \frac{n}{n'} \quad (5.11)$$

sein. Für Glas ($n' = 1,5$) und Luft ($n = 1$) ergibt sich ein Winkel von ca. $\phi = 40^\circ$.

Für eine kontinuierliche Brechungsindexverteilung schreiben wir ganz allgemein für die Reisezeit

$$\Delta T = \frac{1}{c} \int_A^B n(x, y, z) ds. \quad (5.12)$$

Totalreflexion:
Brechungswinkel $> 90^\circ$

Prismen zur Strahlumlenkung

Einen extremalen Weg erhält man, indem man die Variationsrechnung bemüht. Also

$$\delta\Delta T = 0. \quad (5.13)$$

Dies führt auf die Wegkurve $s(t)$. Gesucht wird also eine Funktion, die das Integral 5.12 minimiert. Eine einfache Ableitung löst dieses Problem nicht, da eben eine Funktion gesucht wird. Wie man dies mittels Variationsrechnung erreicht wird beispielhaft in Abschnitt 5.4 gezeigt.

Das Fermatsche Prinzip ist ein Wirkungsprinzip. Es gewinnt zusätzliche Eleganz dadurch, dass analoge Wirkungsprinzipien in anderen Bereichen der Physik Verwendung finden. Direkt analog zum Fermatschen Prinzip sind das Hamiltonsche Prinzip der klassischen Mechanik und die Geodätengleichung der allgemeinen Relativitätstheorie.

*kontinuierliche Brechzahl-
verteilung* → *Variationsrechnung*

5.2 Farbe und Brechung

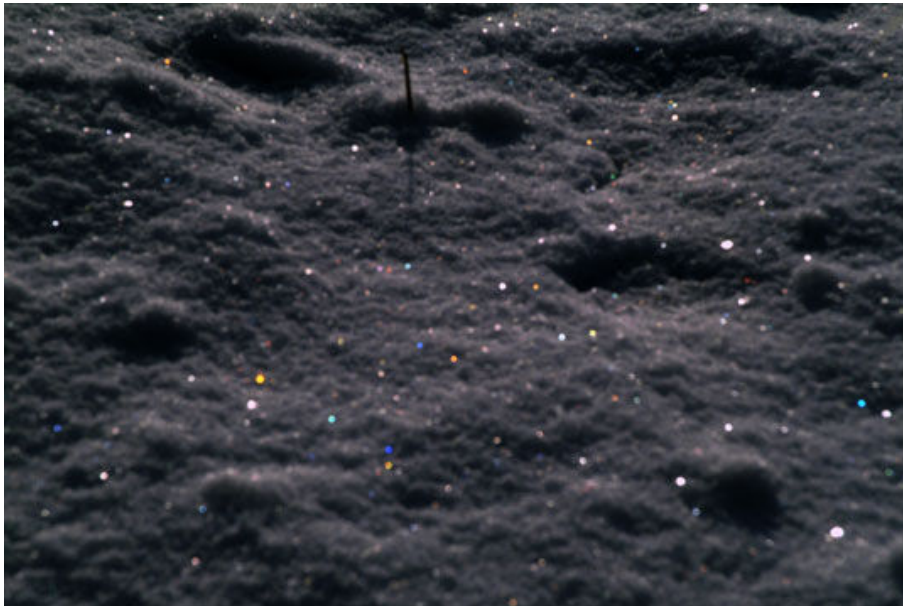


Abbildung 5.2.4: Farbaufspaltung durch Brechung an Schneekristallen, Foto mit freundlicher Genehmigung von Eva Seidenfaden, <http://www.paraselene.de>

In der Regel ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht – und damit auch die Brechzahl – von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Für blaues, also hochfrequentes Licht können die Elektronen des Materials dem laufend wechselnden elektrischen Feld nicht so gut folgen. Damit wird die Ausbreitung behindert, d.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist reduziert und damit die Brechzahl erhöht. Die Brechzahl ist damit abhängig von der Wellenlänge, man spricht von *Dispersion*.

Dispersion: Die Brechzahl $n(\lambda)$ hängt von der Wellenlänge λ ab.

Dies ist die Ursache für die prismatische Farbaufspaltung, die man oft beobachten kann. An vielen Glasrändern ist sie sichtbar, genauso wie beim direkten Lichteinfall auf Fotoobjektive (siehe Abb. 5.2.5) oder beim Regenbogen. Ein Beispiel für die Brechung an Eiskristallen ist in Abb. 5.2.4 gezeigt. Die Eiskristalle können als kleine Prismen betrachtet werden und das einfallende Licht erfährt eine wellenlängenabhängige Winkelablenkung. Welche

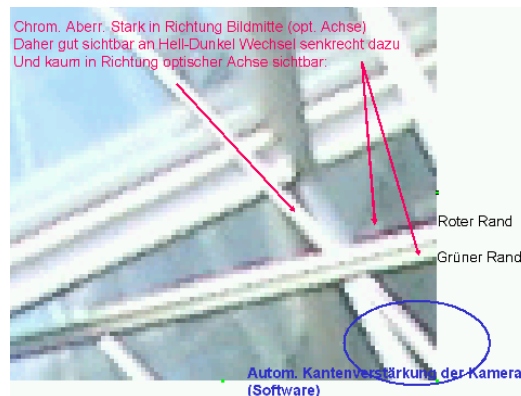
Wellenlänge dann in Richtung des Beobachters abgelenkt wird, hängt von der (zufälligen) Position und Orientierung der einzelnen Kristalle ab.

Besonders beeindruckend und stark ist die prismatische Farbaufspaltung beim Diamant. Sowohl die Brechzahl ($n=2,42$) als auch die Dispersion ($V=0,044$) sind für ihn besonders groß. Hieraus resultiert (den richtigen Schliff vorausgesetzt) das „Feuer“ des Diamanten.

Die Farbaufspaltung ergibt sich nicht nur bei Prismen, sondern ganz generell an brechenden Grenzflächen, also insbesondere auch an Linsen (siehe Abb. 5.2.5). Meist sind solche Farbaufspaltungen bei technischen Linsensystemen (z.B. im Mikroskop oder in der Fotokamera) unerwünscht. In diesem Fall spricht man von *chromatischer Aberration* und es wird entsprechend viel Aufwand getrieben, um sie zu reduzieren.

„Feuer des Diamanten“ aufgrund großer Brechzahl und starker Dispersion

Chromatische Aberration: Farbabbildungsfehler aufgrund der Dispersion



(a) chromatische Aberration einer Digitalkamera

(b) prismatische Aufspaltung an Linsenrand

Abbildung 5.2.5: Chromatische Farbaufspaltung bei Fotokameras

5.3 Bildanhebung

Die Brechung ist die Ursache für die Bildanhebung, ein den meisten von uns bekanntes Phänomen. Wenn wir ein Objekt das sich in einer gewissen Tiefe im Wasser befindet, betrachten, hat es den Anschein, das Objekt sei wesentlich höher als in der Realität. Abbildung 5.3.6 verdeutlicht dieses Phänomen. Das vom Objekt (Fisch) ausgehende Licht⁴ wird an der Wasseroberfläche gebrochen und ändert damit seine Richtung. Für den Beobachter scheint das Objekt aber in der Verlängerung des Lichtstrahls in Luft zu liegen. Dies ist auch der Grund, warum man beim Harpunieren eines Fisches unter den Fisch zielen sollte (denn dort befindet sich der Fisch in Wirklichkeit) und warum klare Gewässer weniger tief scheinen als sie in Wirklichkeit sind.

Das ganze funktioniert natürlich nicht nur bei einer horizontal liegenden Grenzfläche sondern auch bei vertikalen Grenzflächen. Abbildung 5.3.7 zeigt ein schönes Beispiel für den sich dabei ergebenden seitlichen Versatz.

Unser Auge erzielt seine Brechkraft einerseits durch eine flexible Linse und

Beim Harpunieren beachten: Unter den Fisch zielen !

⁴Der Fisch ist hier keine primäre Lichtquelle, sondern streut das auf ihn einfallende Sonnenlicht.

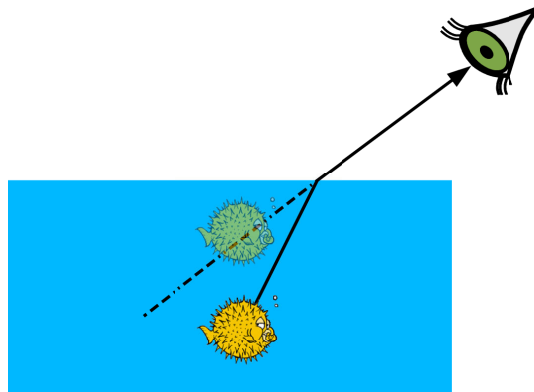


Abbildung 5.3.6: Bildanhebung: Der Fisch scheint aufgrund der Brechung an der Grenzfläche Wasser–Luft höher zu schwimmen als es in der Realität der Fall ist.

andererseits durch die Hornhaut (siehe Kapitel 10), also die Grenzfläche des Auges zur Luft hin. Wenn wir unter Wasser sind, dann ändert sich die Gesamtbrechkraft natürlich dramatisch, denn der Brechzahlunterschied der Hornhaut zur Umgebung nimmt dadurch drastisch ab ($n(\text{H}_2\text{O}) = 1,33$). Abhilfe schafft eine zusätzlich Luftschicht vor dem Auge, also eine Taucherbrille.⁵

Wale lösen das Problem des Sehens unter und über Wasser durch eine hydraulische Fokussierung des Auges. Der *Vieraugenfisch* (*Anableps*) hat Augen, die gleichzeitig unter und über Wasser funktionieren. Das Auge hat zu diesem Zweck zwei Pupillen und zwei Netzhäute. Eine andere Lösung wählen einige Vögel (insbesondere Enten). Sie haben eine ebene Hornhaut. Dadurch entfällt die fokussierende Wirkung unabhängig von den Brechzahlen.

Die Brechung an der Wasser–Luft Grenzschicht ist auch die Ursache dafür, dass aus Sicht eines Tauchers beim Blick nach oben nur scheinbar ein Teil des Himmels gesehen wird. In Wirklichkeit sieht der Taucher zwar den gesamten Himmel, dieser ist aber auf einen Bereich von $2 \times 48,6^\circ$ komprimiert.

In aller Regel hat der Taucher beim Tauchen eine Tauchmaske auf. Durch die Grenzfläche von Wasser zu Luft ergibt sich bei herkömmlichen Tauchmasken mit ebenem Sichtfenster eine Art Tunnelblick. Das Sehfeld wird deutlich (auf ca. 60°) eingeschränkt und es ergibt sich eine Vergrößerung um den Faktor 1,33 (Brechzahl des Wassers).⁶

Eine Art Bildanhebung tritt auch bei der Betrachtung von Sternen auf. Wenn der Stern nicht exakt im Zenit steht, dann ergibt sich für das von ihm ausgehende Licht ein Winkel zur Atmosphäre. Im einfachsten Modell (wie man exakter rechnen werden wir im Abschnitt 5.4 betrachten) nehmen wir die Atmosphäre als ein homogenes Medium an (was natürlich nur in allererster Näherung stimmt). Damit haben wir wieder eine Brechung an der Grenzschicht Weltraum/Atmosphäre. Das heißt das Licht des Sterns wird abgelenkt und der Stern befindet sich daher scheinbar in einer Richtung, die nicht mit der wirklichen Richtung übereinstimmt (siehe Abb. 5.3.8). Der Effekt ist umso stärker, je näher der Stern dem Horizont kommt. Zusätzlich ist nahe des Horizonts aber auch mit starken lokalen Temperaturschwankungen zu rechnen (Licht-

Sehen unter Wasser durch Luftraum vor dem Auge (Taucherbrille)

ein Taucher sieht den Himmel komprimiert

die wahre Position von Sternen weicht aufgrund der Brechung von der scheinbaren Position ab

⁵Ohne dieses Hilfsmittel kann man unter Wasser ein Objekt der Länge l unter optimalen Bedingungen ca. $30 \cdot l$ weit sehen. Die Form lässt sich allerdings nur sinnvoll bis zu einer Entfernung von $5 \cdot l$ abschätzen.

⁶Kompliziertere Tauchmasken können diese Probleme vermeiden, siehe z.B. J.R. Rogers, Proc. SPIE 5962, S. 5620I-1, 2005.



Abbildung 5.3.7: „Bildanhebung“ seitlich, Foto mit freundlicher Genehmigung von Christoph Pruss.

bahn nahe der Erdoberfläche), so dass hier der Effekt zeitlich variiert und damit ein besonders starkes Flimmern des Sterns bzw. seiner Position auftritt.

Die Brechzahländerungen innerhalb der Atmosphäre sind gering. Beispielsweise ergeben sich Unterschiede im Bereich von 10^{-4} für Temperaturänderungen von 100 K.⁷ Dennoch reichen diese kleinen Änderungen über die großen Strecken, die das Licht in der Atmosphäre zurücklegt, aus, um zu merklichen Lichtablenkungen zu führen.

Natürlich gilt das nicht nur für die Sterne, die wir nachts sehen, sondern auch für den uns wichtigsten Stern, die Sonne. Das Licht der Sonne wird durch die Atmosphäre gebrochen und läuft daher auf einer gebogenen Bahn. Dadurch sehen wir die Sonne beim Sonnenuntergang noch, obwohl sie rein geometrisch betrachtet bereits unterhalb des Horizonts steht (siehe Abb. 5.3.9).

Wie stark die Lichtbahn gekrümmt ist, hängt vom Gradienten der Brechzahl und damit vom Gradienten der Temperatur in der Atmosphäre ab. Für einen starken Gradienten von 11 K pro 100 m würde die Bahnkurve so stark gekrümmt sein, dass das Licht der Erdoberfläche folgen würde, d.h. der Krümmungsradius würde dem Radius der Erde entsprechen und man würde die Sonne nie untergehen sehen (Streuung und Absorption in der Atmosphäre vernachlässigt). Für normale Atmosphärenbedingungen erreicht man allerdings für die Lichtbahn lediglich einen Krümmungsradius, der sechs mal größer als der Erdradius ist.

Beim Sonnenuntergang/aufgang, also bei tiefstehender Sonne, ist der Effekt besonders stark, da das Licht viel Erdatmosphäre durchläuft. Die Anhebung beträgt dann 38 Bogensekunden. Zum Vergleich: Die Sonne hat einen Durchmesser von ca. 30 Bogensekunden.

bei einem Temperatur-Gradienten von 11K/100 m würde die Sonne niemals untergehen

⁷H. Gross, Handbook of Optical Systems Volume 1: Fundamentals of Technical Optics, Wiley

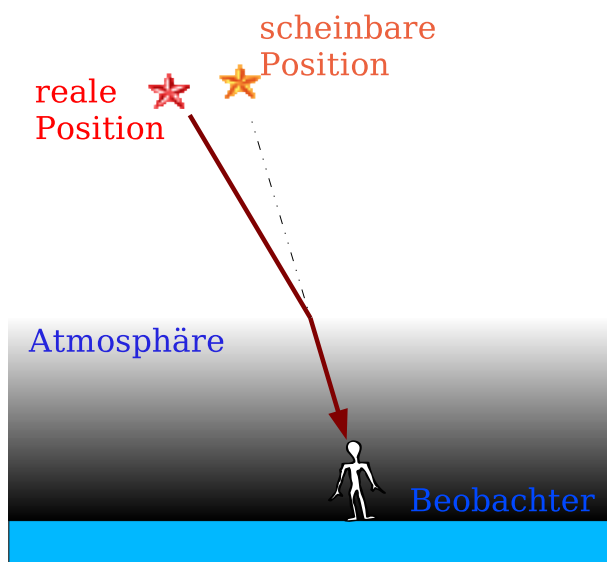


Abbildung 5.3.8: Sterne und ihre Position: Die scheinbare Position von Sternen weicht von der realen Position aufgrund der Brechung an der Erdatmosphäre ab. Der Effekt ist in Horizontnähe besonders stark.

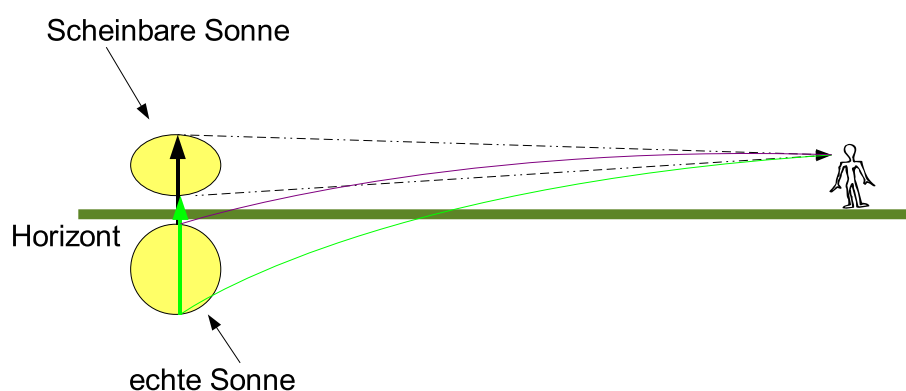


Abbildung 5.3.9: Abflachung der Sonne: Licht vom unteren Rand der Sonne durchläuft mehr Atmosphäre als Licht vom oberen Rand. Daher ist die „Bildanhebung“ für den unteren Rand stärker.

Daraus folgt auch, dass die Sonne beim Sonnenuntergang/aufgang ihre runde Form verliert und abgeflacht erscheint (siehe Abb. 5.3.10). Der Grund liegt darin, dass das vom unteren Rand der Sonne ausgehende Licht mehr Atmosphäre durchläuft wie das vom oberen Rand ausgehende Licht. Damit wird die scheinbare Position des unteren Rands stärker verändert (und zwar nach oben) als die des oberen Rands (siehe Abb. 5.3.9). Die Abflachung beträgt unter normalen Bedingungen ca. 20%. Vom Gipfel eines Bergs aus ist sie eher größer, weil dann eine größere Luftmasse zwischen Sonne und Beobachter liegt und der Effekt damit verstärkt wird. Schließlich sei noch bemerkt, dass die Abflachung natürlich nicht nur die Sonne, sondern ebenso den Mond betrifft.

Abflachung der Sonne beim Sonnenuntergang: Licht des unteren Rands läuft durch mehr Atmosphärenvolumen und wird daher stärker angehoben

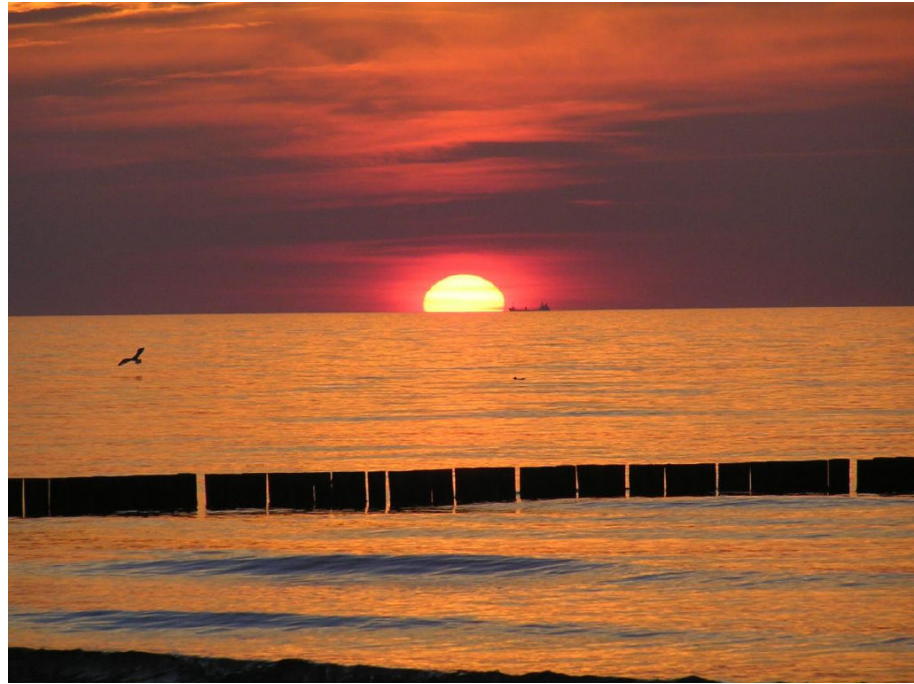


Abbildung 5.3.10: Abflachung der Sonne beim Sonnenuntergang zu einer Ellipse aufgrund der Brechung an/in der Atmosphäre. Die Sonne liegt im übrigen rein geometrisch betrachtet bereits unterhalb des Horizonts. Foto mit freundlicher Genehmigung von Witold Gorski

5.4 Luftspiegelungen

Von *Luftspiegelungen* bzw. *Mirages*⁸ spricht man, wenn sich Spiegelbilder von Objekten aufgrund von unüblichen Brechzahlverteilungen ergeben. Alle Luftspiegelungen spielen sich im Bereich von ca. 1 Grad ab, sind also vergleichsweise „klein“. (Die beeindruckenden Bilder die man teilweise sieht, werden durch entsprechend langbrennweitige Teleobjektive gewonnen.)



Abbildung 5.4.11: *Mirage Inferior*

Mirage Inferior: Spiegelbild entsteht unterhalb des Originals über einer heißen Luftschicht (sehr häufige Mirage)

Die *Mirage Inferior* ist dabei die häufigste Luftspiegelung. Sie ist sowohl im Sommer wie auch im Winter oft über von der Sonne bestrahlten Straßen sicht-

⁸Der Begriff geht auf Napoleons Feldzüge in Nordafrika zurück, bei denen entsprechende Luftspiegelungen beobachtet wurden.

bar und wird daher auch *Highway Mirage* genannt (ein anderer gebräuchlicher Name ist *Wüstenmirage*). Das Grundprinzip ist in Abb. 5.4.12 veranschaulicht. Die Luft über der sonnenbeschienenen Straße wird aufgrund der Erwärmung des Straßenbelags aufgeheizt und ist damit deutlich wärmer als die darüber liegende Luft. Warme Luft hat aber eine geringere Dichte und damit eine geringere Brechzahl.⁹

Im einfachsten Modell ergibt sich daher eine Reflexion an der Grenzfläche zwischen der warmen und der kalten Luftschicht (siehe Abb. 5.4.12).¹⁰ Der Winkelbereich, in dem sich die Luftspiegelungen abspielen, ist deswegen so klein, weil die Brechzahl der Luft mit der Temperatur nur sehr wenig variiert.¹¹ Sie sollten also ihren Kopf möglichst tief halten, weshalb man den Effekt beim Autofahren besser sieht, als wenn man neben dem Auto auf der Straße steht. Aufgrund der Spiegelgeometrie ist auch klar, dass ein sehr niedriges Objekt nicht zum (erhöhten) Kopf des Beobachters gespiegelt werden kann. Der Einfallswinkel auf die Luftschicht für entsprechende Lichtstrahlen wäre für so ein Objekt zu groß. Totalreflexion würde an der Luftschicht nicht stattfinden.

In Wirklichkeit gibt es natürlich keine klare Grenze, sondern einen kontinuierlichen Übergang der Lufttemperatur und damit der Brechzahl. Bei einem konstanten Gradient der Brechzahl ergibt sich in der Grenzschicht ein parabolischer Lichtweg (siehe Abschnitt 5.4). Da die Grenzschicht sehr dünn ist, kann man der Einfachheit halber aber auch einfach von einer Reflexion an der Grenzschicht ausgehen. Die Temperatur selbst ist ohne Belang. Nur der Gradient der Temperatur ist wichtig. Daher klappt das Ganze nicht nur im Sommer sondern auch im Winter. Wenn der Gradient nicht konstant ist, dann ergibt sich zusätzlich eine Verzerrung der Spiegelung.

Meist äußert sich die Mirage Inferior als eine anscheinend nasse Fläche auf der Straße. Dies liegt daran, dass das gespiegelte Objekt in der Regel der Himmel ist und der sieht in der Reflexion eben wie eine Wasserlache aus. Die Spiegelung heißt „inferior“, da die Spiegelung selbst *unterhalb* des Objektes sichtbar ist.

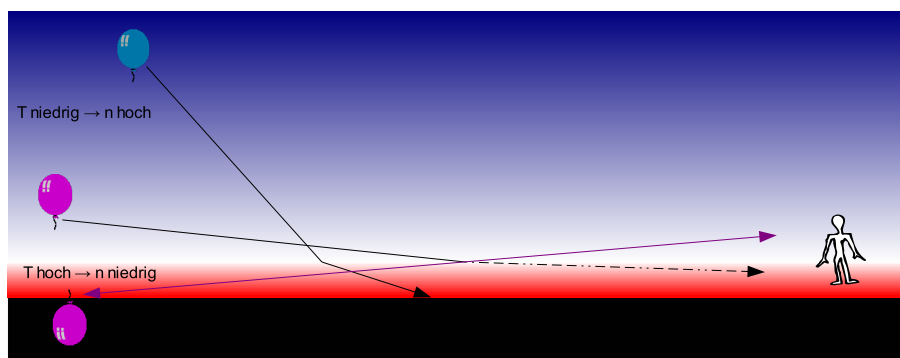


Abbildung 5.4.12: *Mirage Inferior* („Highway mirage“): Im einfachsten Modell wird das Licht an der bodennahen heißen Luftschicht (total-)reflektiert. In Wirklichkeit ergibt sich ein annähernd parabolischer Lichtweg nahe der Grenzfläche.

Einfachstes Modell: heiße Luftschicht mit kleiner Brechzahl: Totalreflexion

Scheinbare Wasserlache auf der Straße aufgrund der Reflexion des blauen Himmels

⁹Eine geringere Dichte bedeutet, dass das Medium näher beim Vakuum liegt und daher ist auch die Brechzahl annähernd die des Vakuums, also 1.

¹⁰Die Temperaturänderung kann dabei laut Minnaert (M. Minnaert: Licht und Farbe in der Natur) über einen kleinen Bereich (z.B. 1 cm) sehr stark werden (20 bis 30 K). Geringere Temperaturänderungen z.B. 8 K über 1 m reichen aus, um das Phänomen deutlich ausgeprägt zu erzeugen.

¹¹Beispielsweise ergibt eine Temperaturerhöhung von 40° eine Brechzahländerung von lediglich $\Delta n \approx 3 \cdot 10^{-6}$.

Mirage Superior: Spiegelbild liegt oberhalb des Originalobjekts bei einer Temperaturinversion

= „Eismirage“

Natürlich gibt es dementsprechend auch eine *Mirage Superior (Kimmung)* und wie unschwer zu erraten liegt dort die Spiegelung *oberhalb* des Objekts. In diesem Fall ist eine warme Luftschicht (Inversion) oberhalb einer Schicht mit kalter Temperatur (siehe Abb. 5.4.13). Entsprechend kehren sich die Verhältnisse um und das Scheinbild liegt oberhalb des Objekts. Diese Art der Temperaturverteilung ergibt sich natürlich besonders häufig über kalten Oberflächen, insbesondere eisig kalten Gewässern oder Eisflächen. Die Mirage Superior kommt daher vor allem in polaren Regionen vor und wird auch als *Eismirage* bezeichnet (siehe Abb. 5.4.14, 5.4.15).

Objekte, die weit entfernt sind und daher unterhalb des Horizonts liegen und damit eigentlich unsichtbar sind, können dadurch sichtbar werden. Angeblich haben die Wikinger auf diese Weise bereits von Grönland aus die Küste Amerikas gesehen. Man spricht bei dieser Form der Mirage auch von *Hillingar Effekt*.

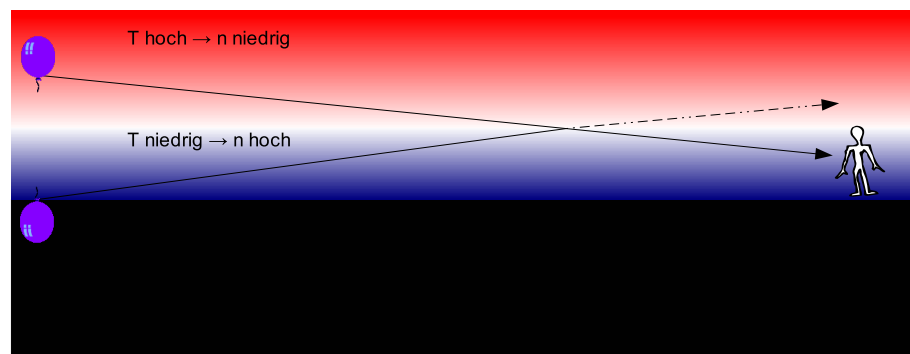


Abbildung 5.4.13: Mirage Superior: Das Licht wird an der kalten Luftschicht (Inversion) (total-)reflektiert.



Abbildung 5.4.14: Mirage Superior, Foto mit freundlicher Genehmigung von Paul Ward, www.coolantartica.com



Abbildung 5.4.15: *Mirage Superior*, Foto mit freundlicher Genehmigung von Wim van Bochoven, copyright 2002 Wim van Bochoven, Netherlands

Wenn die Temperaturverteilungen komplexer werden, dann ergeben sich komplexe, verzerrte Spiegelbilder und man spricht von *Fata Morgana*¹². Insbesondere tritt oft eine vertikale Überhöhung, die entsprechend als *Towering* oder *Castles in the sky* bezeichnet wird, auf. Der Beobachter sieht also am Horizont scheinbar Türme und komplexe Szenen aufgrund der verzerrten und überhöhten Spiegelung von einfachen Objekten (siehe Abb. 5.4.16). Noch komplexere Lichtwege und damit Bilder findet man beim *Novaya Zemlya Effekt*¹³.

Fata Morgana: Komplexe Temperaturverteilungen ergeben kompliziert verzerrte Spiegelungen, oft mit vertikaler Überhöhung



Abbildung 5.4.16: *Fata Morgana* an der norwegischen Küste. Dieses Bild basiert auf dem Bild 2005-08-22 fata morgana.jpg aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und steht unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation. Der Urheber des Bildes ist Gerd A.T. Müller.

Eine Art *Mirage Inferior* kann genauso auftreten, wenn die erhitzte Fläche nicht waagrecht, sondern senkrecht zur Erdoberfläche liegt. Dies ist insbesondere an von der Sonne bestrahlten Wänden der Fall. Wenn man entlang einer langen Wand (unter geringem Winkel) entfernte Objekte beobachtet, sind bei günstigen Bedingungen Spiegelungen der Objekte sichtbar. Man spricht von einer *lateralen Mirage*. Die Erklärung ist exakt dieselbe, wie wir sie auch für die

laterale Mirage: Spiegelbild an beheizter Wand

¹²nach der Halbschwester Morgan le Fay von König Artus in der Artussage

¹³Journal of the Optical Society of America 69, S. 776

konventionelle Mirage Inferior haben. Wir wollen die laterale Mirage aber etwas genauer betrachten und an ihr exemplarisch eine exakte Berechnung des Lichtweges vornehmen.

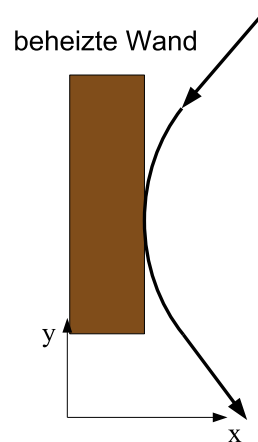


Abbildung 5.4.17: Skizze zur Ableitung des Lichtverlaufs bei einer Mirage

Dazu gehen wir von einer Temperaturverteilung aus, die zu einem Brechzahlverlauf führt, dessen Gradient proportional zur Brechzahl selbst ist (dies ergibt sich bei Verwendung der idealen Gasgleichung und einer exponentiellen Abkühlung):

$$\frac{dn}{dx} = \frac{1}{k}n \quad (5.14)$$

Um den Lichtweg in diesem „Gradientenindex-Medium“ zu berechnen, verwenden wir wieder das Fermatsche Prinzip:

$$\Delta T = \frac{1}{c} \int_A^B n(x, y, z) ds \quad (5.15)$$

$$\delta \Delta T = 0 \quad (5.16)$$

ds ist dabei nach Pythagoras durch $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2}$ gegeben, so dass man schreiben kann

$$\Delta T = \frac{1}{c} \int_A^B n \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (5.17)$$

$$= \frac{1}{c} \int_A^B n \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (5.18)$$

$$(5.19)$$

wenn wir Ableitungen von y nach x mit y' kennzeichnen.

Für diesen Ausdruck muss die Variation gebildet werden. Das Ergebnis soll Null werden. Allgemein ergibt sich aus der Variationsrechnung¹⁴, dass dies für eine beliebige Funktion f durch Lösen einer Differentialgleichung, der *Euler-Lagrange Gleichung*

$$\frac{\partial f}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial f}{\partial y'} = 0, \quad (5.20)$$

erzielt wird.

¹⁴Meyberg, Vachenaer, „Höhere Mathematik 2“, Springer

Ideale Gasgleichung und exponentielle Abkühlung

Variationsrechnung im Ein-satz

Euler-Lagrange Gleichungen

Hier eingesetzt ($f = n\sqrt{1 + y'^2}$) ergibt sich

$$\frac{n'}{n}(1 + y'^2) + y\frac{y''}{y'} = 0 \quad (5.21)$$

Und mit Gl. 5.14

$$y' = \frac{\text{konst}}{\sqrt{e^{2x/k} - k_2}}. \quad (5.22)$$

Die Integration ergibt

$$y = \text{konst} + k_3 \operatorname{atan}\left(\sqrt{e^{2x/k} - k_2}\right) \quad (5.23)$$

$$\approx \text{konst} + k_3 \sqrt{x}. \quad (5.24)$$

Nahe der Wand erhält man also näherungsweise einen parabolischen Lichtweg ($x = c_1 + c_2 y^2$)

parabolischer Lichtweg bei konstantem Temperaturgradient

5.5 Grünes Leuchten

Bereits im Abschnitt 5.3 haben wir gesehen, dass durch die Brechung in der Erdatmosphäre die Sonne scheinbar an einer anderen Position zu stehen scheint. Die Anhebung der Sonne hängt natürlich vom Brechzahlgradient in der Atmosphäre ab und dieser hängt wiederum — wie auch die Brechzahl selbst — von der Wellenlänge ab.

Es ist also so, dass der blaue Anteil des Sonnenlichts stärker angehoben wird und damit sollte man eigentlich im letzten Moment des Sonnenuntergangs einen blauen Rand sehen. Wir müssen aber auch berücksichtigen, dass das blaue Licht stärker weggestreut wird und aufgrund der spektralen Empfindlichkeit unserer Augen sowieso nur schwach detektiert wird. Damit ergibt sich schließlich eine Dominanz des grünen Lichts (das immer noch mehr angehoben wird als das rote und gelbe Licht, siehe Abb. 5.5.18).

Eine genaue Analyse zeigt allerdings, dass die Anhebung nur 20 Bogensekunden beträgt und dies entspricht nicht der Beobachtung¹⁵. Letztlich sind zusätzlich noch Luftspiegelungen in der Atmosphäre erforderlich, die dann zu einer effektiven Vergrößerung des grünen Segments führen.¹⁶

5.6 Linsen

Die Grundkomponenten, die man in typischen optischen Systemen findet basieren auf Brechung, Reflexion oder Beugung. Die Linse ist natürlich *das* optische Element schlechthin. Sie war bereits in der Antike um 400 v. Chr. bekannt¹⁷. In der Regel besteht sie aus zwei sphärischen Flächen (solche lassen sich

¹⁵Die maximale Winkelauflösung des menschlichen Auges beträgt eine Bogenminute.

¹⁶Young, Opt. and Photon. News 10, 31 (1999).

¹⁷Der Dichter Aristophanes beschreibt 423 v. Chr. zumindest die Verwendung einer Sammellinse als Brennglas (Spektrum der Wissenschaft 3/2005 S. 7).



Abbildung 5.5.18: Grünes Leuchten, Foto mit freundlicher Genehmigung von Dee Golden.

nämlich einfach herstellen). An beiden Flächen ergibt sich Brechung, d.h. eine Strahlableitung. Unter dem **Brennpunkt** einer Linse versteht man den Punkt in den achsparallel einfallendes Licht durch die Linse gebündelt wird (siehe Abb. 5.6.19). Da die Linse zwei Seiten hat, gibt es zwei Möglichkeiten, paralleles Licht einfallen zu lassen, nämlich von vorne oder von hinten. Dementsprechend gibt es zwei Brennpunkte.

Brennpunkte: einfallendes achsparalleles Licht wird dorthin fokussiert

Hauptebenen

Als **Brennweite** bezeichnet man den Abstand des Brennpunktes von einer sogenannten **Hauptebene**. Die Hauptebene ist gerade die Schnittebene eines parallel zur optischen Achse einfallenden Strahles mit dem aus der Linse in Richtung Brennpunkt austretenden Strahl. Nicht nur Linsen sondern ganz allgemein alle optischen Abbildungssysteme haben dementsprechend zwei¹⁸ Hauptebenen.

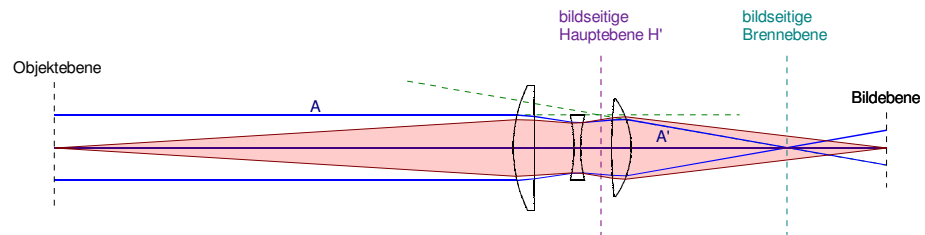


Abbildung 5.6.19: Optische Abbildung durch ein Linsensystem: Der rote Lichtkegel zeigt den Abbildungsstrahlengang. Gleichzeitig sind in blau parallel einfallende Strahlen (Objekt im Unendlichen bzw. sehr weit entfernt) eingezeichnet. Diese Strahlen schneiden sich nicht in der hier eingezeichneten Bildebene, sondern in einer anderen Bildebene, der sogenannten Brennebene. Der Schnitt eines einfallenden parallelen Strahls A mit dem zugehörigen Ausgangsstrahl A' ergibt einen Punkt in der sogenannten bildseitigen Hauptebene. Dies ist der Ort der äquivalenten Brechung. Umgekehrt (parallele Strahlen in der Bildebene) kann man auch die objektseitige Hauptebene bestimmen (nicht eingezeichnet). In erster Näherung (paraxiale Optik) kann das optische System – unabhängig von seiner Komplexität – in Luft durch die Angabe von Brennebenen und Hauptebenen vollständig beschrieben werden, d.h. die Kenntnis dieser Ebenen ist ausreichend, um die (paraxiale) Bildkonstruktion für ein beliebiges Objekt vorzunehmen.

Man kann nun zeigen¹⁹, dass die Brennweite einer Linse durch folgende Formel gegeben ist:

$$f' = \frac{nn'r_1r_2}{(n - n')[-nr_1 + nr_2 + d(n - n')]} \quad (5.25)$$

¹⁸Zwei weil die Konstruktion von vorne oder von hinten vorgenommen werden kann.

¹⁹z.B. Hecht: „Optik“

Dabei bezeichnen r_1 und r_2 die Radien und n die Brechzahl der Linse. n' ist die Brechzahl der Umgebung.

5.7 Brechung und Wasser

Die Wasseroberfläche eines Schwimmbades ergibt durch die Wellen eine optische Oberfläche bei der positive und negative Krümmungen abwechseln. Dies führt zu abwechselnd positiven und negativen Brechkräften bzw. Brennweiten. Als Folge hiervon wird das Licht entweder fokussiert oder defokussiert. Dies ist die Ursache für die wechselnden Helligkeitsmuster am Boden des Schwimmbades (siehe Abb. 5.7.20).

Farbige Muster auf dem Boden des Schwimmbades aufgrund der Dispersion

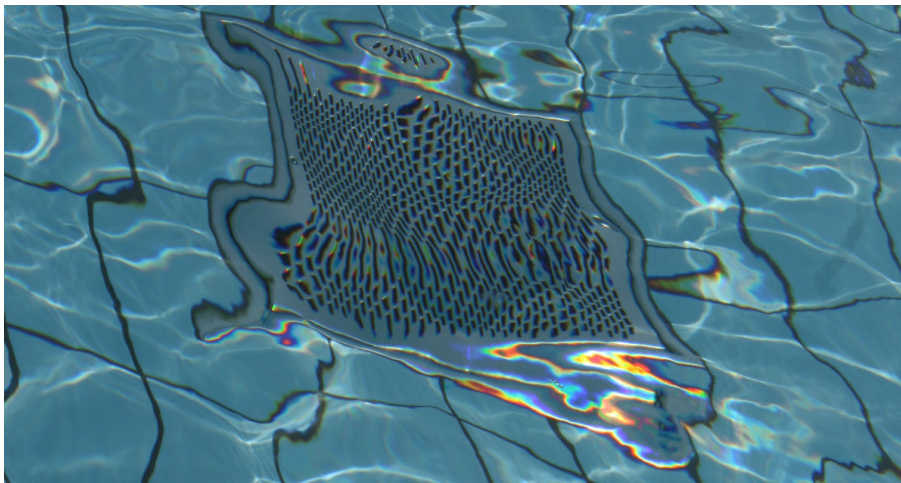


Abbildung 5.7.20: An Wasserwellen gebrochene Lichtstrahlen führen zu interessanten Helligkeitsmustern am Boden des Gewässers. Sichtbar sind auch die „chromatischen Aberrationen“ als Farbsaum der Lichtmuster. Farbtafel: 12.0.22

Genauso sieht man auch ein entsprechendes Muster an Wänden oberhalb des Wassers. In diesem Fall hat man eine Reflexion an der durch Wellen geformten Wasseroberfläche.

Eng verwandt mit diesem Phänomen ist das *Funkeln der Sterne* bzw. die *Szintillation* der Sterne. Das Licht eines entfernten Sternes durchwandert die Atmosphäre der Erde, bevor es unser Auge erreicht. Nun ist die Atmosphäre aber nicht homogen, sondern unterliegt zeitlichen und räumlichen Dichteschwankungen. Diese Dichteschwankungen gehen einher mit einer Variation der Brechzahl und damit einer Lichtablenkung. Das Licht des Sterns wird also mal zu unserem Auge hin gesammelt und mal von uns weg defokussiert (siehe Abb. 5.7.21).

Funkeln der Sterne durch Dichteschwankungen in der Atmosphäre

Dies ist genau dasselbe, als ob Sie unter Wasser am Boden des Swimming Pools (Abb. 5.7.20) sitzen würden. Wenn Ihr Auge in einem hellen Bereich liegt, sehen Sie viel Licht und wenn es im Dunkeln liegt entsprechend wenig. Durch den laufenden Wechsel (Wellen) der Helligkeitsverteilung nehmen auch Sie laufend einen Wechsel der Helligkeit wahr.

Natürlich stört dieser Effekt bei astronomischen Beobachtungen. Daher werden Sternwarten bzw. große Teleskope bevorzugt auf hohen Bergen und in klarer Luft aufgestellt, um den Effekt der Atmosphäre zu minimieren. Beson-

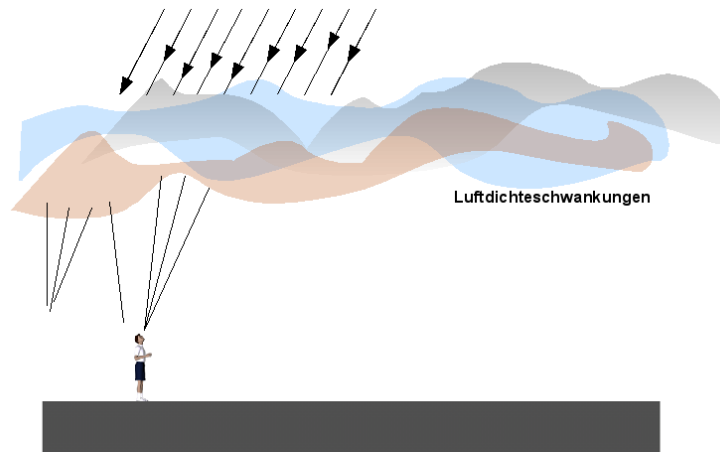


Abbildung 5.7.21: Das Funkeln der Sterne. Lokale Dichteschwankungen der Atmosphäre führen zu Lichtablenkungen. Die Schwankungen variieren zeitlich mit mehreren hundert Hertz.

ders ungünstige Beobachtungsbedingungen ergeben sich, wenn man einen Stern nahe des Horizonts beobachten will. In diesem Fall durchquert das Licht des Sterns oder das einer anderen weit entfernten Lichtquelle einen sehr großen Bereich der Atmosphäre (ähnlich wie beim Sonnenuntergang) und die Störungen durch die Atmosphäre sind entsprechend groß.²⁰

Zusätzlich können auch Farbeffekte auftreten, denn es ergeben sich aufgrund der Dispersion natürlich dann auch unterschiedliche Lichtablenkungen für unterschiedliche Farben. Generell kann man diese Szintillationen am besten bei niedrigem atmosphärischem Druck, geringer Temperatur und starker Luftfeuchtigkeit beobachten. Günstig ist auch ein mittelmäßig starker Wind. Die Farbeffekte sind auch gut für die Wasserwellen am Boden des Swimming Pools sichtbar (Abb. 5.7.20).

Gekräuselte Wasseroberflächen können noch zu einer anderen interessanten Erscheinung, die eng verwandt mit dem Oppositionseffekt und dem Heiligen Phänomen ist, führen. Eine gekräuselte Wasseroberfläche eines leicht trüben Gewässers ergibt einen Strahlenkranz, eine sogenannte *Aureole*, um den Kopf des Beobachterschattens. Letztlich resultiert die gekräuselte Wasseroberfläche in abwechselnden Licht- und Schattenbahnen (s.o.) aufgrund der Linsenwirkung. Diese Bahnen laufen im Wasser parallel (weil die Sonne so weit entfernt ist) und das Licht wird dann im Wasser leicht gestreut (daher muss das Wasser leicht trüb sein). Aufgrund der Perspektive („Bahngleis“) scheinen die im Raum parallel laufenden Linien auf den passenden Fluchtpunkt, nämlich den Antisolarpunkt, zu zulaufen.

Aureole: Strahlenkranz um den Kopf des Beobachterschattens bei leicht trüben Gewässern oder auch ganz allgemein um helle Lichtquellen

²⁰Bei Sternen sieht man den Effekt am besten in den Wintermonaten für Sirius (das ist nach der Sonne der für uns hellste Stern) Zu dieser Zeit steht Sirius relativ nahe beim Horizont.

5.8 Retroreflexion

Bei Betrachtung des eigenen Schattens auf einer taubenetzten Wiese können Sie beobachten, dass sich um den Schatten des Kopfes eine Aufhellung, die als „Heiligenschein“ interpretiert werden kann (Abb. 5.8.23), ergibt. Der Grund hierfür liegt in einem besonderen Retroreflexionsphänomen. Das Prinzip ist in Abbildung 5.8.22 veranschaulicht. Das parallele Licht der Sonne wird durch die Tautropfen fokussiert. An (bzw. nahe) der Brennpunktposition fällt das Licht auf einen Grashalm. Das Licht wird dort reflektiert, geht denselben Weg zurück und läuft daher in Richtung des Kopfes des Beobachters, wenn dieser einen Bereich in Richtung des Antisolarpunktes betrachtet. Für den passenden Abstand zwischen den Tautropfen und den Grashalmen sorgen die feinen Härchen auf den Grashalmen.

Aufhellung um Kopf des eigenen Schattens (Antisolarpunkt) aufgrund von Retroreflexion

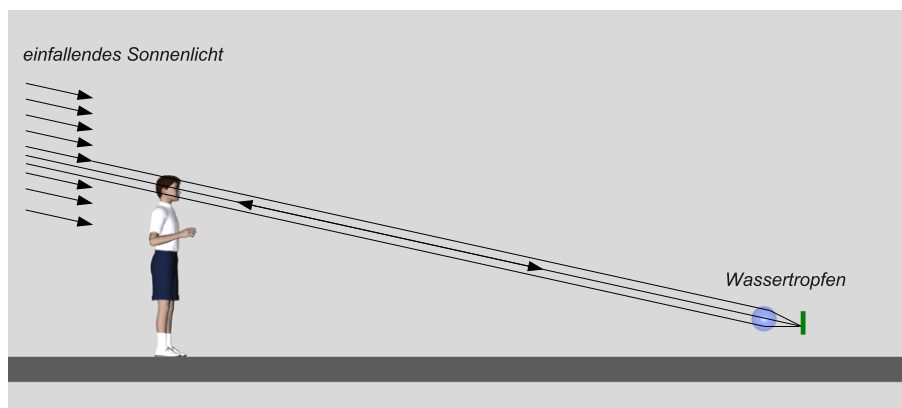


Abbildung 5.8.22: Zur Entstehung des Heiligenschein Phänomens: Das einfallende Licht wird durch Tautropfen auf die Blätter fokussiert, reflektiert (bzw. gestreut) und dann wieder durch denselben Tautropfen kollimiert (parallelisiert).



Abbildung 5.8.23: Heiligenschein Phänomen, Foto mit freundlicher Genehmigung von Eva Seidenfaden, <http://www.paraselene.de>

Das Blatt hat zwar einen geringen Anteil gerichteter Reflexion, hauptsächlich ergibt sich aber eine diffuse Streuung an der Oberfläche. Das einfallende

Licht (egal ob durch einen Wassertropfen fokussiert oder nicht) wird in alle möglichen Richtungen abgelenkt. Nur wenn dieser Streuvorgang in der Nähe der Fokalebene einer (Wasser-)Linse stattfindet, wird das Licht dann wieder – nahezu unabhängig von der Strahlrichtung – parallelisiert und in Richtung der Quelle zurückgeworfen. Je weiter Beobachtungsrichtung und Beleuchtungsrichtung voneinander abweichen, desto geringer ist die wahrgenommene Helligkeit. Daher ist der Effekt am besten beobachtbar, wenn der Schatten des Kopfes klein ist, also je weiter man von den Tropfen entfernt ist.

Nach dieser Erklärung erwartet man, dass die Farbe des reflektierten Lichts dieselbe wie die der Unterlage (Blatt) ist. In der Praxis ergibt sich aber oft eine eher weißliche Aufhellung. Der Grund hierfür ist in der nicht perfekt sphärischen Tropfenform zu sehen. Bei den deformierten Wassertropfen findet an der Rückwand des Tropfens teilweise eine Totalreflexion statt, so dass dieser Lichtanteil wellenlängenunabhängig zur Quelle zurückgeworfen wird.

Diese Form der Retroreflexion wird auch in vielfältiger Weise in der Technik verwendet. Verkehrsschilder haben oft einen entsprechenden Anstrich, bei dem kleine ($50\ \mu\text{m}$ bis $200\ \mu\text{m}$) Glaskügelchen verwendet werden. In diesen Fall liegt der Brennpunkt bei passender Wahl des Brechungsindex gerade auf der hinteren Kugeloberfläche, an der dann das Licht reflektiert wird und seinen Weg zurück zur Lichtquelle nimmt. Alternativ werden die Kügelchen auf reflektierendes Material aufgebracht. Die Kugelgrößen bestimmen insbesondere auch, ob die Wirkung in großem oder eher geringem Abstand vom Verkehrsschild gut ist. Daher werden oft unterschiedliche Kugeldurchmesser gemischt. Auch bei retroreflektierender Kleidung wird dieses Prinzip verwendet. Farbige Retroreflexion erzielt man einfach, indem eine zusätzliche Farbfilterfolie vor der retroreflektierenden Schicht angebracht wird.

In modifizierter Form tritt diese Art der Retroreflexion auch bei den bei Nacht „leuchtenden“ Augen der Katze und vielen weiteren Tieren auf. Einfallendes Licht wird durch die Augenlinse auf die Netzhaut fokussiert. Direkt hinter der Netzhaut der Katze liegt eine Licht reflektierende Schicht (vgl. Abschnitt 7.2). Damit erzielt die Katze eine nahezu doppelte Empfindlichkeit, da das nicht absorbierte Licht reflektiert wird und erneut die Sinneszellen passiert und dort wieder die Chance zur Absorption erhält.²¹ Das restliche Licht geht den Weg zurück, wird also durch die Augenlinse wieder kollimiert (=parallelisiert) und läuft dann zurück in Richtung der Lichtquelle.

Beim Menschen fällt das fokussierte Licht auf die (aufgrund der Durchblutung) rote Netzhaut und wird dort absorbiert. Es ergibt sich der bekannte *rote Augen-Effekt* bei der Fotografie mit Blitzlicht. Dieser Effekt tritt nur dann auf, wenn die Beleuchtung (Blitz) aus nahezu derselben Richtung kommt, aus der die Beobachtung (Objektiv der Kamera) erfolgt. Dies ist bei gewöhnlichen Kameras mit integriertem Blitz aber zwangsläufig der Fall.²²

²¹Eine weitere Empfindlichkeitssteigerung erzielt die *Katze* durch ihre großen Pupillen. Sie erzielt damit die gleiche Blendenzahl wie die *Maus*, nämlich $K=0,9$. Zum Vergleich: Das menschliche Auge muss mit einer Blende von 2 bis 3 (bei maximaler Öffnung) auskommen) und Tiefseefische und Motten erzielen Blendenzahlen von bis zu 0,5.

²²Eine „Rote-Augen-Reduktion“ verwendet vor der eigentlichen Blitzlichtaufnahme einen Vorblitz, mit dem die Weitung der Augenpupillen (geringer Lichteinfall \rightarrow Pupillen weit) drastisch verringert wird. Nur geweitete Pupillen führen zu den großen, rot-leuchtenden Augen.

Retroreflexion bei Verkehrsschildern ...

... und den Augen von Katzen

rote Augen bei der Blitzlichtfotografie



Abbildung 5.8.24: Der „Rote-Augen-Effekt“: Bei der Fotografie mit Blitzlicht wird die gut durchblutete Netzhaut sichtbar. Die weiten Pupillen (Dunkelheit) lassen viel (Blitz)licht eindringen, das an der Netzhaut zurück in Richtung Kamera reflektiert wird. Farbtafel: 12.0.23

5.9 Regenbogen

Das „Lexikon der Optik“²³ beschreibt den Regenbogen etwas unpoetisch als „Atmosphärisch optische Erscheinung bestehend aus farbigen Ringsystemen hervorgerufen durch Brechung und innere Reflexion der Sonnenstrahlen an einer Regen- oder Nebelwand.“



Abbildung 5.9.25: Primärer und sekundärer Regenbogen sowie Aufhellung im Innern des Hauptregenbogens, mit freundlicher Genehmigung von Ian Britton, www.freefoto.com . Farbtafel: 12.0.24

Abbildung 5.9.26 (a) verdeutlicht die nüchterne Definition. Ein auf einen Tropfen einfallender Lichtstrahl wird an der Vorderseite gebrochen, trifft dann

²³H. Haferkorn: „Lexikon der Optik“, Verlag Werner Dausien, Leipzig 1990

die Rückseite des Tropfens, wird dort reflektiert²⁴ und bei seinem Austritt aus dem Tropfen erneut gebrochen. Für die Farben entscheidend ist, dass die Brechzahl des Wassertropfens und damit auch die Ablenkung bei der Brechung für verschiedene Wellenlängen unterschiedlich ist. Ein blauer Strahl wird weniger stark (ca. 40°) als ein roter Strahl (ca. 42°) abgelenkt.²⁵

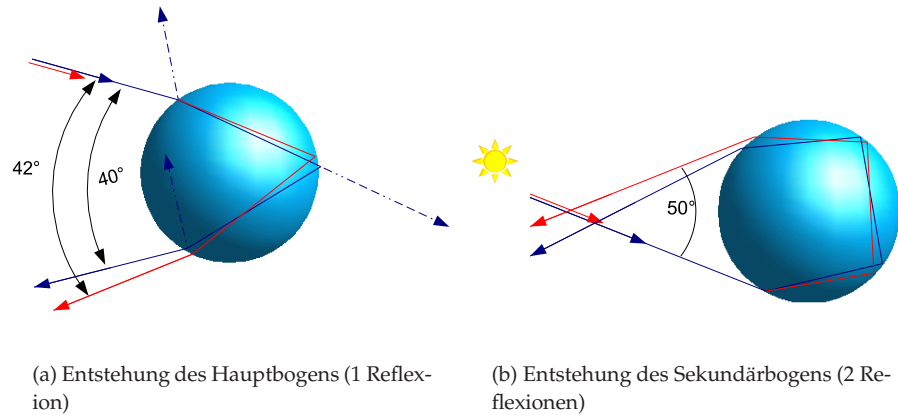


Abbildung 5.9.26: Zur Entstehung des Regenbogens: Beim Hauptbogen wird das Licht sowohl beim Ein- als auch beim Austritt gebrochen und an der Rückseite des Tropfens reflektiert. Beim Sekundärbogen ergeben sich zwei interne Reflexionen im Tropfen.

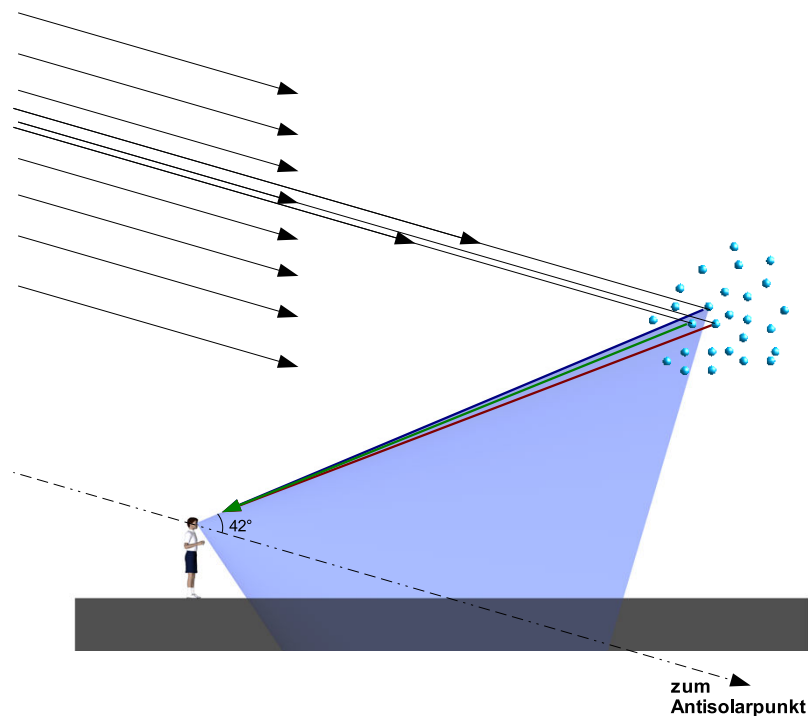


Abbildung 5.9.27: Geometrie des Regenbogens: Der Regenbogen hat seinen Kreismittelpunkt im Antisolarpunkt.

Bereits Aristoteles vermutete, dass der Regenbogen durch Reflexion des Son-

²⁴Dabei handelt es sich um *keine* Totalreflexion. Würde im Innern eine Totalreflexion stattfinden, so würde das Licht aus Symmetriegründen bei einer idealen Kugel andauernd (bei einem realen Tropfen unvorhersehbar oft) weiter reflektiert werden.

²⁵Die Dispersion, die zu dieser Farbaufspaltung führt beträgt bei Wasser ca. $n(\lambda_{blau}) - n(\lambda_{rot}) \approx 0.01$

nenlichts an den Regentropfen zustande kommt. Wissenschaftlich – im Sinne einerseits einer theoretischen Beschreibung, andererseits im Sinne von Experimenten mit einer mit Wasser gefüllten Glaskugel – wurde der Regenbogen erstmals von Theodorich, einem Dominikanermönch, als Folge von Reflexion und Brechung Anfang des 14. Jahrhundert erklärt. Theodorich fand ebenfalls schon die korrekte Erklärung für den Sekundärbogen (s.u.). Zirka drei Jahrhunderte später wurden seine Ergebnisse durch die eingehendere Behandlung von Descartes und Newton weitgehend bestätigt bzw. verfeinert.

Bei parallel einfallendem Licht (Sonne) auf eine Vielzahl von Tropfen ergibt sich, dass für einen Beobachter auf der Erde blaues Licht aus einem Winkelbereich von 40° bezogen auf den Antisolarpunkt erscheint, während rotes Licht unter einem Winkel von ca. 42° erscheint (Abbildung 5.9.27). Die Winkelablenkung ergibt sich für alle Richtungen, so dass der Regenbogen Teil eines Kreises mit dem Antisolarpunkt als Kreismittelpunkt ist. Der rote Rand des Regenbogens liegt also am Kreisbogen außen, der blaue Rand innen.

Direkt über dem Meer kann in der Gischt bzw. dem Nebel auch eine Verringerung um $0,8^\circ$ vom 42° -Winkel beobachtet werden. In diesem Fall führt der Salzgehalt des Wassers zu einer veränderten Brechzahl und damit zu einer anderen Ablenkung.



Abbildung 5.9.28: Roter Regenbogen beim Sonnenuntergang. Farbtafel: 12.0.25

Wenn die Sonne höher als 42° im Zenit steht, dann ist der Antisolarpunkt entsprechend um mehr als 42° unterhalb des Horizonts. Dementsprechend wäre auch der Regenbogen unterhalb des Horizonts, was natürlich nicht möglich ist, denn unterhalb des Horizonts haben wir in der Regel Erde und

Regenbogen in Salzwasser: Leicht geringerer Regenbogenwinkel

Mittags im Sommer ist kein Regenbogen beobachtbar

keinen Regen. Das bedeutet, dass man mittags im Sommer, wenn die Sonne hoch steht, keinen Regenbogen beobachten kann (Ausnahme: aus großer Höhe, z.B. von Berg oder Flugzeug aus).

Die alte Bauernregel „Regenbogen am Abend lässt gut Wetter hoffen, Regenbogen am Morgen lässt für Regen sorgen“ gilt in den meisten Gegenden Deutschlands, da hier der Wind die Wolken vorrangig von Westen nach Osten treibt. Regenwolken wandern also nach Osten und verdecken nicht mehr die am Spätnachmittag im Westen stehende Sonne. Die Sonne kann die Regenfront im Osten beleuchten und es ergibt sich der Regenbogen. Die Wolken ziehen dann aber über Nacht ab. Beim Regenbogen morgens wird Regen von Wolken beleuchtet, die im Lauf des Tages zu uns ziehen.

Einen annähernd vollen Halbkreis sehen Sie dann, wenn die Sonne praktisch selbst am Horizont steht, also bei Sonnenauf- und Sonnenuntergang. Man beachte in diesem Fall aber, dass dann die Farbigkeit des Regenbogens weitgehend verloren geht: Der Regenbogen ist ein roter Bogen, da das Licht des Sonnenuntergangs/aufgangs ja aufgrund der Rayleigh-Streuung nur langwelliges (rotes) Licht enthält (Abbildung 5.9.28). Mehr als einen Halbkreis können Sie nur aus großer Höhe (Flugzeug, Berg) sehen.

roter Regenbogen bei Sonnenuntergang

Entfernung zu den Tropfen meist weniger als 5 km

Der Regenbogen hat keine Position

Die Entfernung von den für den Regenbogen verantwortlichen Tropfen zum Beobachter beträgt meist weniger als 5 km. Da der Regenbogen aber ein reines Phänomen der Lichtablenkung ist, steht der Regenbogen nicht an einem bestimmten Ort im Raum. Wenn Sie sich bewegen, bewegt sich der Regenbogen mit oder verschwindet. Es macht also leider keinen Sinn, sich auf die Suche nach dem berühmten Goldtopf am Ende des Regenbogens zu begeben.

Bei normalem Regen liegen die Tropfendurchmesser im Bereich 0,25 bis 2 mm.²⁶ Typische Fallgeschwindigkeiten der Tropfen liegen zwischen 2 und 9 m/s. Große Regentropfen werden in der Regel beim Fall deutlich deformiert und verlieren so ihre Kugelgestalt. Der klassische Regenbogen kommt entsprechend vor allem durch kleine (kugelförmige) Regentropfen zustande.

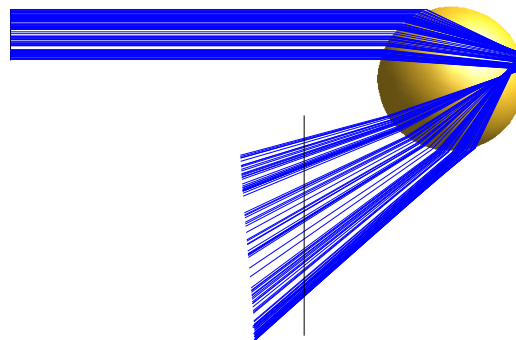


Abbildung 5.9.29: Lichtverlauf bei der Entstehung des primären Regenbogens: Je nach Eintrittsposition auf den Tropfen wird das Licht unterschiedlich abgelenkt (vgl. Abb. 5.9.30)

Verwaschene Farben weil:

1. Sonne ist keine Punktquelle
2. Position der einfallenden Lichtstrahlen auf den Tropfen

Die in Abbildung 5.9.26 dargestellte Erklärung beinhaltet einige Vereinfachungen. Zunächst hat die Sonne eine gewisse Ausdehnung und daher ist das einfallende Licht nicht perfekt parallel, sondern weist ein gewisses Winkelspektrum auf. Es fallen auf die Wassertropfen also Strahlen aus unterschiedlichen Winkeln und dementsprechend sind auch die Ausgangswinkel

²⁶Bei Nieselregen liegen die Tropfendurchmesser zwischen 50 μm und 0,25 mm

unterschiedlich. Weiterhin hängt die Winkelablenkung und damit der Ausganswinkel nicht nur vom Einfallswinkel ab, sondern auch von der Position des einfallenden Lichtstrahls auf den Wassertropfen (Abbildung 5.9.29). Beide Effekte führen dazu, dass die Regenbogenfarben nicht spektral rein sind, sondern verwaschen erscheinen.

Die Abhängigkeit von der Position des einfallenden Strahls scheint zunächst dazu zu führen, dass das ganze überhaupt nicht funktioniert und die Farbenpracht des Regenbogens verloren geht. Eine detaillierte Analyse des Ablenkungswinkels zeigt aber, dass Ablenkungswinkel nahe des maximalen Ablenkungswinkels deutlich häufiger vorkommen als andere. Genau dieser Winkelbereich (eben ca. 42° für rotes Licht) ist ausschlaggebend (Abb. 5.9.30).

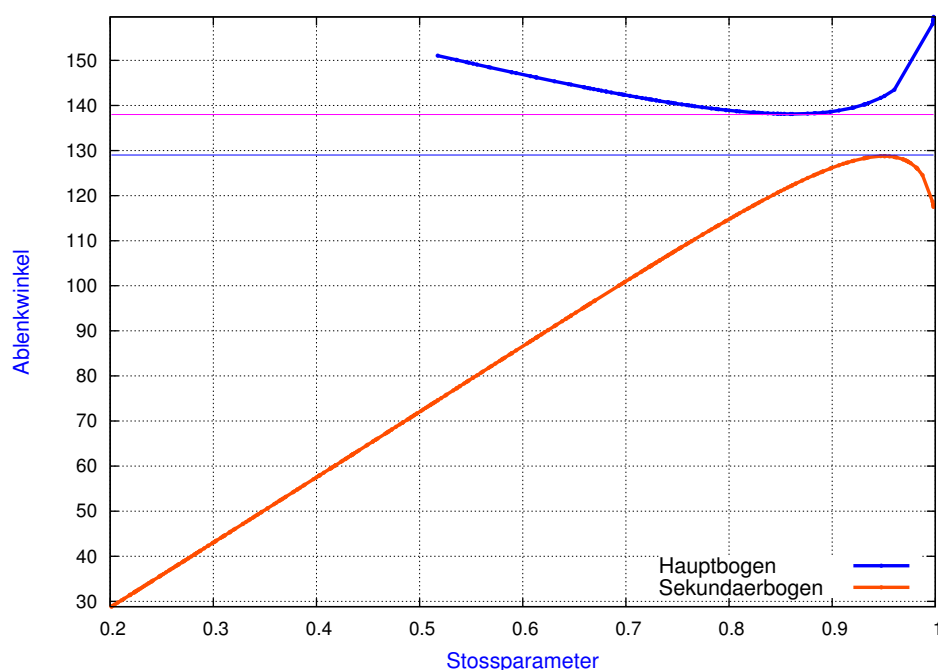


Abbildung 5.9.30: Ablenkungswinkel eines einfallenden Strahls in Abhängigkeit von der normierten radialen Einfallposition ($r = 0$ bis 1) eines Lichtstrahls auf den Regentropfen ($n=1,33$). Für den primären Regentropfen ergibt sich eine Häufung des Ablenkungswinkels bei 138° . Dies entspricht dem Regenbogenwinkel von 42° ($180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$). Entsprechend tritt für den deutlich schwächeren sekundären Bogen (Nebenbogen) eine Häufung bei ca. 129° bzw. 51° auf ($180^\circ - 129^\circ = 51^\circ$). Zwischen den beiden Bögen ist es offensichtlich vergleichsweise dunkel (Alexanders dunkles Band), da keine Ablenkung in den Bereich zwischen 129° und 138° erfolgt.

Dieses lokale Maximum lässt sich sogar analytisch angeben:²⁷

$$D_1 = 2 \arccos \left[\frac{1}{n^2} \left(\frac{4 - n^2}{3} \right)^{3/2} \right] \quad (5.26)$$

Die restlichen Winkel sorgen dafür, dass der Regenbogen eben weniger farbesättigt ist als beispielsweise das durch ein Prisma abgelenkte Licht und ein Teil des Lichts in den Innenraum des durch den Regenbogen begrenzten Kreises abgelenkt wird (s.u.).

Für eine quantitative Beschreibung der Lichtintensität ist neben der Häufung der Ablenkungswinkel für 42° (rotes Licht) auch zu berücksichtigen, dass bestimmte

²⁷Adam, Applied Optics 47, H11 (2008)

Einfallspositionen häufiger vorkommen als andere. Alle Strahlen, die in einen bestimmten Kreisring fallen, entsprechen derselben Einfallsposition. Natürlich nimmt die Fläche eines solchen Rings mit der Entfernung vom Zentrum des Tropfens zu und dementsprechend fällt viel Licht in diese Einfallsposition.

Sekundärbogen aufgrund von doppelter Reflexion im Tropfen

Wenn ein Regenbogen besonders gut sichtbar ist, dann kann man oft auch einen parallel zum ersten Bogen verlaufenden *Sekundärbogen* beobachten. Dieser Bogen kommt ähnlich wie der Hauptbogen zustande. Im Gegensatz zu ihm wird das Licht aber *zweimal* im Innern der Wassertropfen reflektiert bevor es den Tropfen wieder verlässt (siehe Abb. 5.9.26 (b)). Eine Analyse wie beim Hauptbogen ergibt eine Ablenkung von 51° für rotes Licht. Die Intensität des Sekundärbogens ist deutlich reduziert (43% der Intensität des Hauptbogens). Bei beiden Reflexion im Innern des Tropfens wird lediglich ein Teil des Lichts reflektiert, während der restliche Anteil den Tropfen verlässt und gebrochen wird. Noch höhere Ordnungen (entsprechend weiteren internen Reflexionen) sind mit dem bloßen Auge nicht beobachtbar. Hierfür sind zum einen die Helligkeitsverluste bei jeder internen Reflexion und zum anderen die Verbreiterung des Winkelbereichs mit der Anzahl interner Reflexionen verantwortlich.

Alexanders Band: Dunkelbereich zwischen Haupt- und Nebbogen

Der Bereich zwischen Haupt- und Nebbogen ist verdunkelt, da das Licht beim Hauptbogen (eine Reflexion) in den Innenbereich abgelenkt wird und beim Sekundärbogen in den Außenbereich gelenkt wird. Der Dunkelbereich wird auch als *Alexanders dunkles Band* bezeichnet.

Prinzipiell lässt sich ein Regenbogen natürlich auch durch andere Lichtquellen als die Sonne realisieren. In Abb. 5.9.31 ist ein besonders schönes Beispiel eines (sehr seltenen) *Mondbogen* zu sehen.



Abbildung 5.9.31: Mondbogen über Madeira, Foto mit freundlicher Genehmigung von Martin Weickgenannt.

Abb. 5.9.32 zeigt einen Regenbogen mit zusätzlichen Hellbereichen im Innern des Bogens, die auf den Antisolarpunkt zulaufen. Es handelt sich hierbei um eine Kombination von Regenbogen und Gegendämmerungsstrahlen. Wenn alle Wassertropfen eine ähnliche Größe aufweisen, ist auch die Beugung von Belang. Im Abschnitt 7.8 wird auf die sich beim Regenbogen ergebenden Beu-

Supernumeraries: Nebenbögen aufgrund der Beugung

gungsphänomene näher eingegangen.



Abbildung 5.9.32: Kombination von Regenbogen und Gegendämmerungsstrahlen. Die Gegendämmerungsstrahlen laufen auf den Antisolarpunkt zu. Farbtafel: 12.0.26

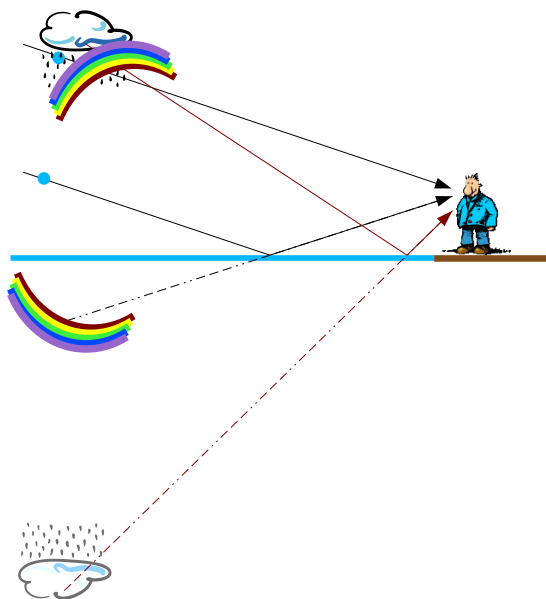


Abbildung 5.9.33: Der Reflexionsbogen liegt an einer anderen Stelle als gewöhnlich gespiegelte Objekte, weil Regenbögen Winkelphänomene sind.

Zu sogenannten *Reflexions-Regenbögen* kann es auf zwei unterschiedliche Weisen kommen. Im ersten Fall wird das vom Wassertropfen reflektierte und gebrochene Licht von einer spiegelnden Fläche (in der Regel Wasser) reflektiert. Dabei ist zu beachten, dass der reflektierte Regenbogen an einer anderen Position erscheint wie gewöhnlich gespiegelte Objekte. In Abbildung 5.9.33 scheinen der gewöhnliche Regenbogen und die Wolke an derselben Position zu liegen, während das Spiegelbild der Wolke deutlich vom Reflexionsregenbogen getrennt ist. Der Grund hierfür ist wieder darin zu sehen, dass sowohl Regenbögen als auch Reflexionsregenbögen keine Position haben, sondern ein reines Winkelphänomen sind.

Reflexionsbögen: Spiegelung des Lichts nach oder vor dem Wassertropfen



Abbildung 5.9.34: Hauptbogen, Sekundärbogen und Reflexionsbogen, mit freundlicher Genehmigung von Ann Bowker, <http://www.madaboutmountains.com> . Farbtafel: 12.0.27

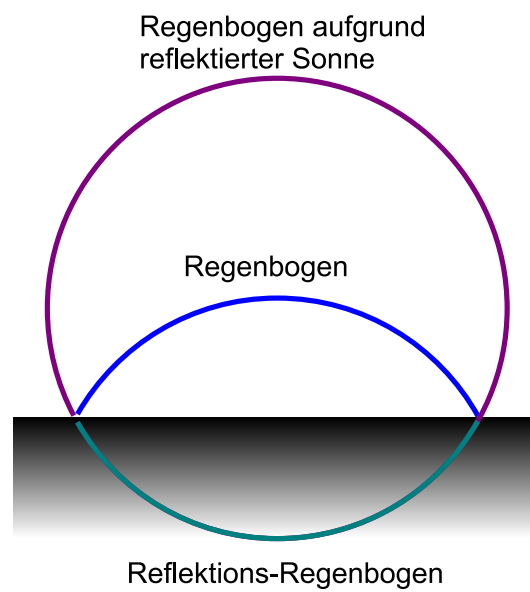


Abbildung 5.9.35: Reflexionsbögen

Die Reflexion kann aber auch noch auf eine andere Weise zu einem Reflexionsregenbogen führen. In diesem Fall wird das Sonnenlicht reflektiert, *bevor* es auf den Wassertropfen trifft (siehe Abb. 5.9.34). Die Lage der beiden Reflexionsregenbögen in Bezug zum konventionellen Regenbogen ist in Abbildung 5.9.35 dargestellt.



Abbildung 5.9.36: Nebelbogen, Foto mit freundlicher Genehmigung von K. Kaiser, <http://home.eduhi.at/member/nature/default.htm>. Farbtafel: 12.0.28

Ein *Nebelbogen* schließlich ist eigentlich einfach ein Regenbogen in einer Nebelwand. Der Nebel besteht ja ebenfalls aus Wassertropfen, so dass auch hier dieselbe Grunderklärung greift. Nebelbögen sind weitgehend farblos (siehe Abb. 5.9.36). Dies liegt daran, dass die Nebeltröpfchen viel kleiner als Regentropfen sind und daher die Beugungseffekte an den Tropfen viel stärker sind und ebenfalls zu einer starken Farbaufspaltung führen (siehe Kapitel 7). Allerdings hängt diese Farbaufspaltung stark von der Tropfengröße ab und da die Tropfen im Nebel stark unterschiedliche Größe aufweisen, findet man alle möglichen Farbaufspaltungen und hat deshalb in Summe eine Farbmischung vieler Farben und daher einen weißen Bogen.

Nebelbogen: Regenbogen an den sehr kleinen Nebeltropfen

Beugung dominiert

Für verschiedene Regenarten und Nebel können Sie von den in Tabelle 5.9 gelisteten Tropfengrößen ausgehen:

	Menge [mm/h]	Durchmesser [mm]
Nebel	0,125	0,01
Sprühregen	0,25	0,96
leichter Regen	1,0	1,24
mäßiger Regen	3,75	1,60
starker Regen	15	2,05
Wolkenbruch	100	2,85

Kapitel 6

Reflexion

*"I xeroxed a mirror. Now I have an extra xerox machine."
(Steven Wright)*

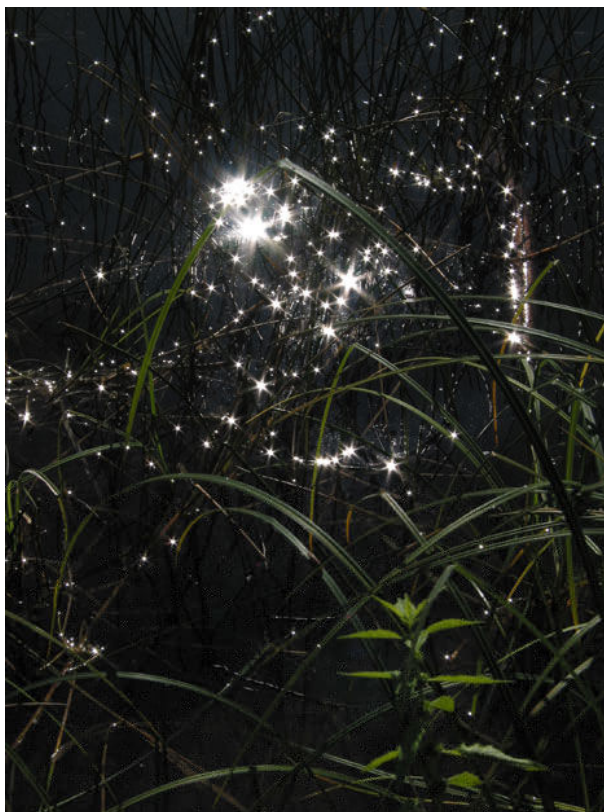


Abbildung 6.0.1: Reflexionen, Foto mit freundlicher Genehmigung von Eva Seidenfaden, <http://www.paraselene.de>

Reflexionen begegnen uns täglich und in vielfältiger Form. Das beginnt bereits beim morgendlichen Blick in den Badezimmerspiegel. Wir sehen Spiegelungen an Fensterscheiben, auf Wasserflächen oder Bodenbelägen und meistens ist das für uns so gewohnt, dass es nicht weiter auffällt. Die Spiegelungen

werden also gesehen, aber nicht wahrgenommen. Neben ebenen spiegelnden Flächen haben wir es auch mit gekrümmten Spiegeln zu tun. Ein Beispiel sind die Rückspiegel im Auto, die uns einen größeren Sichtbereich gestatten. Andere Beispiele sind deformierte Spiegel, wie wir sie oft bei Gewässern oder auch großen Fensterfronten beobachten. Neben diesen alltäglichen Erscheinungen gibt es eine Klasse von sehr eindrucksvollen atmosphärischen Phänomenen, die wesentlich auf Reflexion und Brechung basieren, die sogenannten Halos.

6.1 Reflexionsgesetz

Das wohl jedem bekannte Reflexionsgesetz der Form „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ lässt sich – wie auch das Brechungsgesetz – auf verschiedene Arten ableiten. Wir wollen wieder das bereits bekannte Fermatsche Prinzip anwenden. In Abb. 6.1.2 läuft ein Lichtstrahl ausgehend von A auf einen Spiegel und wird dort in C reflektiert. Mit den Bezeichnungen aus Abb. 6.1.2 und dem Satz von Pythagoras kann man für den Weg des Lichts von A über C zum Zielpunkt B direkt

$$L = \sqrt{(a-x)^2 + 1} + \sqrt{x^2 + 1} \quad (6.1)$$

angeben.

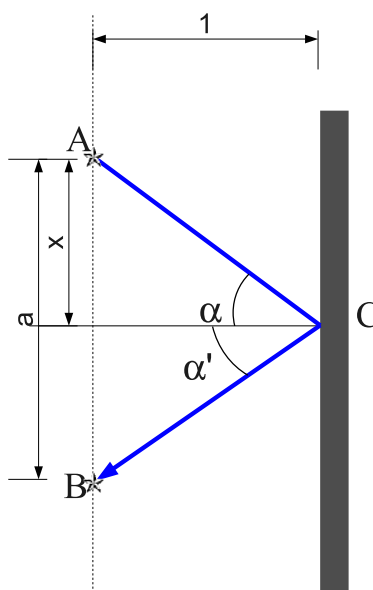


Abbildung 6.1.2: Zur Ableitung des Reflexionsgesetzes aus dem Fermatschen Prinzip

Die Ableitung nach dem gesuchten x und Gleichsetzen mit Null (wir suchen ja den extremalen Weg) ergibt bei konstanter Brechzahl n :

$$\frac{dL}{dx} = 0 = -\frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2 + 1}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + 1}} \quad (6.2)$$

Nach elementaren Umformungen erhält man

$$x = \frac{a}{2} \quad (6.3)$$

Damit ist aber klar, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist.

Fermatsches Prinzip zur
Ableitung des Reflexionsgesetzes

Einfallswinkel = Ausfallswinkel

Das Reflexionsgesetz ist an sich recht einfach, erweist sich aber selbst bei ebenen reflektierenden Flächen in drei Dimensionen als weniger trivial als man zunächst annehmen würde. Abbildung 6.1.3 zeigt eine typische Szene, bei der eine Reflexion an der Wasseroberfläche auftritt. Wie man klar sieht, ist das gespiegelte Bild der Landschaft im mathematischen Sinne keine einfache Spiegelung.

Spiegelbild einer dreidimensionalen Szene auf Netzhaut oder Foto: kompliziert !



Abbildung 6.1.3: Bei Spiegelungen im dreidimensionalen Raum kann man nicht einfach das zweidimensionale Bild spiegeln. Suchen Sie eine Spiegelebene (bzw. im Bild eine Spiegelgerade), an der die gesamte Szene korrekt gespiegelt wird. Keine entsprechende Gerade existiert.

Um die Spiegelung korrekt zu begreifen, muss man sie im dreidimensionalen Raum (und nicht in einem zweidimensionalen) Bild betrachten. Abb. 6.1.4 verdeutlicht den Zusammenhang. Die horizontale schwarze Linie stelle eine spiegelnde Fläche dar. An dieser Fläche wird die dreidimensionale Szene im mathematischen Sinne gespiegelt. Für den Betrachter liegen zwar die drei Originalobjekte (Baum, Haustüre, Hund) auf einer Höhe, die gespiegelten Bilder liegen aber eben aufgrund der Perspektive nicht auf selber Höhe.

*1. Spiegelung in 3D
2. Perspektive*

Allgemein bekommt man also das Bild einer sich spiegelnden Szene indem man zunächst im dreidimensionalen Raum die mathematische Spiegelung an der Spiegelebene durchführt. Die gespiegelten Objekte haben dann wieder jeweils eine eindeutige Position im dreidimensionalen Raum. Je nach Standpunkt des Beobachters liegen die Projektionen dieser Punkte auf der Netzhaut des Auges — oder dem Film der Kamera — an unterschiedlichen Positionen.

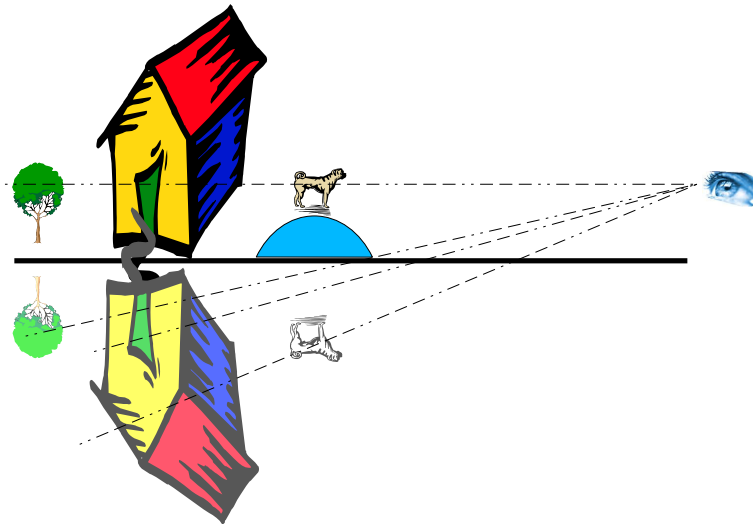


Abbildung 6.1.4: Bei Spiegelungen im dreidimensionalen Raum kann man nicht einfach das zweidimensionale Bild spiegeln. Stattdessen muss zunächst im Dreidimensionalen gespiegelt werden. Danach kann das sich ergebende Bild bestimmt werden, indem eine perspektivisch korrekte Abbildung vorgenommen wird.

Spiegel vertauschen weder rechts und links noch oben und unten

Beim Blick in einen Spiegel haben Sie sich vielleicht auch schon gefragt, warum ein Spiegel rechts und links, nicht aber oben und unten vertauscht. Wo liegt der Grund für diese Asymmetrie, die ja in dem physikalischen Gesetz der Reflexion nicht vorhanden ist? Die Auflösung des Rätsels ist sehr einfach: Der Spiegel vertauscht weder oben und unten noch rechts und links. Sie haben nur den Eindruck, dass rechts und links vertauscht sind, da sie sich automatisch in die gespiegelte Person hinein versetzen. Wenn Sie Bedenken haben: Heben Sie die rechte Hand und Sie werden sehen, dass auch das Spiegelbild eine Hand hebt und zwar die Hand, die aus Ihrer Sicht rechts ist. Wenn allerdings eine reale Person (und kein Spiegelbild) vor Ihnen stehen würde, dann würde diese zwar ebenfalls eine Hand heben, die aus Ihrer Sicht rechts ist, aber aus Sicht dieser Person natürlich die linke Hand wäre. Die Vertauschung von Rechts und Links ist daher ein rein psychologischer Effekt.

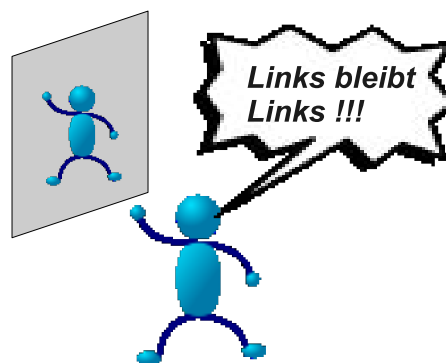


Abbildung 6.1.5: Spiegel führen weder zu einer Vertauschung von oben und unten noch zu einer Vertauschung von rechts und links.

Wenn Sie sich im Spiegel betrachten, können Sie oft nur einen Teil von sich sehen (begrenzte Spiegelgröße). Nehmen wir an, dass Sie Ihre Füße im Spiegel nicht sehen, dies aber gern tun würden (Schuhkauf). Erstaunlicherweise nützt es nichts, Ihren Abstand zum Spiegel zu ändern. Abb. 6.1.6 zeigt, dass in der

Tat die Höhe, die sie gerade eben noch sehen (z.B. das Knie), konstant bleibt.¹ Im übrigen muss der Spiegel gerade halb so groß wie Sie sein, wenn Sie sich komplett darin sehen wollen.

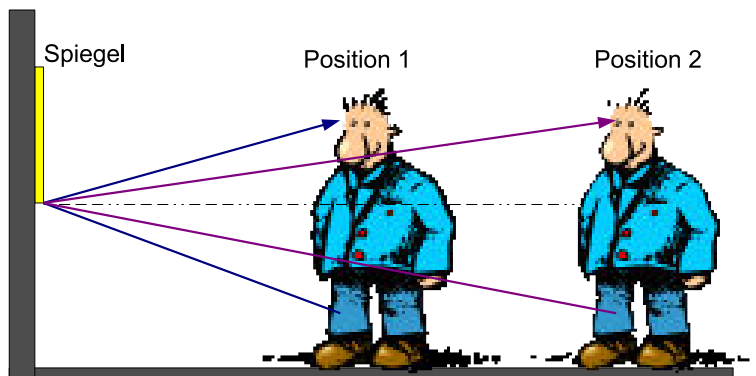


Abbildung 6.1.6: Wenn Sie mehr von sich im Spiegel sehen wollen, nützt es nichts, einen größeren Abstand zu wählen.

Gehen wir zu einem kleineren Spiegel über, den wir z.B. zur Kommunikation mit einem weit entfernten Beobachter nutzen können. Die Reflexion der Sonne in einem Spiegel ergibt ein zunächst merkwürdiges Verhalten. Nahe beim Spiegel hat das reflektierte Lichtfeld dieselbe Form wie der Spiegel und ist damit bei einem rechteckigen Spiegel eben rechteckig.

Je weiter man aber vom Spiegel weg geht, desto runder wird der reflektierte Lichtfleck. In diesem Fall ergibt sich wieder ein Bild der (runden) Sonne und man hat einen Fall analog der Lochkamera aus Abb. 2.3.13, nur dass in diesem Fall die Lochapertur durch eine spiegelnde Apertur ersetzt wurde.²

Nehmen wir an, wir wollen die Sonne an einem kleinen Spiegel zum Senden von Notsignalen spiegeln (Optiker auf einsamer Insel signalisiert dem Flugzeug per Taschenspiegel S.O.S.). Hier könnten wir – wenn die Sonne punktförmig wäre – ziemlich weit mit dem Spiegel Signale senden; aufgrund der Absorption und Streuung in der Erdatmosphäre sowie der Beugung zwar nicht unendlich weit, aber doch sehr weit. Da von der Sonne aufgrund ihrer Ausdehnung aber divergentes Licht ausgeht und wir damit das Lochkammermodell verwenden müssen, nimmt der ausgeleuchtete Bereich bzw. die Bildgröße der Sonne linear mit der Entfernung zu. Dementsprechend nimmt die Bestrahlungsstärke einer Fläche aber quadratisch mit der Entfernung ab. Und aus diesem Grund können wir mit dem Spiegel „nur“ über vergleichsweise kurze Entfernungen Signale senden (mit einem 5 x 5 cm Spiegel kommt man laut Minnaert auf ca. 13 km).

Der Spiegel als Lochkamera

Spiegel als Signalgeber: Nur bis ca. 13 km Entfernung

6.2 Spiegeloptik

Noch komplizierter wird es natürlich, wenn wir nicht nur ebene Flächen, sondern gekrümmte Spiegelflächen zulassen. Im einfachsten Fall kann durch eine sphärische oder parabolische Form eine fokussierende Wirkung erzielt werden.

¹Dies gilt allerdings nur, wenn der Spiegel exakt senkrecht zum Boden aufgehängt ist.

²Für die bereits tiefer in die mathematische Optik Eingeweihten: der Spiegel ist bei großem Abstand in einer (Pseudo) Fourierebene, während das Nahfeld hinter dem Spiegel durch die Fresneltransformation beschrieben werden muss. Diese erhält bei kurzem Abstand die Form der Apertur.

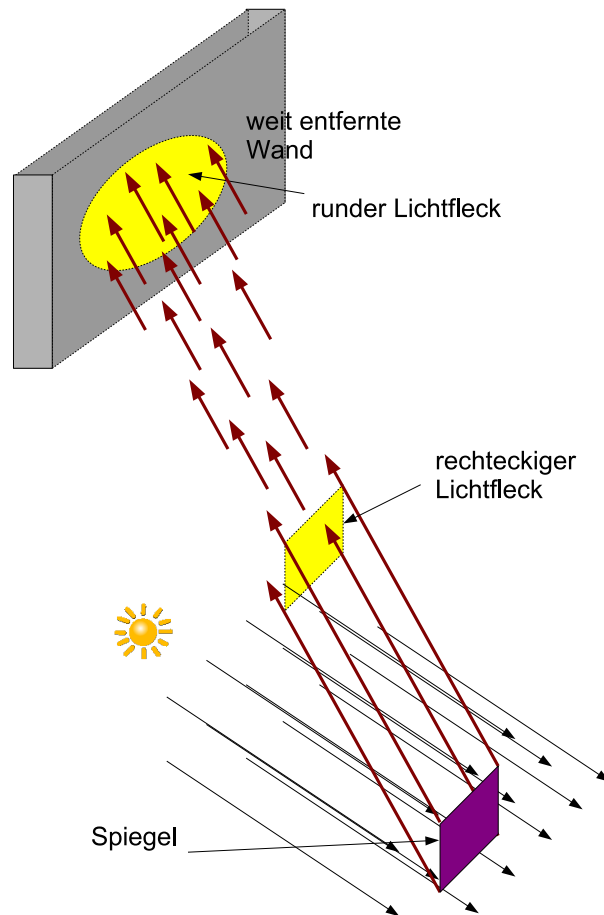


Abbildung 6.1.7: Beim Einsatz eines rechteckigen Spiegels zur Umleitung von parallel einfallendem Licht ändert sich die Geometrie der Lichtverteilung mit dem Abstand vom Spiegel. Die zunächst rechteckige Reflexion wird rund. Der Spiegel wirkt dann wie eine Lochkamera zur Abbildung der Sonne.

Abb. 6.2.8 zeigt ein Bild der berühmten archimedischen Brennspiegel, mit denen angeblich die Verteidiger von Syrakus die römischen Schiffe in Brand gesetzt haben sollen.

Archimedes und das
Entzünden von Segeln



Abbildung 6.2.8: Archimedes verteidigt Syrakus durch den Einsatz von Brennspiegeln, Scan mit freundlicher Genehmigung von Chris Rorres.

Eine einfache Abschätzung zeigt uns, dass dies wohl eher ein Mythos ist. Aus der Erfahrung wissen wir, dass mit einer Lupe vom Durchmesser 50 mm und der Brennweite 100 mm Papier (es ist anzunehmen, dass Segeltuch eher schlechter entflammbar ist) entflammt werden kann. Um die Schiffe in 100 m Entfernung³ anzugreifen, ist eine Brennweite des Spiegels von $f'_2 = 100$ m notwendig. Im Vergleich zu der Brennweite von $f'_1 = 100$ mm ergibt sich damit ein 1000-fach größeres Abbild der Sonne, denn der Abbildungsmaßstab ist laut Gl. 2.5 durch $\beta' = a'/a = f'/a$ gegeben. Das Licht der Sonne wird damit um den Faktor 1000^2 geringer konzentriert (Fläche ist proportional zu β^2). Um dies auszugleichen, muss die Fläche des Spiegels ebenfalls um den Faktor 1000^2 größer sein. Damit muss der Durchmesser des Spiegels um den Faktor 1000 größer sein als der der Linse, also 50 m betragen. Ein sicher für die damalige Zeit völlig unrealistischer Wert. Wenn wir davon ausgehen, dass Spiegel mit Durchmessern von 5 m hergestellt werden konnten, dann sind dafür aber immerhin 100 Stück gleichzeitig zu steuern und auf dasselbe Ziel auszurichten. In Anbetracht dessen, dass aber auch damit nur Papier entflammbar ist, scheint die ganze Geschichte eher unrealistisch.

Außer zum Entzünden von Schiffen eignen sich sphärische Spiegel natürlich ganz generell als Komponenten in Abbildungs- und Beleuchtungssystemen. Ein Kugelspiegel hat seine Brennweite beim halben Wert seines Krümmungsradius. Das heißt, dass ein Konkavspiegel mit Krümmungsradius 1 m parallel einfallendes Licht in einen Punkt im Abstand 0,5 m von der Kugeloberfläche fokussiert. Andererseits wird nach der Abbildungsgleichung 2.5 ein Objekt im Abstand 1 m wieder auf sich selbst (aber invertiert) abgebildet.

Kugelspiegel: Brennweite = halber Krümmungsradius



Abbildung 6.2.9: Reelle Abbildungen mit einem Konkavspiegel (MAGIC Teleskop, La Palma). Das reelle Zwischenbild der umgebenden Landschaft steht auf dem Kopf und wird fotografiert. Foto mit freundlicher Genehmigung von T. Schoder.

Das reelle Bild, das ein Kugelspiegel für Objekte generiert, kann genutzt werden, um Objekte scheinbar im Raum schweben zu lassen. Hierzu muss das Objekt nur außeraxial angebracht werden (so dass der Beobachter das Objekt nicht direkt sehen kann). Das reelle Bild schwebt dann im Raum (siehe Abb. 6.2.10).

³Ein Einsatz auf kürzere Entfernungen macht wohl wenig Sinn, da in diesem Fall auch brennende Pfeile effizienter zum Einsatz kommen können.

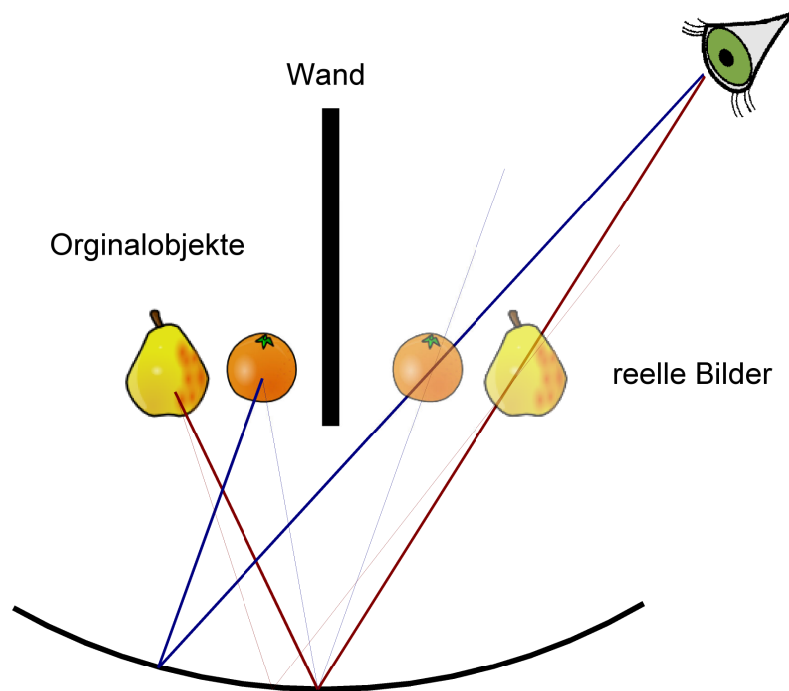


Abbildung 6.2.10: Reelle Abbildungen mit einer konkaven Kugel



Abbildung 6.2.11: Virtuelle Abbildung des gesamten Raumes durch eine Konvexkugel, Foto mit freundlicher Genehmigung von E. Steinbeisser

Nicht nur Konkavspiegel sondern auch Konvexspiegel zeigen erstaunliche Eigenschaften. Spiegelnde Kugeln (z.B. Christbaumkugeln) zeigen dem Betrachter den gesamten Raum mit Ausnahme des kleinen Bereichs direkt hinter der Kugel (Abb. 6.2.11). Der die Kugel umschließende Raum wird dabei so verzerrt, dass er auf eine zweidimensionale Fläche (das Abbild der Kugeloberfläche in unserem Augen oder auf einem Foto) passt. Direkt am Rand der Kugel ist die Abbildung unendlich stark verzerrt, so dass man hier zwar in der Praxis nichts mehr erkennen kann, prinzipiell ist aber die gesamte Information des Raumes im Bild enthalten. Wie in Abb. 6.2.12 gezeigt, wird ein Objektwinkel α auf den Punkt P im Abstand $r = R \sin(\alpha/2)$ abgebildet, wenn wir den Radius der Kugel mit R bezeichnen. Am Beispiel einer Seifenblase können Sie gleichzeitig konvexe und konkave Spiegelungen betrachten (siehe Abb. 6.2.13).

Spiegelnde Kugeln bilden den gesamten Raum verzerrt auf die dem Beobachter zugewandte Kugeloberfläche ab

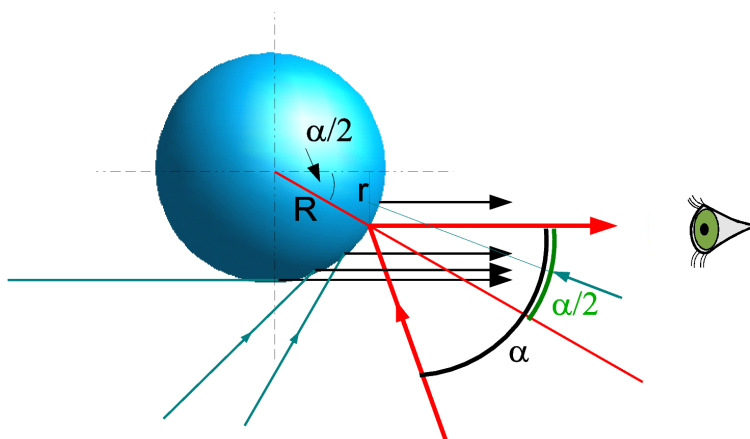


Abbildung 6.2.12: Geometrie zur Lichtablenkung bei der Konvexkugel

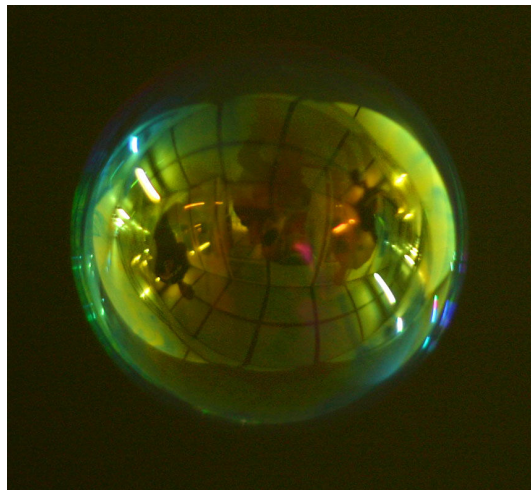


Abbildung 6.2.13: Eine Seifenblase kann gleichzeitig als Konvex- und Konkavspiegel dienen. Entsprechend sieht man gleichzeitig ein aufrechtes und ein invertiertes Bild. Eines der beiden Bilder ist dabei (eine entsprechend geringe Tiefenschärfe vorausgesetzt) leicht unscharf). Farbtafel: 12.0.29

Weniger stark gekrümmte Konvexspiegel werden auch gerne als Rückspiegel bei Autos eingesetzt. Ziel ist es, dem Betrachter einen vergrößerten Bildbereich zur Verfügung zu stellen und so z.B. den „toten Winkel“ zu reduzieren. Die Brennweite eines solchen Spiegels ist negativ ($f' = -2/r$). Gemäß der Abbil-



Abbildung 6.2.14: Liegen die Bilder von Objekten im Konvexspiegel nun näher oder weiter entfernt?

Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{f'} \quad (6.4)$$

ergibt sich dann

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} - \frac{2}{r} \quad (6.5)$$

Wenn man nun bedenkt, dass beide Terme auf der rechten Seite von Gleichung 6.5 negativ sind, dann wird die Bildposition a' zum einen ebenfalls negativ, zum anderen wird der Betrag dieser Größe geringer als die Objektentfernung. Mit anderen Worten: Das Bild liegt näher beim Betrachter als das Originalobjekt. Dies steht aber im Gegensatz zu den auf solchen Spiegeln oft vermerkten Warnhinweisen („Warning ! Objects in mirror are closer than they appear“). Nach diesem Hinweis zu urteilen sollte das Originalobjekt näher beim Betrachter liegen.

Warning ! Objects in mirror are closer than they appear

Dieses Paradox löst sich auf, wenn man einbezieht, wie der Mensch in diesem Fall die Entfernung zum Objekt bestimmt. Dabei verlässt er sich nämlich nicht auf sein Stereosehen oder die Fokussierung (Akkommodation), sondern bestimmt die Entfernung aus der Bildgröße ihm bekannter Objekte (vgl. Abschnitt 11.1). Die Bildgröße ist hier aber reduziert, weil der Abbildungsmaßstab kleiner 1 ist:

$$|\beta'| = \left| \frac{a'}{a} \right| < 1 \quad (6.6)$$

Somit wird klar, warum die Warnung tatsächlich berechtigt ist. Entscheidend für die Entfernungsermittlung ist also hier nicht die tatsächliche Entfernung des Bildes, sondern die Bildgröße.

Deflektometrie: Berechnung einer Spiegeldeformation aus der Bildverzerrung, die der Spiegel erzeugt

Aus der Verzerrung des Bildes eines bekannten Objekts können Sie auch auf die Form des spiegelnden Elements zurück schließen. Gut zu beobachten ist dies insbesondere bei spiegelnden Fensterfronten. Wenn Sie ein entferntes Objekt über die Fensterfront beobachten, dann ergibt sich in aller Regel eine Verzerrung denn die Fensterscheiben sind nicht perfekt eben (Abb. 6.2.15). Wenn der

Abstand des Objekts zum Spiegel bekannt ist (bzw. geschätzt werden kann), kann wie in Abb. 6.2.16 veranschaulicht die lokale Neigung α des Spiegels aus der Ablenkung Δy mittels

$$\Delta y = z \tan(2\alpha) \quad (6.7)$$

bestimmt werden. Das Verfahren – man spricht von *Deflektometrie* – liefert damit die Ableitung (Steigung) der Oberfläche. Es eignet sich sehr gut zum einfachen (mit unbewaffnetem Auge) Test der Ebenheit, kann aber auch automatisiert zur Prüfung optischer Flächen (z.B. Gleitsichtgläser) verwendet werden.



Abbildung 6.2.15: Beispiel für eine deflektometrische Abbildung bei gekrümmter Oberfläche.

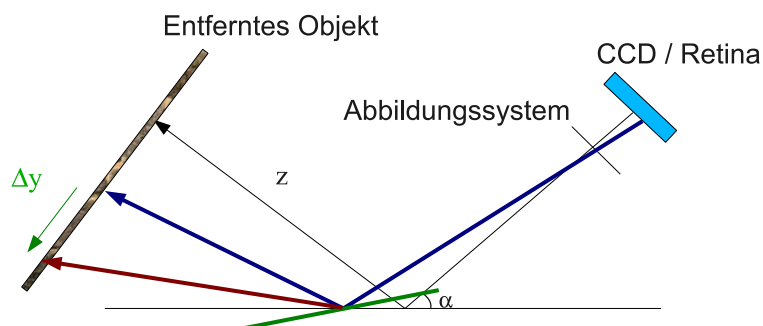


Abbildung 6.2.16: Prinzip der Deflektometrie: Die lokale Oberflächenneigung kann aus der Verzerrung des betrachteten Bildes ermittelt werden.

Das Paradebeispiel der Deflektometrie in der Natur ist die Spiegelung an einer Wasseroberfläche. Solange das Wasser sehr ruhig ist, ergibt sich eine unverzerrte Reflexion der Umgebung. Sobald Wellen aufkommen, ist das Bild lokal verzerrt. Aus der Verzerrung lässt sich auf die Wellenfront zurückrechnen. Sobald die Wellen bzw. Kräuselungen der Wasseroberfläche sehr starke Gradienten haben, also die Wellen hochfrequent sind, ist überhaupt keine sinnvolle

Wellen und gekräuselte Wasseroberflächen

Reflexion mehr sichtbar. Die Verzerrungen sind so stark, dass kein sinnvoller Bildeindruck mehr entsteht.

Lichtkreuze aufgrund von deformierten Fenstern

Die Reflexion des (parallelen) Sonnenlichts an Fensterscheiben ergibt nur dann ein homogenes Lichtfeld, wenn die Fensterscheibe eben ist. Vergleichsweise oft führt die Einspannung rechteckiger Fensterscheiben zu einer Verformung, die in einem kreuzförmigen Lichtfeld resultiert (Abb. 6.2.17). Abb. 6.2.18 veranschaulicht das Zustandekommen: Ein Druck auf die roten Punkte führt zu einer zylindrischen Verformung des Spiegels entlang der Diagonale von rechts oben nach links unten. Entsprechend ergibt sich eine Fokussierung auf eine Linie von rechts oben nach links unten. Analog hierzu führt der Druck auf die schwarzen Punkte zu einer zylindrischen Verformung und damit einer Linie von links oben nach rechts unten. Die Kreuze sind natürlich nur dann als schöne Kreuze sichtbar, wenn die Auffangebene, also die gegenüberliegende Häuserfront, auf denen die Kreuze sichtbar werden, in der passenden Entfernung (Brennweite) der sich ergebenden Zylinderlinsen steht.

In der Realität ist der Grund in der Verformung der Fenster nicht in einem Druck auf die Rahmen, sondern in einem flächenhaften Druck auf die Gesamtscheibe zu sehen.⁴ Weiterhin ist die Verformung komplexer und kann nicht einfach in die beiden Zylinderanteile aufgespalten werden. Qualitativ erklärt das Einfachmodell aber die Kreuze.



Abbildung 6.2.17: Lichtkreuze aufgrund der Reflexion an durchgebogenen Fensterscheiben

⁴H.J. Schlichting, V. Nordmeier, Physik in unserer Zeit 3, S. 129, 2000.

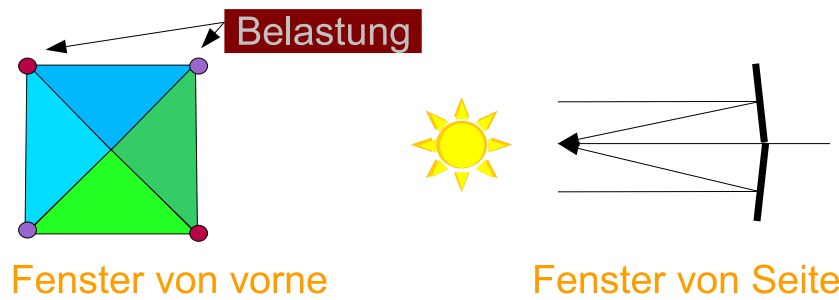


Abbildung 6.2.18: Die Lichtkreuze ergeben sich, da entlang der Fensterdiagonalen annähernd Zylinderlinsen ausgebildet werden.

6.3 Fresnel Gleichungen

In Kapitel 5 wurde bereits beschrieben, was beim Einfall eines Lichtstrahls auf die Grenzfläche zwischen zwei (dielektrischen) Medien unterschiedlicher Brechzahl (z.B. Luft und Glas) passiert: Der Strahl wird gebrochen, das heißt er ändert seine Ausbreitungsrichtung. In Wirklichkeit wird nur ein Teil des Lichts gebrochen. Das restliche Licht wird reflektiert. Aus diesem Grund sieht man z.B. beim Blick durch ein Fenster zusätzlich eine Reflexion.

An Grenzfläche ergibt sich 1. Brechung und 2. Reflexion

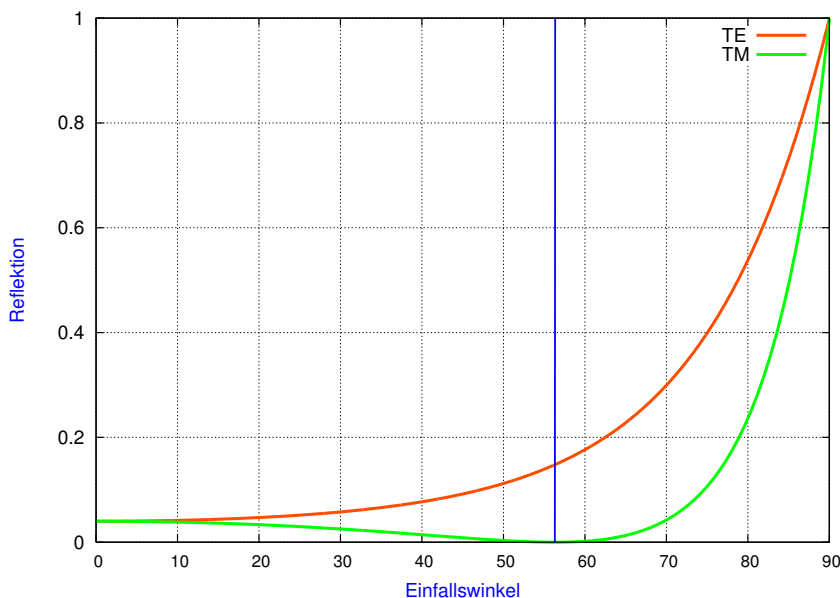


Abbildung 6.3.19: Reflexionsgrad beim Einfall von Licht vom optischen dünnen Medium (Luft) ins optisch dichte Medium (Glas, hier $n=1,5$) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Der Reflexionsgrad hängt unter anderem von der Polarisierung (siehe Kapitel 8) ab (blau = Brewster Winkel, reflektiertes Licht ist komplett polarisiert).

Das Verhältnis des Anteils des reflektierten zum transmittierten Licht hängt von den Brechzahlen der beteiligten Medien, dem Einfallswinkel und der Polarisation des Lichts ab (vgl. Kapitel 8). Beschrieben wird der Zusammenhang durch die Fresnelschen Gleichungen für die Intensitäten⁵:

$$R_s = \frac{\sin^2(i - i')}{\sin^2(i + i')} \quad (6.8)$$

⁵z.B. Kühlke: „Optik“, Verlag Harri Deutsch

$$R_p = \frac{\tan^2(i - i')}{\tan^2(i + i')} \quad (6.9)$$

$$(6.10)$$

R_s bezeichnet dabei den Reflexionsfaktor für die Intensität bei Polarisation senkrecht zur Einfallsebene des Lichts (siehe Kapitel 8). R_p bezieht sich dagegen auf eine Polarisation parallel zur Einfallsebene. i und i' bezeichnen den Einfallswinkel und den Winkel des gebrochenen Strahls (über das Brechungsgesetz berechenbar). Für unpolarisiertes Licht muss der Mittelwert verwendet werden:

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (6.11)$$

Von besonderer Bedeutung ist der senkrechte Einfall ($i = i' = 0$). Gl. 6.9 vereinfacht sich dann zu

$$R = R_s = R_p = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2. \quad (6.12)$$

Für den Übergang Luft/Glas liegt der Reflexionsfaktor im Bereich 4%, ein Wert, der durchaus störend sein kann (nicht-entspiegelte Brillengläser). Zu beachten ist, dass das Glas ja meist zwei Seiten hat und deswegen auch an der Rückseite Licht reflektiert wird. Insgesamt ergibt sich also als Anteil des reflektierten Lichts (Mehrfachreflexionen vernachlässigt):

$$R_1 = 0,04 + 0,04 * 0,96 = 7,8\% \quad (6.13)$$

Fenster scheinen manchmal deutlich mehr Licht als diese 7,8% zu reflektieren. Dies liegt natürlich zum einen an der nichtlinearen Helligkeitsbeurteilung des Menschen (siehe Abschnitt 10.1), zum anderen aber auch an den meist üblichen Doppelscheiben. Bei der Doppelscheibe wird daraus dann nämlich schon

$$R_2 = R_1 + (1 - R_1) * R_1 = 7,8\% + 92,2\% \cdot 7,8\% = 15\%. \quad (6.14)$$

*Reflexion am Fensterglas:
Vorderseite und Rückseite
→ ca. 8% Reflexion*

*Doppelglasscheiben → ca.
15% Reflexion*



Abbildung 6.3.20: Die Farbe von Wasser wird im wesentlichen durch die Farbe der darin gespiegelten Szene bestimmt. Dadurch entspricht die Farbe des Wassers meist der Farbe des Himmels. Wenn kaum Wellen vorhanden sind, sind auch die Helligkeit von Spiegelung und Himmel annähernd gleich. Foto mit freundlicher Genehmigung von W. Gorski. Farbtafel: 12.0.30

Im übrigen führt dieser starke Reflexionsanteil dazu, dass man bei Tageslicht kaum das Innere von Räumen durch Fenster beobachten kann. Aus dem Raum tritt nur ein geringer Lichtfluss aus, weil es innen deutlich dunkler ist als draußen. Dieser Lichtfluss wird durch den starken Lichtfluss aufgrund der Reflexion des Lichts an der Fensterscheibe überlagert. Der Kontrast ist also sehr schlecht. Ganz anders sieht die Sache bei Nacht aus. Der Innenraum ist beleuchtet und entsprechend ist der Lichtfluss nach außen vergleichsweise groß. Von der Fensterscheibe wird wenig Umgebungslicht von außen zum Beobachter (ebenfalls außen) reflektiert, weil es außen dunkel ist. Entsprechend ist der Kontrast also hoch und man kann gut sehen, was sich im Innern des beleuchteten Zimmers abspielt. Auch Gardinen führen zu einem analogen Effekt. In diesem Fall ist lediglich die Streuung (statt der Reflexion) an den *Gardinen* zu berücksichtigen. Und auch ein „halbdurchlässiger“ Spiegel in einem Verhörzimmer lässt in beide Richtungen genau gleich viel Licht durch. Auch hier (vgl. Abb. 6.3.21) erfolgt der Effekt rein durch die verschiedenen Beleuchtungsstärken in den beiden durch den Spiegel getrennten Räumen.

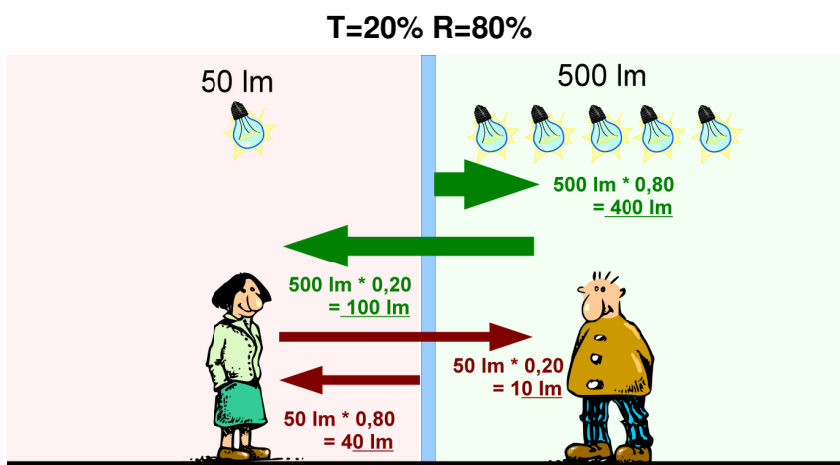


Abbildung 6.3.21: Trennt man zwei Räume durch einen teildurchlässigen Spiegel, dann ergibt sich bei asymmetrischer Beleuchtung der Effekt, dass man vom einen Raum (links) in den anderen Raum (rechts) sehen kann, ohne gesehen zu werden. Der vom linken Raum in den rechten Raum einfallende Lichtfluss ist gegenüber dem reflektierten Lichtfluss vernachlässigbar und wird von uns nicht wahrgenommen (vgl. Abschnitt 10.2). Ganz analog verhält es sich bei der Verwendung von Gardinen statt Spiegeln.

Aus dem Verlauf des Reflexionsfaktors über den Einfallswinkel (Abb. 6.3.19) sieht man, dass für große Einfallswinkel der Reflexionsfaktor sehr groß ist. Unter nahezu streifendem Einfall spiegeln daher die meisten Oberflächen sehr gut (siehe Abb. 6.3.22). Dies ist auch der Grund, warum bei ruhiger See dann am Horizont die Grenze zwischen Himmel und Wasser verschwimmt. Der Reflexionsfaktor wird aufgrund der streifenden Inzidenz 1, so dass der Himmel perfekt reflektiert wird. Die Farbe des Meers entspricht dann der Farbe des Himmels.⁶

Die Farbe des Meers bei ruhiger See entspricht der Farbe des Himmels

⁶Ansonsten ist die Farbe des Meers blau (aufgrund der Absorption von Wasser) bzw. grünlich aufgrund der Absorption durch pflanzliche Mikroorganismen (siehe Abschnitt 3.2).



Abbildung 6.3.22: Im Vordergrund (Einfall nahezu senkrecht) ergibt sich eine geringe Reflexion. Dementsprechend ist der Grund des Teichs sichtbar. Im Hintergrund ist die Spiegelung an der Wasseroberfläche stark.

6.4 Reflexion und Wellen

Bei nennenswerten Wellen ist das Wasser am Horizont dunkler

Aufgrund von Wellen werden tiefliegende Objekte am Horizont nicht zum Beobachter reflektiert

Sobald allerdings nennenswerte Wellen aufkommen, erscheint das Wasser am Horizont dunkler als der Himmel (Abb. 6.4.23). Der Grund hierfür ist in Abbildung 6.4.24 veranschaulicht: Offensichtlich findet ein Teil des Lichts nicht den Weg zum Auge des Beobachters, sondern wird durch Wellenberge abgeschattet.

Aufgrund dieser Wellen ergibt sich ein weiterer Effekt. Entfernte Objekte geringer Höhe (z.B. Küsten) werden in der Reflexion nicht gesehen, einfach weil wir nur die uns zugewandte Seiten der Wellen sehen und dementsprechend keine von geringer Höhe ausgehende Lichtstrahlen den Weg zu unseren Augen finden. Als Ergebnis dieses Effekts kann das Bild eines Objekts in der Reflexion zum Horizont hin verschoben werden.

Abb. 6.4.25 zeigt eine erstaunliche Reflexion. Die Spiegelung der Brücke zeigt zwar sehr schön den senkrechten Brückenpfeiler, die diagonal verlaufenden Streben sind aber in der Spiegelung praktisch unsichtbar. Offensichtlich liegt dies nicht an der Dicke der sich spiegelnden Strukturen. Der Grund liegt vielmehr wieder in der unebenen Wasseroberfläche.⁷ Die leichten Wellen führen dazu, dass Licht von einem bestimmten Punkt der Szene zu unserem Auge bei der Spiegelung unterschiedlich stark abgelenkt wird. Es ergibt sich damit eine Verschmierung in vertikaler Richtung (s.u.). Diese Verschmierung ändert bei einer senkrechten Struktur (Brückenpfeiler) nichts am Bildeindruck.

⁷In der Tat verschwindet der Effekt, wenn das Wasser komplett ruhig ist.



Abbildung 6.4.23: Das Meer scheint am Horizont dunkler zu sein. Der Grund hierfür liegt in der Reflexion an den Wellen. Mit freundlicher Genehmigung von Ian Britton, www.freefoto.com

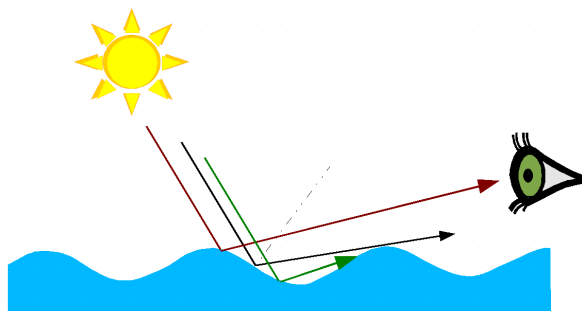


Abbildung 6.4.24: Warum sind Wellen am Horizont dunkler? Ein Teil des Lichts wird durch die Wellenberge abgeschattet. Gleichzeitig erklärt die Skizze, warum Objekte in der Reflexion zum Horizont hin verschoben erscheinen und warum sehr tief stehende Objekte überhaupt nicht (bzw. nur extrem schwach) reflektiert werden.

Bei einer diagonal verlaufenden Struktur führt sie aber zu einer Verschmierung mit dem Hintergrund. Die Struktur wird damit effektiv eliminiert. Die Frage ist nun aber, warum die Verschmierung nur in vertikaler Richtung erfolgt.

Bevor wir hierauf näher eingehen will ich anmerken, dass Sie den Effekt auch sehr schön bei der Reflexion der tiefstehenden Sonne oder des Mondes an Wasserflächen sehen können (siehe Abb. 6.4.26). Auch die Lichtsäule bei der Reflexion an Eiskristallen in der Atmosphäre zeigt dasselbe Verhalten (vgl. Abschnitt 6.6).

Die Verschmierung ist dann besonders stark in vertikaler Richtung, wenn der Sehwinkel zur Wasseroberfläche gering ist, wenn also das Objekt (z.B. Sonne, Mond) tief steht. Abb. 6.4.27 verdeutlicht die Zusammenhänge. Wir gehen von dem Sonderfall eines weit entfernten Objekts, also z.B. der Sonne, aus. Damit ergibt sich ein paralleler Lichteinfall mit dem Winkel i . Der maximale Winkel der Wellen auf der Wasseroberfläche sei α .



Abbildung 6.4.25: Reflexion von vertikalen und diagonalen Strukturen an einem Gewässer: Die vertikalen Strukturen werden gut reflektiert, die diagonalen Strukturen verschwinden.

Wir betrachten zunächst die Reflexion in der Ebene senkrecht zur Wasseroberfläche, in der der Beobachter B und die Lichtquelle liegen. In Abb. 6.4.26 entspricht dies der vertikalen Ausdehnung der Reflexion. Aus der Skizze (Abb. 6.4.27 a) entnimmt man für den maximalen Winkel γ , unter dem die Lichtquelle gesehen wird:

$$\delta_1 = i - 2\alpha \quad (6.15)$$

$$\delta_2 = i + 2\alpha \quad (6.16)$$

$$\beta = 180^\circ - \delta_1 \quad (6.17)$$

$$\gamma = 180^\circ - \beta - \delta_1 \quad (6.18)$$

$$= 180 - 180 + \delta_1 - \delta_2 \quad (6.19)$$

$$= \delta_1 - \delta_2 \quad (6.20)$$

$$= i + 2\alpha - i + 2\alpha = 4\alpha \quad (6.21)$$

M und M' sind gerade die Punkte, die noch Licht in Richtung des Beobachters lenken.

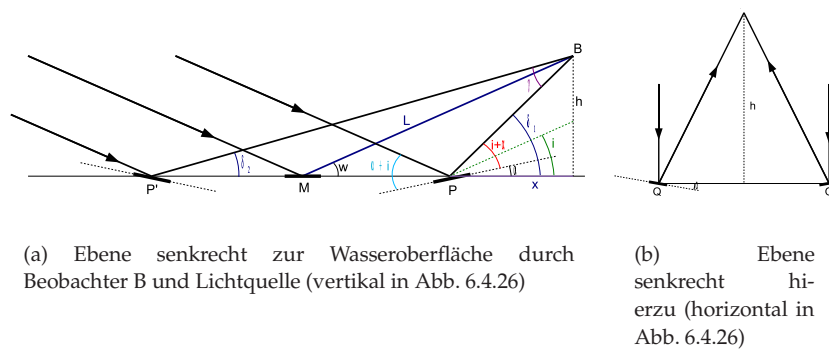
In der Ebene senkrecht dazu, also horizontal in Abb. 6.4.26, wird zunächst die Entfernung QQ' berechnet. Q und Q' entsprechen M und M' in der anderen Ebene, bezeichnen also wieder die Maximalpunkte auf der Wasseroberfläche, die noch hell gesehen werden.

$$QQ' = 2h \tan 2\alpha \quad (6.22)$$

$$\gamma' = \frac{QQ'}{L} \quad (6.23)$$



Abbildung 6.4.26: Reflexion der Sonne an einem Gewässer: Bei tiefstehender Sonne ist die Reflexion, also das reflektierte Bild, in vertikaler Richtung deutlich verlängert.



(a) Ebene senkrecht zur Wasseroberfläche durch Beobachter B und Lichtquelle (vertikal in Abb. 6.4.26)

(b) Ebene senkrecht hierzu (horizontal in Abb. 6.4.26)

Abbildung 6.4.27: Skizze zur Berechnung der horizontalen und vertikalen Ausdehnung der Reflexion.

$$= \frac{QQ'}{\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (6.24)$$

Für das Verhältnis der Sehwinkel in horizontaler und vertikaler Richtung ergibt sich damit

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{h \tan \alpha}{\sqrt{l^2 + h^2}} \quad (6.25)$$

$$= \sin w \cdot \frac{\tan 2\alpha}{\alpha} \quad (6.26)$$

Dabei bezeichnet w den Winkel des Beobachters zur Mitte der Reflexionsfigur. Bei der Umformung wurde $h/\sqrt{l^2 + h^2} = \sin w$ benutzt.

Für kleine Wellenwinkel α ergibt sich näherungsweise

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \sin w. \quad (6.27)$$

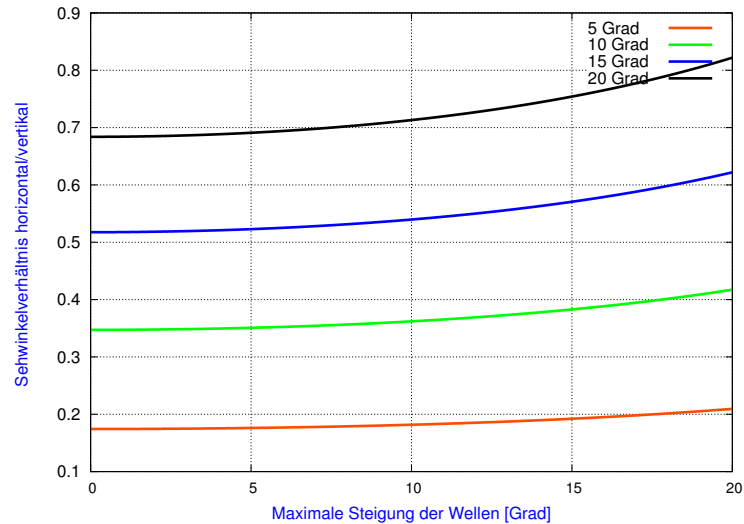


Abbildung 6.4.28: Verhältnis der Ausdehnung in horizontaler zur vertikalen Richtung γ' /gamma für verschiedene Blickwinkel des Beobachters.



Abbildung 6.4.29: Kaustiken bei der Reflexion an Wellen

Wenn wir also ein tiefstehendes Objekt (w gering) haben, dann ist das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Ausdehnung sehr gering wie wir es auch in Abb. 6.4.26 extrem sehen (siehe auch Abb. 6.4.28). Für ein hochstehendes Objekt (Sonne am Mittag und Beobachtung von oben, w groß) wird das Verhältnis dagegen 1, so dass wir näherungsweise keine Lichtäule, sondern einen Kreis sehen.

Der Effekt ist genauso auf nassen Straßen zu sehen. Die Erklärung ist dieselbe. Selbst auf trockenen Straßen sind entsprechende Lichtsäulen oft sichtbar, da der Reflexionsgrad von Asphalt (bei schrägem Einfall) ausreichend hoch ist.

Durch die lokale Unebenheit ergibt sich bei nahezu streifender Beobachtung ein weiterer Effekt. Wenn Sie bei ruhiger See die Reflexion eines großen Objekts nahe des Horizonts betrachten, dann werden Sie feststellen, dass das reflektierte Bild zum Horizont verschoben erscheint. Ursache hierfür ist, dass wir die Szene praktisch über leicht geneigte Spiegel (wegen der leichten Wellen) betrachten. Die uns zugewandten Wellenseiten spiegeln das Licht also über leicht

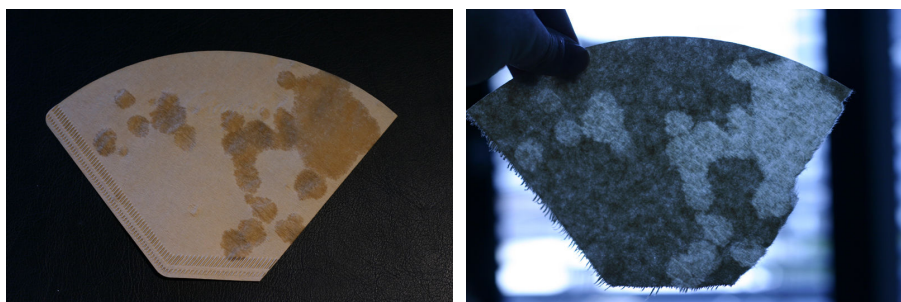
geneigte Spiegel und damit sehen wir in der Reflexion Teile des Himmels, die vergleichsweise hoch in der Orginaszene zu sehen sind (vgl. Abb. 6.4.24). Weiterhin erklärt sich damit, warum sehr tiefe Objekte, also Objekte, die nahe an der Wasseroberfläche liegen, nicht zu uns gespiegelt werden.

Wenn die Reflexion an der Wasseroberfläche bei Wellen im Detail betrachtet wird, dann ergeben sich schöne Lichtmuster (vgl. Abb. 5.7.20). Für die sich ergebenden hellen Strukturen, an denen sich lokal jeweils viele von der Wasseroberfläche reflektierten Lichtstrahlen kreuzen, spricht man von *Kaustiken*. Entsprechende Muster treten in vielfältiger und oft komplizierter Form bei der Reflexion an vielen Gegenständen auf.

6.5 Nass = Dunkel

Ein an sich sehr erstaunliches Phänomen fällt – weil es uns so vertraut ist – nur selten auf: sobald ein beliebiges Material nass wird, wird es dunkler (Abb. 6.5.30). Obwohl uns dieser Effekt so vertraut ist, fällt die Erklärung zunächst schwer. Das ganze wird dadurch noch erstaunlicher, dass der Effekt unabhängig davon auftritt, welche Flüssigkeit und welches Material verwendet wird. Das Experiment funktioniert genauso mit Öl wie mit Champagner oder Himbeersirup.

nasse Materialien wirken dunkel



(a) in Reflexion

(b) in Transmission

Abbildung 6.5.30: Nasse Materialien erscheinen in Reflexion dunkler und in Transmission heller.

Abb. 6.5.31 verdeutlicht den Vorgang. Ohne Wasserfilm wird das einfallende Licht an der Oberfläche gestreut. Ein Teil des gestreuten Lichts wird vom Auge des Beobachters aufgefangen. Sobald ein Wasserfilm auf der Oberfläche ist, werden die Vorgänge komplizierter. Zunächst wird ein Teil des einfallenden Lichts (wenige Prozent) direkt am Wasserfilm reflektiert. Der restliche Anteil wird teilweise von der Oberfläche absorbiert und teilweise reflektiert. Das reflektierte Licht wird an der Grenzfläche Wasser–Luft teilweise erneut reflektiert und hat daher erneut die Chance, von der Oberfläche absorbiert zu werden.

Da die Wahrscheinlichkeit für eine Reflexion beim Durchgang vom Wasser zur Luft dieselbe ist wie die Wahrscheinlichkeit zur Reflexion beim Einfall von Luft zu Wasser, kann diese Erklärung so nicht wirklich die Abdunklung erklären. Es ist aber zu bedenken, dass ein Teil der Strahlen totalreflektiert wird, da bei der Streuung beliebige Winkel auftreten (1. Streuung, 2. komplizierte Wasseroberfläche). Dadurch wird letztlich die Wahrscheinlichkeit, dass gestreutes Licht

Rückreflexion des nicht absorbierten Lichts auf das Material → erneute Chance zur Absorption

am Wasser erneut zur Oberfläche reflektiert wird, vergleichsweise hoch. Damit steigt aber die Wahrscheinlichkeit für eine Absorption und so wird letztlich das nasse Objekt dunkler. Für poröse Materialien (z.B. Sand) ergibt sich ebenfalls eine Verdunklung bei Nässe, allerdings sind die Vorgänge dort komplizierter.⁸

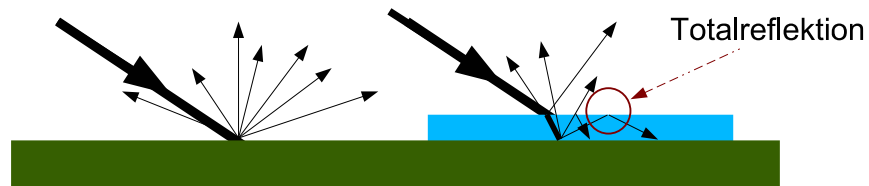


Abbildung 6.5.31: Nasse Materialien sind in Reflexion dunkel. Letztlich ist der Grund in der Totalreflexion von an der Oberfläche gestreuten Strahlen an der Wasseroberfläche zu sehen.

Bei dünnen Stoffen ist nicht nur die Absorption, sondern auch die Transmission von Bedeutung. Auch ein dünner heller Stoff wirkt dunkler, wenn er befeuchtet wird. In diesem Fall (die Absorption ist zu vernachlässigen) ergibt sich eine erhöhte Transmissionswahrscheinlichkeit. Die Argumentation ist dabei exakt dieselbe wie bei dunklen Stoffen und der Absorption.

Umgekehrt ist zu erwarten, dass, wenn das Material „in Reflexion“ dunkler wird, es in Transmission, also in Durchsicht, heller erscheint. Dies ist in der Tat der Fall (siehe Abb. 6.5.30 (b)). Aus diesem Grund werden insbesondere dünne weiße Kleidungsstücke sehr durchsichtig, wenn sie nass sind.⁹

Bei hellen, dünnen Stoffen ist auch die Transmission von Belang

6.6 Halos

In unserer Atmosphäre befindet sich Wasser in gasförmiger (Wasserdampf), flüssiger (z.B. Regentropfen, Wolken) und fester Phase (Eis). Die Eiskristalle – auch Schnee besteht letztlich aus Eiskristallen – bilden aufgrund der Wasserstoffbrücken hexagonale Symmetrien. In Wolken (vor allem in Cirrus Wolken) bilden sich insbesondere die in Abb. 6.6.32 dargestellten hexagonalen Kristalle. Die Kristallbildung ist dabei nicht auf die Wintermonate beschränkt, da auch im Sommer in der entsprechenden Höhe Temperaturen unterhalb 0 °C herrschen. An diesen zwischen etwa 10 und 200 μm großen Kristallen kann das Sonnenlicht sowohl reflektiert als auch gebrochen werden. Entsprechend ergeben sich verschiedene Halo-Erscheinungen, die mehr oder weniger selten beobachtbar sind.

Die Halos werden am häufigsten in Cirrus (fasriges Aussehen), Cirrostratus (durchscheinender weißer Wolkenschleier) und Cirrocumulus Wolken (viele regelmäßig angeordnete Wolkenflecken) beobachtet. Lichtsäulen werden am ehesten in Altocumulus Wolken gesehen. Besonders schöne Halos findet man bei sehr tiefer Temperatur in Eisnebeln.

Die grundsätzlich geltenden Regeln zur Beobachtung von optischen

Hexagonale Eiskristalle in der Atmosphäre: Reflexion und Brechung führen zu Halo-Erscheinungen

⁸D.K. Lynch, W. Livingston, „Color and Light in Nature“, Kap. 3.20, Cambridge University Press

⁹Zusätzlich kleben die Kleidungsstücke dann auch noch bevorzugt am Körper, so dass die Körperoberfläche durch das Kleidungsstück sehr störungsarm abgebildet wird. Ein großer Abstand zwischen Kleidungsstück und Kleidung führt dagegen zu einer starken Verschmierung von Details, weil das Kleidungsstück als Streumedium wirkt.

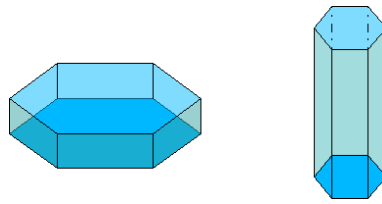


Abbildung 6.6.32: Eiskristalle in der Atmosphäre

Phänomenen gelten für Halos aufgrund ihrer relativen Seltenheit besonders: Zunächst sollte man regelmäßig den Himmel inspizieren, auch wenn der Himmel relativ klar ist. Manchmal hilft es, den Himmel in Reflexion zu beobachten: Eine gekrümmte Oberfläche (z.B. Gartenkugel) führt zu einer Verzerrung des Himmels und damit teilweise zu stärkeren Kontrasten, so dass Himmelserscheinungen deutlicher sichtbar werden. Ein weiterer Tipp ist die Benutzung einer Sonnenbrille. Ohne Abdunklung wird man meist vom hellen Himmel in Sonnenrichtung zu sehr geblendet. Wenn Sie einen Halo entdecken, dann sollten Sie auch nach weiteren Halo-Phänomenen Ausschau halten, da oft Kombinationen der Halos auftreten. Beim Fotografieren des Halos empfiehlt es sich, aufgrund der hohen Dynamik unterschiedliche Belichtungen zu verwenden und sich insbesondere vor Augenverletzungen zu schützen (Vorsicht beim direkten Blick in den Bildsucher der Spiegelreflexkamera).

auf Halos achten !

Das einfachste¹⁰ Phänomen, das sich aufgrund der Kristalle in der Atmosphäre ergeben kann ist die *Lichtsäule* (*sun pillar*). Sie ist als eine vertikale helle Linie oberhalb der Sonne sichtbar (siehe Abb. 6.6.33). Das Zustandekommen ist in Abb. 6.6.34 veranschaulicht: Das Licht der Sonne wird an den Endflächen der Eiskristalle reflektiert und scheint daher aus einer anderen Richtung zu kommen. Die Eiskristalle haben die Tendenz, sich in der Atmosphäre wie in Abb. 6.6.34 dargestellt auszurichten. Die großen Reflexionsflächen liegen also annähernd parallel zur Erdoberfläche. Daher ergibt sich eine Lichtsäule in vertikaler Richtung¹¹.

Lichtsäule: annähernd horizontal ausgerichtete Eiskristalle spiegeln die Sonne

Die Lichtsäule steht meist oberhalb der Sonne. Lichtsäulen lassen sich teilweise ebenfalls über künstlichen Lichtquellen (z.B. Straßenlaternen) beobachten. Ganz entsprechend ergibt sich eine Lichtsäule nach unten, wenn die Sonne an einer Wasseroberfläche (mit leichten Wellen) reflektiert wird (siehe Abb. 6.4.26) oder der Beobachter oberhalb der Eiskristalle positioniert ist.

Während die Lichtsäulen rein auf Reflexionen beruhen, sind die *Nebensonnen* (*sundogs*)¹² (siehe Abb. 6.6.39) ein Produkt der Brechung. Zwei Nebensonnen sieht man natürlich nur dann, wenn in Richtung beider Beobachtungsrichtungen Eiskristalle vorhanden sind (vgl. Abb. 6.6.35). In den Kristallen finden sich aufgrund der säulenförmigen hexagonalen Struktur zwei Prismenwinkel: 60° und 90° (siehe Abb. 6.6.36). Die ebenfalls auftretenden 120° Winkel sind für die Lichtablenkung ohne Belang, da hier zusätzlich Totalreflexionen stattfinden, die dafür sorgen, dass praktisch kein Licht zur Seite mit 120° Winkeldifferenz kommt.

Nebensonnen: Brechung an den ausgerichteten Eiskristallen (Prismen) führt zu (zwei) zusätzlichen „Sonnen“

Wie beim Regenbogen (Abschnitt 5.9.26) ist der Ablenkwinkel nicht wirklich konstant. Er variiert hier mit dem Einfallswinkel des Lichtstrahls. Aller-

¹⁰Aber um ca. den Faktor 8 weniger häufig als der 22°-Halo

¹¹Wären die Kristalle alle perfekt parallel zur Erdoberfläche ausgerichtet, dann würde man anstatt einer Säule eine helle Nebensonne über der eigentlichen Sonne sehen.

¹²Die Bezeichnung „sundog“ rührt daher, dass vor und hinter der Sonne Nebensonnen auftreten. Die Sonne wird also wie von zwei Hunden bei ihrem Spaziergang über den Himmel begleitet.



Abbildung 6.6.33: Lichtsäule und zweite Reflexion des an den Eiskristallen reflektierten Lichts am Wasser, Foto mit freundlicher Genehmigung von James Kirkpatrick, photoblog.jameskirkpatrick.com

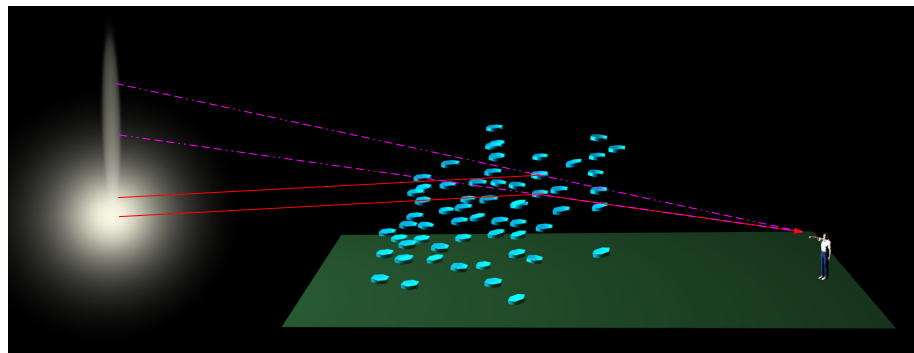


Abbildung 6.6.34: Zustandekommen der Lichtsäule: Reflexion der Sonne an nahezu horizontal ausgerichteten Eiskristallplättchen.

dings ergibt sich für alle möglichen Einfallswinkel wieder eine Häufung des Ablenkwinkels für den minimalen Ablenkwinkel ϕ_{min} . Licht, das unter einem Winkel nahe des minimalen Ablenkwinkels einfällt, wird in einen engen Ausgangswinkelbereich komprimiert (siehe Abb. 6.6.37). Dieser minimale Ablenkwinkel lässt sich

$$\phi_{min} = 2 \arcsin \left[n \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] - \frac{\alpha}{2} \quad (6.28)$$

berechnen¹³. Dabei ist n die Brechzahl des Kristalls und α der prismatische Winkel, also 60° oder 90° . Für den 60° Winkel und $n_{Eis} = 1.31$ ergibt sich so eine Ablenkung von $\phi = 22^\circ$.

Die Kristalle richten sich in der Atmosphäre oft bevorzugt mit ihrer langen Achse in Richtung des Erdmittelpunktes aus (also genauso wie bei der Lichtsäule). Die vertikale Achse ist aber von einer nicht zu vernachlässigenden Länge und dementsprechend wird ein nicht geringer Anteil des Lichts der Sonne an diesen „Kristallstäben“ wie in Abb. 6.6.38 gezeigt gebrochen. Für die

22° Lichtablenkung an den Kristallen

¹³M. Vollmer, „Lichtspiele in der Luft“, Elsevier 2005



Abbildung 6.6.35: Typische Nebensonne (rechts im Bild) über Stuttgart (zusammen mit der eigentlichen Sonne). Der Winkel zwischen Sonne und Nebensonne beträgt ca. 22° .

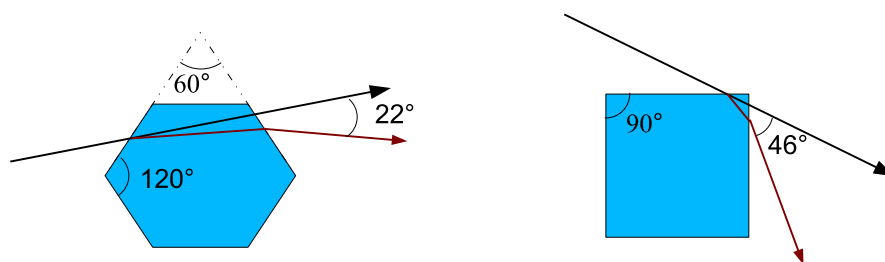


Abbildung 6.6.36: Ablenkung an den Eiskristallen

hexagonale Struktur ergibt sich der bereits erwähnte bevorzugte Ablenkwinkel von 22° . Entsprechend trifft den Beobachter aus dieser Richtung, also aus $\pm 22^\circ$, Licht und dementsprechend scheinen weitere Sonnen unter eben diesen Winkeln vorhanden zu sein (Abb. 6.6.39).

Da die Brechzahl und damit der Ablenkwinkel von der Wellenlänge abhängig ist, ergibt sich bei den Nebensonnen oft eine farbliche Aufspaltung, man hat also den Eindruck ein kurzes Regenbogensegment am Himmel zu sehen. Schließlich soll erwähnt werden, dass Nebensonnen natürlich auch für andere Lichtquellen als die Sonne, insbesondere den Mond, auftreten können. Meist sind diese sogenannten *Nebenmonde* (*moon dogs*) allerdings aufgrund der geringen Leuchtdichte des Mondes so schwach, dass sie kaum beobachtbar sind.

Für eine genaue Analyse der Energie, die in einen bestimmten Winkelbereich abgelenkt wird, muss neben der reinen Prismenablenkung auch bedacht werden, dass aufgrund von Totalreflexion und der begrenzten Seitenlängen der Kristalle nur ein begrenzter Winkelbereich überhaupt eine Ablenkung am 60° Prisma erfährt. Weiterhin ist zu beachten, dass je nach Orientierung der Kristalle – und damit der Einfallrichtung – eine unterschiedliche effektive Fläche für das einfallende Licht wirksam ist.

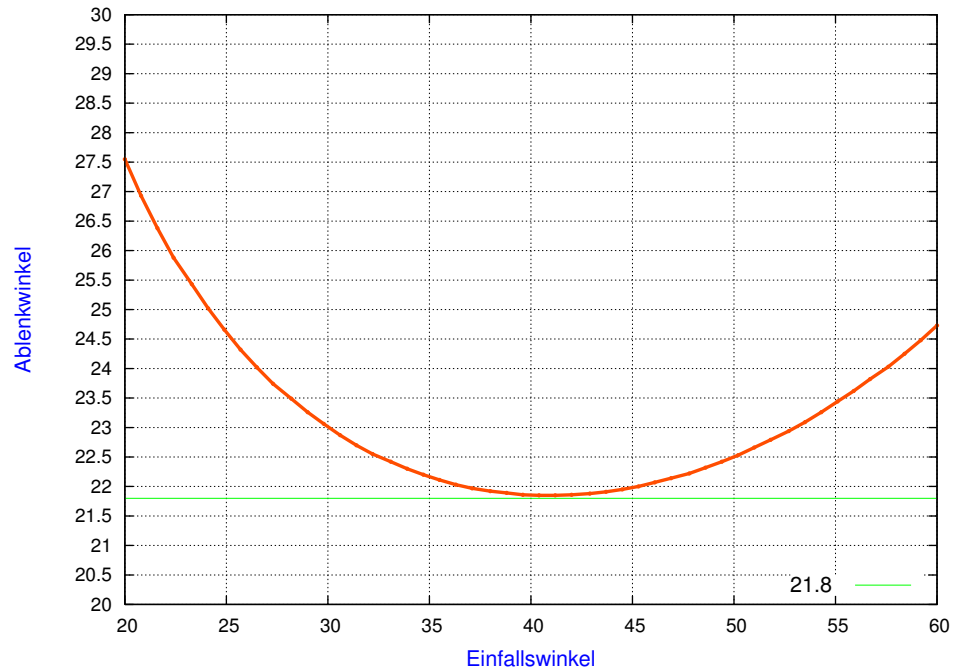


Abbildung 6.6.37: Ablenkwinkel eines einfallenden Strahls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel auf ein 60° Prisma. Es ergibt sich eine Häufung des Ablenkwinkels bei ca. $21,8^\circ$.

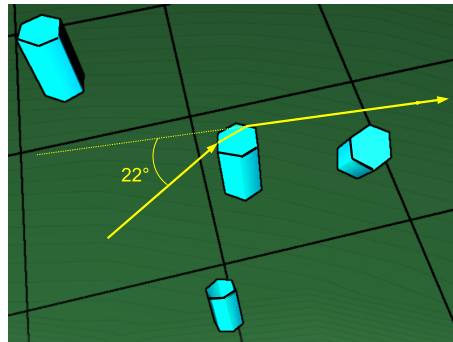


Abbildung 6.6.38: Zustandekommen der Nebensonnen: Das Licht der Sonne wird durch senkrecht in der Atmosphäre schwebende hexagonale Eiskristalle gebrochen.

*Ausrichtung der Kristalle fehlt
→ Ablenkung des Lichts um
 22° Grad in beliebiger Rich-
tung, also Kreis mit 22° Radius*

Wenn die vertikale Ausrichtung der Eiskristalle nicht mehr gegeben ist, erfolgt die Ablenkung des Lichts natürlich nicht mehr in horizontaler Richtung. Stattdessen scheint das Licht aus einem 22° Kreis, dem sogenannten 22° -Halo, mit der Sonne im Mittelpunkt zu kommen (siehe Abb. 6.6.40). Genau wie bei den Nebensonnen können auch die Halos nicht nur um die Sonne sondern auch um den Mond beobachtet werden. Die Nebensonnen sind – besonders bei hochstehender Sonne – teilweise leicht außerhalb der 22° zu finden. Der Grund hierfür liegt in dem schrägen Einfall des Lichts auf die Kristalle. Dies führt zu einer zusätzlichen Winkeldifferenz.

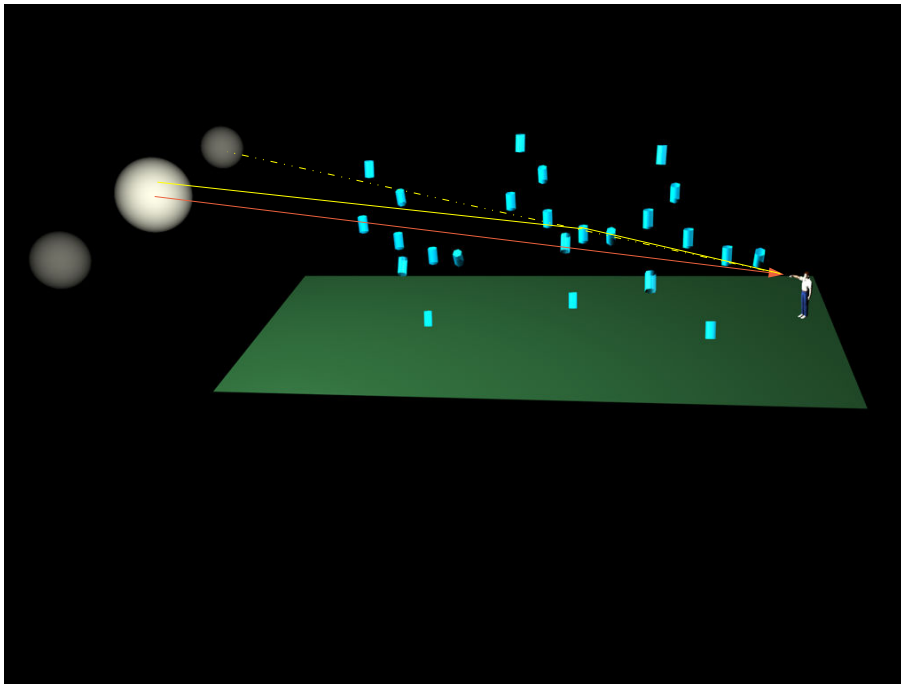


Abbildung 6.6.39: Zustandekommen der Nebensonnen: Das Licht der Sonne wird durch senkrecht in der Atmosphäre schwebende hexagonale Eiskristalle gebrochen.



Abbildung 6.6.40: 22°-Halo mit Nebensonnen



Abbildung 6.6.41: Mondhalo, Foto mit freundlicher Genehmigung von Eva Seidenfaden, <http://www.paraselene.de>

Der 22° -Halo ist die mit Abstand häufigste Halo-Erscheinung. Die deutsche Halo-Forschungsgruppe gibt eine statistische Häufigkeit von ca. 100 22° -Halos pro Jahr für Europa an.

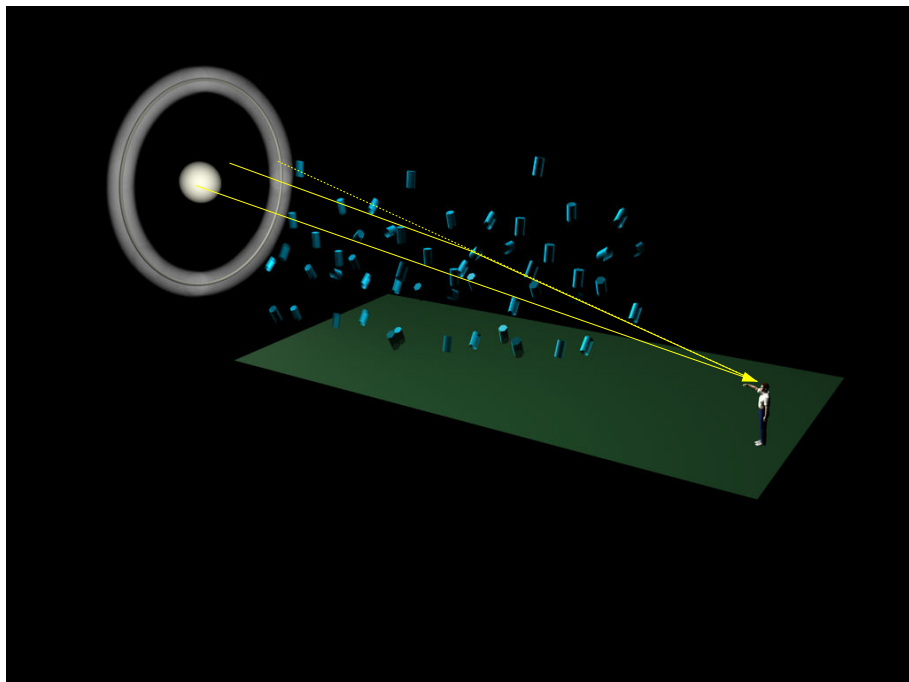


Abbildung 6.6.42: Winkelablenkung beim 22° -Halo

Im Vergleich zu Regenbögen sind die Farben von Halos in der Regel blasser und verschmierter. Genau wie beim Regenbogen führt die endliche Ausdehnung der Lichtquelle (Sonne) zu einer Verschmierung. Zusätzlich ist aber die in Abbildung 6.6.35 dargestellte Winkelablenkung insgesamt sehr flach. Das bedeutet, dass die Häufung der Ablenkungswinkel um das Minimum der Kurve nicht sonderlich stark im Vergleich zu anderen Kurvenbereichen ausgeprägt ist.

Da bei den Eiskristallen wie bereits beschrieben nicht nur 60° , sondern auch 90° Winkel auftreten, kann es auch zu anderen Ablenkungswinkeln als 22° kommen. Für die 90° Prismenwinkel ergibt sich eine Ablenkung von 46° . Aus mehreren Gründen werden diese 46° -Halo wesentlich seltener (um ca. den Faktor 25) als die 22° -Halo beobachtet. Zunächst überdeckt ein 46° -Kreis einen im Vergleich zu einem 22° -Kreis sehr großen Bereich des Himmels in dem die passenden Eiskristalle vorhanden sein müssen. Weiterhin ist für übliche Eiskristalle der Anteil an Licht, der auf Flächen fällt, die zu einer 46° Ablenkung führen, verhältnismäßig gering. Zusätzlich ist die Dispersion für die 46° Ablenkung sehr stark, so dass der Halo über einen vergleichsweise breiten Ringbereich verteilt und damit der Kontrast des Ringbereichs gering ist.

46° Winkel aufgrund von Prismen mit 90° Winkeln

allerdings haben 46° Halo nur geringen Kontrast

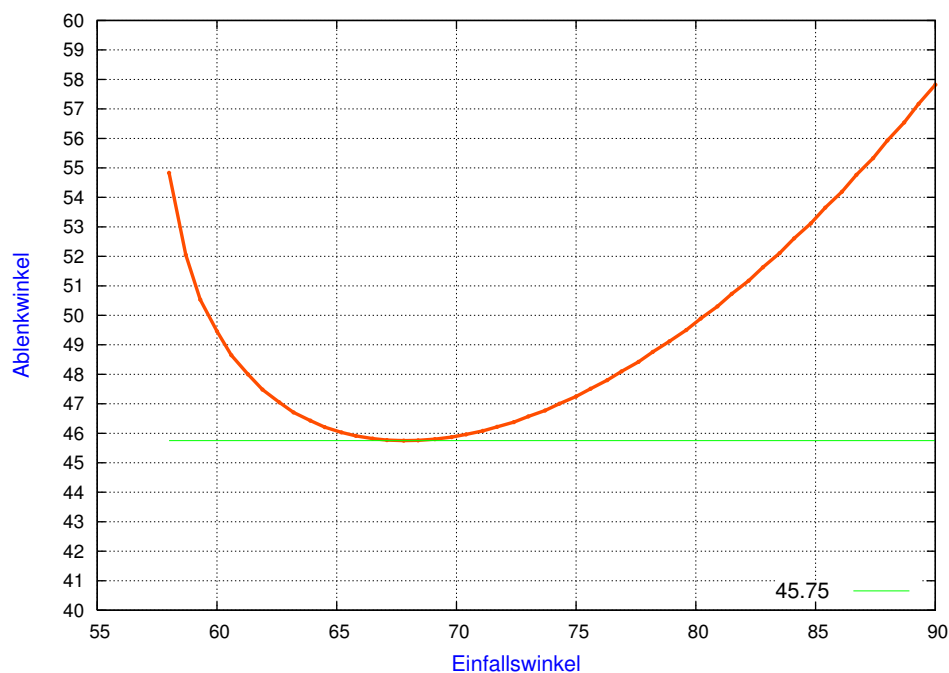


Abbildung 6.6.43: Ablenkungswinkel eines einfallenden Strahls in Abhängigkeit vom Einfallswinkel auf ein 60° Prisma. Es ergibt sich eine Häufung des Ablenkungswinkels bei ca. 46°

Neben diesen wichtigsten Halotypen werden noch weitere Halos in der Atmosphäre beobachtet¹⁴. Eine Übersicht der wichtigsten zeigt Abb. 6.6.46. Der *Zirkumzenital Bogen* oder *Bravaisbogen* (s. Abb. 6.6.44) steht direkt über dem Beobachter. Notwendige Voraussetzung ist, dass die Sonne tiefer als 32° steht. Die Eiskristalle stehen senkrecht und es erfolgt eine Ablenkung am 90° Prismenwinkel der Kristalle. *Berührungsbögen* des 22° -Halo grenzen oben und unten an den Halo an.

Bravaisbogen direkt über Beobachter bei tiefstehender Sonne

Berührungsbögen des 22°-Halo grenzen an den Halo

Der *Horizontalkreis* ist ein auf Höhe des Horizonts verlaufender, den Beobachter umrandender Lichtkreis (vorausgesetzt überall um den Beobachter befinden sich passende Eiskristalle). Die Kristalle schweben wieder senkrecht und es finden einfache Reflexionen an den Seitenwänden der Kristalle statt.

Horizontalkreis umrandet den Beobachter

Schließlich ist aber auch anzumerken, dass noch eine Vielzahl weiterer Winkel auftreten können denn letztlich können sich auch verschiedene Formen pyramidalen (mit sechseckiger Grundfläche) Prismen und Doppelprismen bilden.¹⁵

¹⁴Robert Greenler, "Rainbows, Halos and Glories", Cambridge University Press 1980

¹⁵siehe z.B. Luomanen, Applied Optics 47, H199 (2008) für eine besonders seltene Kombination vieler untypischer Halos.



Abbildung 6.6.44: Bravaisbogen Bogen (Zirkumzenital Bogen). Farbtafel: 12.0.31



Abbildung 6.6.45: Mehrere Halos gleichzeitig, Foto mit freundlicher Genehmigung von Marko Riikonen, <http://www.ursa.fi/riikonen/>. Farbtafel: 12.0.32

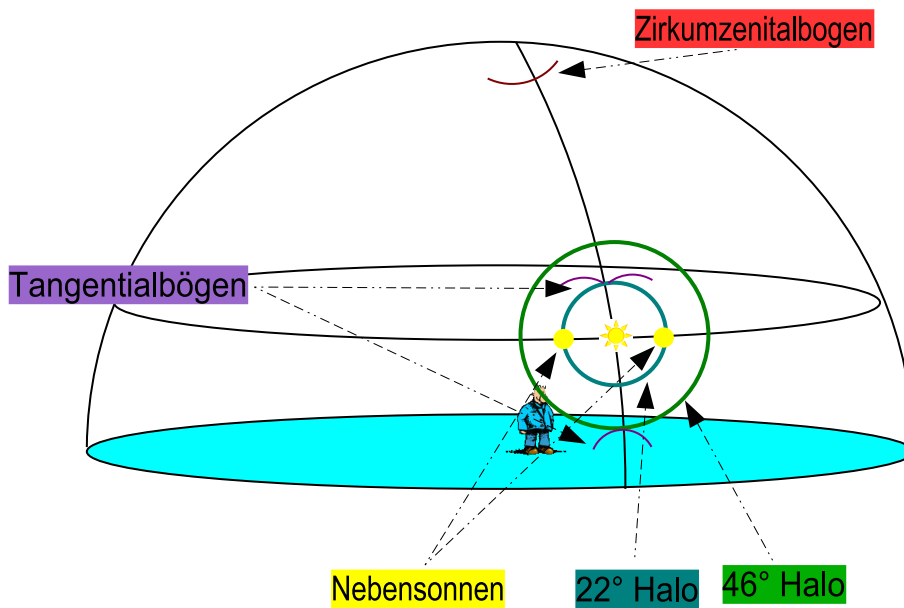


Abbildung 6.6.46: Übersicht zu Haloerscheinungen

6.7 Dreidimensionale Effekte bei der Reflexion

Bei der Betrachtung von gekrümmten Riefen auf spiegelnden Oberflächen können Sie teilweise schöne dreidimensionale Effekte sehen. Grundlage hierfür ist die Reflexion von Licht an Riefenstrukturen. Den einfachsten Fall können Sie leicht selbst mit einem Kochtopf untersuchen: Die Unterseite vieler Kochtöpfe weist radiale Rillen auf (vgl. Abb. 6.7.47). Wenn Sie nun eine Punktquelle (z.B. Glühbirne) in Reflexion über diese Rillenstruktur betrachten, können Sie eine im dreidimensionalen Raum schwebende Linie sehen.¹⁶

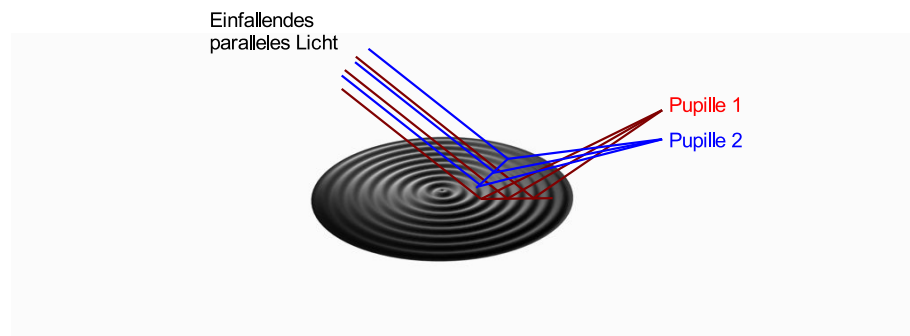


Abbildung 6.7.47: Bei der Betrachtung einer Punktquelle (z.B. Glühbirne) über eine radialsymmetrische, reflektierende Oberfläche (Boden von Kochtopf) sieht man eine im dreidimensionalen Raum liegende Linie. Grundlage ist dabei die unterschiedliche Position der beiden Augen (vgl. Abb. 6.7.48).

Zunächst ergibt sich genau wie bei Reflexion der Sonne an Wellen oder den Lichtsäulen eine längliche, ausgedehnte Lichtspur, wenn Sie eine Punktquelle in der Reflexion an der Rillenstruktur betrachten. Grundlage sind die in Abschnitt 6.4 dargestellten Zusammenhänge.

Wenn Sie abwechselnd das rechte und das linke Auge schließen, werden Sie feststellen, dass die beiden Linien, die Sie so sehen, gegeneinander gekippt sind (vgl. Abb. 6.7.48). Ihr Gehirn rekonstruiert aus den beiden Einzelbildern eine Linie im dreidimensionalen Raum.

Der Abstand zwischen zwei jeweils zueinander korrespondierender Punkte ändert sich entlang der Linie. Das bedeutet aber (vgl. Abschnitt 2.4), dass die Linie selbst nicht in einer Ebene in einer gewissen Entfernung im Raum liegt, sondern dass die Ebene, in der die Linie liegt, im Raum schräg liegt und aus Ihrer Sicht einen gewissen Tiefenbereich abdeckt.

Der Effekt ist nicht nur bei Kochtöpfen sondern auch beim Autofahren im Regen beobachtbar. In diesem Fall sorgen die durch den Scheibenwischer gebildeten Riefen dafür, dass eine Ringstruktur auf der Windschutzscheibe entsteht, an der das Licht gebrochen wird. Genau wie bei der Reflexion bleibt das Licht auch bei der Brechung in der Einfallsebene und es ergibt sich eine linienhafte Aufspaltung.

¹⁶Unter Umständen sehen Sie – ähnlich wie bei Autostereogrammen („Magic-Eye Bildern“) – erst keinen dreidimensionalen Effekt und müssen sich erst an das Phänomen „gewöhnen“.

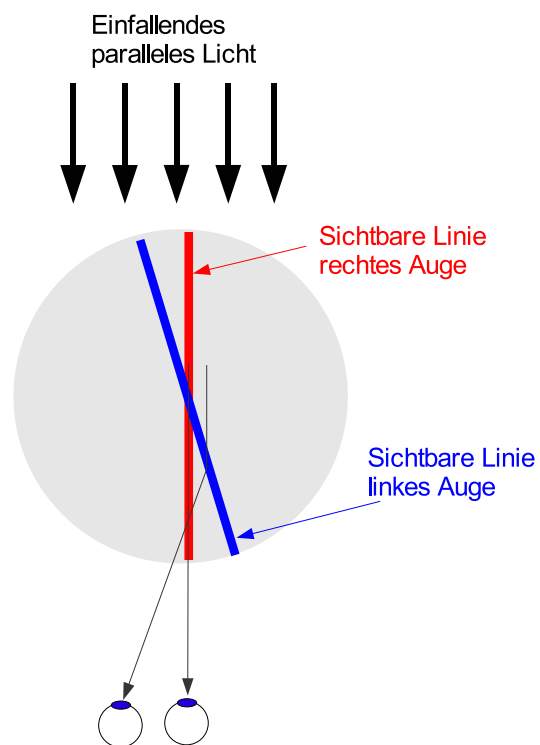


Abbildung 6.7.48: Dargestellt sind die Orte auf dem Kochtopfboden, die Licht in das rechte bzw. das linke Auge reflektieren. Es ergeben sich zwei Linien, die zueinander geneigt sind. Entsprechend ergibt sich bei der Interpretation durch das Gehirn eine Linie, die im dreidimensionalen Raum liegt.

Kapitel 7

Interferenz und Beugung



Abbildung 7.0.1: Beugung an der Blende eines Fotoapparats und irisierende Wolke

*“Whether it be electrostatics or electrodynamics,
the propagation of heat, optics, elasticity,
or hydrodynamics, we are led always to differential
equations of the same family.”*

(Jules H. Poincare)

Die bisher erläuterten Phänomene konnten allein mit dem sogenannten *Strahlenmodell* des Lichts erklärt werden. In diesem Modell, das wir bisher stillschweigend vorausgesetzt haben, bewegt sich Licht in homogenen Medien auf Geraden. Das Licht selbst denkt man sich dabei am besten als aus kleinen Kugelchen bestehend. Die Kugeln gehorchen mehr oder weniger den klassischen Gesetzen der Mechanik. Insbesondere ergibt sich eben im kräftefreien Fall eine geradlinige Bewegung, aber auch das Reflexionsgesetz ist direkt mechanistisch einsichtig (Billiardkugeln).

Dieses mechanistische Lichtmodell ist aber nicht in der Lage, alle bekannten Lichteffekte sinnvoll zu beschreiben. Licht verhält sich in einigen wichtigen Aspekten nicht wie ein Strom von kleinen Kugeln, sondern wie eine Welle. Dies hat C. *Huygens* bereits 1690 erkannt. Gegenüber Newton, dem starken Verfechter einer Korpuskulartheorie, konnte sich dieses Modell zu jener Zeit allerdings nicht durchsetzen. Erst Anfang des 18. Jahrhunderts gelang mit T. *Young* der Durchbruch für die *Wellentheorie* des Lichts.

Neben dem Strahlenmodell und dem Wellenmodell gibt es noch eine weitere wichtige Modellierung von Licht, das Quantenmodell. Einige optische Phänomene erfordern die gleichzeitige Berücksichtigung von Wellen- und Teilcheneigenschaften des Lichts. Die Berücksichtigung dieser beiden (anschaulich für uns nicht vereinbarenden) Eigenschaften erfordert das *Quantenmodell* bzw. die Quantenelektrodynamik bei dem/der die sogenannten *Photonen* Lichtteilchen darstellen, deren Verhalten durch die Quantenmechanik beschreibbar ist.

Jedes dieser Modelle hat seine Berechtigung und keines der Modelle *ist* die Wirklichkeit sondern selbige wird nur durch das Modell beschrieben. Dementsprechend ist es völlig legitim, in der Regel das Strahlenmodell zu verwenden und nur dann auf das Wellenmodell oder das Quantenmodell zurückzugreifen, wenn es notwendig wird¹. Ganz entsprechend wird die Newtonsche Mechanik durch die Allgemeine Relativitätstheorie nicht „falsch“, und natürlich verwenden wir sie auch heute noch, um die Mehrzahl aller mechanischen Probleme zu lösen.

7.1 Licht als Welle

Nach diesen etwas allgemeinen Betrachtungen ist es nun an der Zeit, das Wellenmodell des Lichts etwas ausführlicher zu betrachten. Wir haben bereits in Kapitel 3 angedeutet, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist bzw. als solche modellhaft aufgefasst werden kann und dass dieser Welle entsprechend eine Wellenlänge zugeordnet ist.

Wellen sind uns in verschiedener Form geläufig. Am anschaulichsten sind wohl Wellen im Wasser und Schallwellen. Nehmen wir als Beispiel die Schallwellen: Eine Schallwelle ist eine Luftdruckschwankung, die sich periodisch sowohl im Raum als auch in der Zeit fortpflanzt. Die Luft wird also an einem bestimmten Raumpunkt fortlaufend komprimiert und dekomprimiert. Ein Wert – nämlich der Luftdruck $p(r, t)$ – wird variiert. Bei elektromagnetischen Wellen, also auch Licht, ist die Sache ein wenig komplizierter. Hier variiert nicht nur ein Wert (man sagt auch ein „Skalar“), sondern ein Vektor, nämlich der Vektor des elektrischen Felds $\vec{E}(r, t)$. Licht ist also eine vektorielle Welle und keine skalare Welle wie der Schall. Es zeigt sich — sowohl experimentell als auch durch theoretische Analyse, dass der Vektor des elektrischen Felds dabei immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle steht, weshalb man von einer *transversalen Welle* spricht.

Der Name „elektromagnetische“ Welle zeigt bereits, dass auch noch das magnetische Feld im Spiel sein muss. In der Tat wechselt das magnetische Feld

¹Z.B. werden auch heute für das Design der überwiegenden Mehrzahl aktueller Optiken auf dem Strahlenmodell basierende Optimierungsprogramme (sogenannte Raytracer) verwendet.

Licht ist eine vektorielle Welle, der Vektor des elektrischen Feld steht immer senkrecht zum magnetischen Feld und beide Vektoren stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung

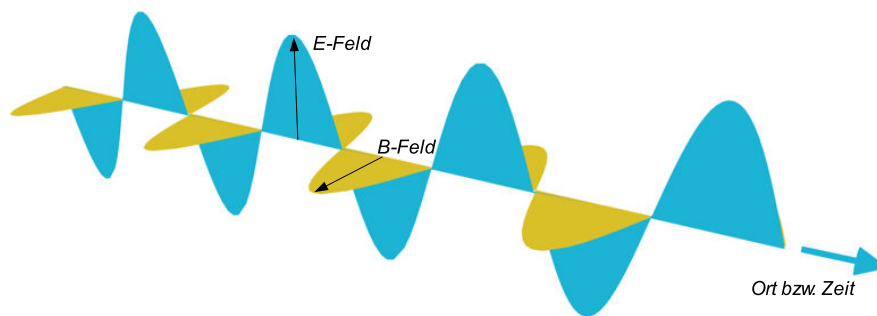


Abbildung 7.1.2: Licht als elektromagnetische Welle. Der Vektor des elektrischen Felds steht senkrecht auf dem Vektor des magnetischen Felds. Beide stehen senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung. Das Diagramm kann sowohl als eine Momentaufnahme (Zeit t =konstant) als auch als eine Aufnahme des zeitlichen Verlaufs (Ort x =konstant) betrachtet werden. Die horizontal verlaufende Achse ist dann jeweils die Ortsachse (x) oder die Zeitachse (t).

(ebenfalls ein Vektor) genau wie das elektrische Feld in Raum und Zeit. Dabei steht der Vektor des magnetischen Felds immer senkrecht zum elektrischen Feldvektor und zur Ausbreitungsrichtung (Abb. 7.1.2). Aufgrund der festen Beziehung zwischen magnetischem und elektrischem Feld können wir uns bei unserer Überlegung auf eine Größe (im folgenden: das elektrische Feld) konzentrieren.

Licht als elektromagnetische Welle wird letztlich durch die vier Parameter

- Amplitude (proportional zur Wurzel der Lichtintensität),
- Wellenlänge (als Maß für die „Farbe“ des Lichts),
- Phase und
- Polarisation

vollständig beschrieben. Im Folgenden werden wir zunächst die Polarisation vernachlässigen und diese im Kapitel 8 gesondert betrachten. Die Phase der Welle gibt die Lage der Welle hinsichtlich einer anderen (Bezugs-)welle an.

Mathematisch können wir den einfachsten Fall einer elektromagnetischen Welle, die monochromatische (=„einfarbige“), ebene Welle, die in Richtung der z -Achse läuft, durch

$$E_i = E_{0i} \cos\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{\lambda}z + \phi\right) \quad (7.1)$$

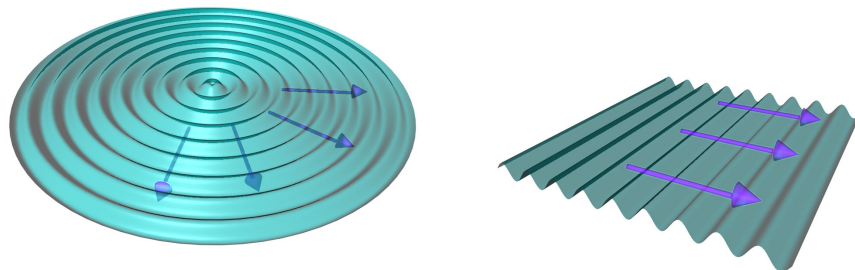
beschreiben.² Jede Komponente des elektrischen und des magnetischen Felds E_i variiert dabei gemäß einer zeitlichen und räumlichen Kosinusschwingung. Dabei bezeichnet f die Frequenz des Lichts, die gemäß Gleichung $c = \lambda f$ mit der Wellenlänge des Lichts verknüpft ist. ϕ ist ein konstanter Phasenoffset.

Diese Welle ist eine Lösung der sogenannten Wellengleichung, die letztlich aus den Maxwellgleichungen (diese beschreiben die komplette Elektrodynamik und damit auch die Optik) abgeleitet werden kann.

²Dabei haben wir die Polarisation, die die Schwingungsebene des elektrischen Feldes beschreibt, vernachlässigt.

Wenn wir teilweise Licht durch Strahlen und teilweise durch elektromagnetische Wellen beschreiben, so muss es auch einen Zusammenhang zwischen diesen beiden Lichtmodellen geben. Dieser Zusammenhang ist vergleichsweise einfach: Lichtstrahlen stehen immer senkrecht auf den sogenannten „Wellenfronten“ (Abb. 7.1.3). Umgekehrt stehen die Wellenfronten senkrecht auf den Lichtstrahlen. Die Wellenfronten sind dabei die Flächen konstanter Phase, also anschaulich zu einem gewissen Zeitpunkt t die Flächen, die z.B. jeweils alle Wellenberge verbinden. Geläufig sind uns diese Wellenfronten vor allem bei Wasserwellen. Es sind auch dort einfach die Wellenberge. Diese pflanzen sich im Wasser – genau wie die Wellenfronten der Optik – in Ausbreitungsrichtung der Welle fort.

Strahlen sind senkrecht zu Flächen konstanter Phase (Wellenfronten)



(a) Kugelwelle

(b) ebene Welle

Abbildung 7.1.3: Strahlen verlaufen immer (in doppelbrechenden Medien gilt dies nicht) senkrecht zu den Wellenfronten. Die Wellenfronten sind die „Flächen konstanter Phase“.

Sobald wir also Wellenfronten haben, können wir auch die zugehörigen Lichtstrahlen auf einfache Weise konstruieren. Für die beiden wichtigsten Fälle, der ebenen Welle („paralleles Licht“) und der *Kugelwelle* ist dies in Abb. 7.1.3 verdeutlicht.

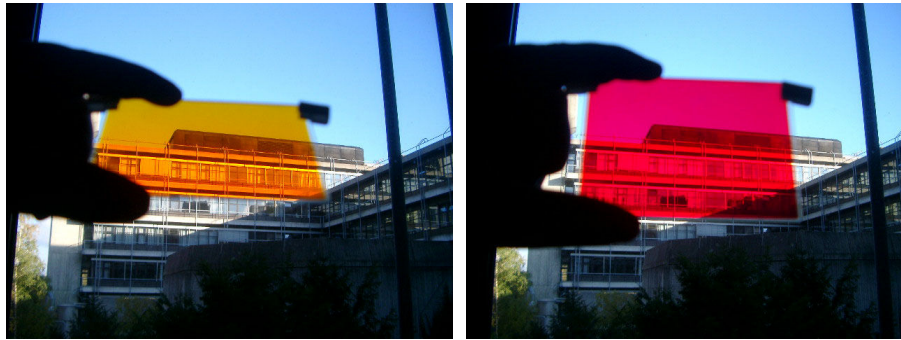
7.2 Interferenz an Schichten

Als einfachstes Beispiel, bei dem die Wellennatur des Lichts eine entscheidende Rolle spielt, wollen wir zunächst die Farbgenerierung an *dünnen Schichten* betrachten. Schillernde Farben, die je nach Betrachtungswinkel ihre Farbe oder ihre Intensität ändern, treten in der Natur und unserer Umwelt in einer Vielzahl von Fällen auf.

Wir wollen das Prinzip anhand einer *Seifenblase* näher untersuchen. An der Seifenblasenhaut wird das Licht einerseits direkt an der Oberfläche reflektiert, andererseits wird ein Teil des Lichts an der Unterseite der Seifenhaut reflektiert (Abb. 7.2.5). Beide Lichtanteile überlagern sich („interferieren“) und führen so zu einer Abschwächung einzelner Spektralbereiche und zu einer Vertärkung anderer Bereiche. Was hierbei im Detail passiert wollen wir im folgenden näher untersuchen.

Sowohl biologische als auch technische Strahlungsempfänger detektieren nicht das elektrische Feld E als Anteil des elektromagnetischen Feldes, sondern die

Lichtdetektoren detekieren das Quadrat des elektrischen Felds



(a) Orientierung 1

(b) Orientierung 2

Abbildung 7.2.4: Interferenzfarben am Beispiel eines Interferenzfilters: Durch die Reflexion an Vorder- und Rückseite an dünnen Schichten ergibt sich eine – je nach Wellenlänge und Einfallswinkel – konstruktive oder destruktive Überlagerung und damit eine Verstärkung oder Abschwächung. Farbtafel: 12.0.33



Abbildung 7.2.5: Interferenzfarben am Beispiel Seifenblase.

Energie des Feldes, die wiederum proportional zur elektrischen Feldstärke im Quadrat ist. Wir nehmen zwei elektrische Felder einer elektromagnetischen Welle in einem bestimmten Raumpunkt folgendermaßen an:

$$E_1 = A_1 \cos(2\pi ft + \phi_1) \quad (7.2)$$

$$E_2 = A_2 \cos(2\pi ft + \phi_2) \quad (7.3)$$

Diese Felder können in unserem Beispiel der Seifenblase also als die beiden an der Seifenblase reflektierten Wellen aufgefasst werden. Beide Felder schwingen offensichtlich harmonisch (cos-Schwingung) mit derselben Frequenz f . Die beiden Wellen können aber unterschiedliche Phasen aufweisen. Die Phasendifferenz $\phi_2 - \phi_1$ kommt bei den uns nun interessierenden Interferenzerscheinungen meist dadurch zustande, dass eine elektromagnetische Welle in zwei Teilwellen aufgespalten wird und diese Teilwellen dann auf unterschiedlichen We-

gen laufen, bis beide sich dann wieder am Beobachtungsort treffen. Im Beispiel mit der Seifenblase wird das einfallende Licht an der ersten Seifenblasengrenzfläche aufgespalten in eine Komponente, die direkt reflektiert wird und in eine weitere Komponente, die gebrochen wird (und dann später an der anderen Seite der Seifenhaut reflektiert wird, vgl. Abb. 7.2.6). Auf einer Sinneszelle im Auge des Betrachters kommen beide wieder zusammen und weisen dann aufgrund der unterschiedlichen Wege eine Phasendifferenz auf.

Letztlich müssen die beiden Felder, die sich durch Reflexion an der Vorderseite und der Rückseite ergeben, addiert werden.³ Für das elektrische Feld gilt dann

$$E = E_1 + E_2 \quad (7.4)$$

und für die Intensität, die proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke ist erhalten wir

$$I \sim E^2 = |E_1 + E_2|^2 \quad (7.5)$$

$$= [A_1 \cos(\omega t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega t + \phi_2)]^2 \quad (7.6)$$

$$= \dots \quad (7.7)$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + 2\sqrt{A_1 A_2} \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (7.8)$$

Die beiden ersten Terme $A_1^2 + A_2^2 = I_1 + I_2$ entsprechen dabei der Intensität, die man bei *inkohärenter Überlagerung* erwartet. Was das im Detail bedeutet wird in Abschnitt 7.9 näher beleuchtet. Momentan soll nur gesagt werden, dass diese *inkohärente Überlagerung* das ist, was man üblicherweise erwartet: Zwei Glühbirnen, die jeweils eine Beleuchtungsstärke von 100 lx erzielen, ergeben zusammen eben eine Beleuchtungsstärke von $100 \text{ lx} + 100 \text{ lx} = 200 \text{ lx}$.

*Inkohärente Überlagerung:
„2 x 100 W = 200 W“*

Der letzte Term in Gleichung 7.8, der sogenannte *Interferenzterm*, führt zu dem interessanten Ergebnis, dass die Gesamtintensität aus Gleichung 7.8 — Kohärenz vorausgesetzt — Null werden kann, obwohl die beiden sich überlagernden Lichtfelder nicht Null sind. „Hell + Hell“ kann also „dunkel“ ergeben, ein zunächst merkwürdiges Resultat, das auch lange Zeit die Verbreitung einer Wellentheorie des Lichts behinderte.

Nichtsdestotrotz ist es genau das, was wir an der Seifenhaut beobachten. Wenn weißes Licht, also ein Gemisch von Wellen ganz unterschiedlicher Frequenz bzw. Wellenlänge, auf die Seifenhaut fällt, dann heben sich bestimmte Lichtanteile komplett weg, andere werden gedämpft und wieder andere verstärkt, je nachdem, welches Resultat sich für den Interferenzterm (Gl. 7.8) ergibt (siehe Abb. 7.2.6 und 7.2.7).

*Seifenblasen: Interferenz des an
Vorder- und Rückseite reflektierten
Lichts*

Wie sieht nun die Phasendifferenz für die beiden Wellen an der Seifenhaut mit Dicke d aus? Die beiden resultierenden reflektierten Wellen haben ihren Ursprung in derselben einfallenden Welle. Die an der Unterseite reflektierte Welle muss allerdings einen um $2d$ größeren Weg innerhalb der Seifenlösung zurücklegen (für senkrechten Einfall auf die Seifenhaut). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Seifenlösung, die wir hier vereinfacht als Wasser annehmen können, beträgt nach Gl. 3.3

$$c' = c/n. \quad (7.9)$$

³Der physikalische Grund für die Addition der Feldstärken liegt in der Linearität der Grundgleichungen (Maxwellgleichungen). Aber auch im täglichen Leben können wir diese Linearität beobachten, z.B. beim „Hintereinanderschalten“ von zwei Batterien. Die Spannungen addieren sich.

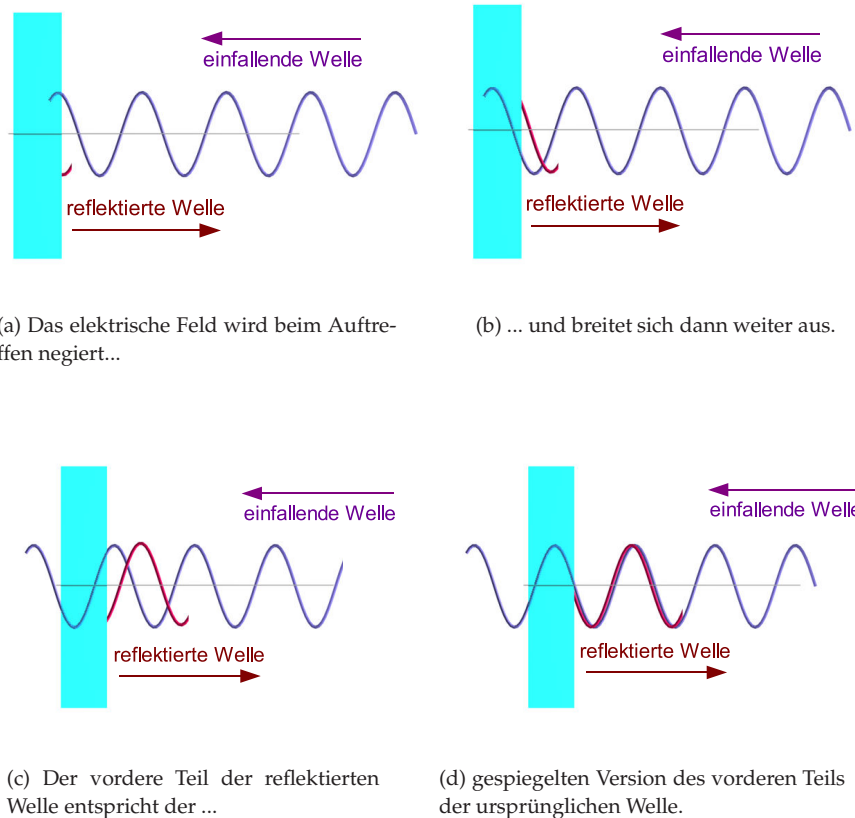


Abbildung 7.2.6: Momentaufnahmen (zu unterschiedlichen Zeiten) der Reflexion einer Welle an einer Oberfläche. Beim Einfall auf das optisch dichtere Medium (größere Brechzahl), also z.B. von Luft nach Glas, ergibt sich ein Phasensprung von π . Die Brechzahl des Materials weicht hier nur geringfügig von der Brechzahl im umgebenden Medium ab. Bei einer deutlichen Abweichung würde die Wellenlänge im Material (blau) deutlich kürzer sein.

In die Distanz $2d$ passen dementsprechend $2dn/\lambda$ Wellenlängen des Lichts, da bei konstanter Lichtfrequenz⁴ die Wellenlänge wegen $c = \lambda f$ mit $1/n$ skaliert.

Eine Wellenlänge entspricht gerade einer Phasendifferenz von 2π . Daher beträgt die Phasendifferenz zwischen den beiden reflektierten Wellen letztlich

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{nd}{\lambda} \cdot \pi. \quad (7.10)$$

Eine Verstärkung des reflektierten Lichts ist zu erwarten, wenn

$$\Delta\phi = N2\pi \quad (7.11)$$

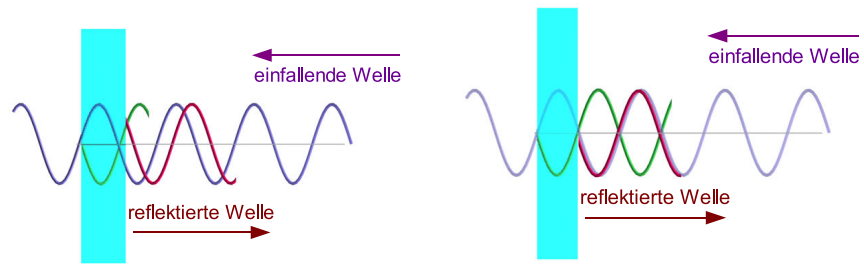
bzw.

$$2nd = N\lambda. \quad (7.12)$$

für ganzzahliges N gilt.

Bei dieser Argumentation haben wir noch ein kleines (aber wichtiges) Detail außer Acht gelassen. In Abschnitt 6.3 (Fresnelgleichungen) wurde auf die Reflexion von Licht an einer Grenzschicht näher eingegangen. Dabei wurde ein

⁴Diese muss aufgrund der Energieerhaltung und $E = hf$ konstant sein.



(a) Interferenz zwischen roter und grüner Welle. Die Interferenz ist eher konstruktiv.

(b) Destruktive Interferenz. Die grüne und die rote Welle schwingen gegenphasig, da die Dicke der Glasplatte gerade $\lambda/(2 \cdot n)$ beträgt.

Abbildung 7.2.7: Interferenz der beiden reflektierten Wellen (blau und rot). Die grüne Welle wurde ohne Phasensprung reflektiert (Reflexion vom optisch dichten ins optisch dünne Medium). Die Brechzahl des Materials weicht hier nur geringfügig von der Brechzahl im umgebenden Medium ab. Bei einer deutlichen Abweichung würde die Wellenlänge im Material (blau bzw. grün) deutlich kürzer sein.

Detail der Fresnelgleichungen nicht erwähnt: Für die Reflexion von Licht, das vom optisch dünnen Medium⁵ (z.B. Luft) auf ein optisch dichteres Medium einfällt, ergibt sich ein zusätzlicher Phasensprung von π (vgl. Abb. 7.2.6).

Dies wird nun wichtig, denn daraus folgt, dass dieser zusätzliche π -Phasensprung auch in Gleichung 7.12 beachtet werden muss. Gl. 7.12 wird demnach zu

$$2nd = \left(N + \frac{1}{2}\right) \lambda. \quad (7.13)$$

Wir sind damit in der Lage, die Dicke einer Seifenhaut zu berechnen. Wenn eine Stelle uns z.B. gelb ($\lambda \approx 550 \text{ nm}$) erscheint, so wissen wir, dass die Dicke dort nach Gleichung 7.13

$$d = \frac{\lambda}{4n} + N \frac{\lambda}{2n} \quad (7.14)$$

gegeben sein muss. Aufgrund des unbekanntnen N kann die Dicke nicht eindeutig bestimmt werden. Ändert man die Beobachtungsrichtung, aus der man eine bestimmte Stelle der Seifenblase sieht, so ändert sich der Farbeindruck.⁶ Dies liegt daran, dass die effektive Dicke durch die Winkeländerung natürlich (gemäß dem Kotangens) variiert.

Kurz vor dem Zerplatzen ergibt sich bei Seifenblasen ein weiterer interessanter Effekt. Die Seifenblase erscheint kurzzeitig schwarz bzw. farblos (Abb. 7.2.8). Der Grund hierfür ist wieder Gleichung 7.13 zu entnehmen. In diesem Fall lässt sich die Gleichung nicht erfüllen, denn die linke Seite ist aufgrund der Dicke, die dann gegen Null strebt, näherungsweise ebenfalls Null. Die rechte Seite ist aber für $\lambda \neq 0$ ungleich Null. Also ergibt sich für keine Wellenlänge eine Verstärkung, sondern in jedem Fall eine Abschwächung.

Die Seifenblase ist nicht das einzige Objekt, das seine schillernden Farben der Interferenz an dünnen Schichten verdankt. Bei viele Tieren, aber auch

Vor dem Zerplatzen wird die Seifenblase schwarz

⁵entspricht geringer Brechzahl

⁶Um wirklich den Farbeindruck, den ein menschlicher Betrachter wahrnimmt, zu berechnen, ist es natürlich notwendig, sowohl das Beleuchtungsspektrum (Sonne) als auch die spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfentypen einzuberechnen.



Abbildung 7.2.8: Kurz vor dem Zerplatzen wird die Seifenblase farblos und vergleichsweise dunkel.

bei unbelebten Objekten erhalten wir solche Farbeffekte. *Perlmutter* erzielt seine irisierende Wirkung durch Schichten aus Aragonit und organischen Substanzen sowie der Beugung an der feinen regelmäßigen Oberflächenstruktur (vgl. Abb. 7.2.9). Die Schichtdicken liegen dabei im Bereich weniger hundert Nanometer⁷ und das teilweise Schillern von Fleisch (*Labradorisieren*) hat seine Ursache ebenfalls in der Interferenz des Lichts an dünnen Schichten. In neuerer Zeit werden *Interferenzpigmente* auch in Lacken verwendet und führen so zu einem schillernden Farbeffekt. In diesem Fall werden z.B. dünne *Oxidschichten* auf Mica-Plättchen aufgebracht.

Neben diesen gewollten Farbeffekten sind Interferenzfarben aber auch als Anzeichen von dünnen Schichten ein ungewollter Nebeneffekt. Am bekanntesten sind hier sicher die Interferenzfarben auf ölverschmutztem Wasser (dünner *Ölfilm* auf der Wasseroberfläche). Interferenzen sind allerdings bei natürlichem Licht (Sonne) nur dann sichtbar, wenn die Schichtdicke sehr klein ist. Wenn die Schichten dicker als die halbe Kohärenzlänge (bei Sonnenlicht: einige Mikrometer) werden, so ist eine – wie bisher angenommene – kohärente Überlagerung nicht mehr möglich (siehe Abschnitt 7.9).

Das Prinzip der Farbgenerierung bei Seifenblasen kann noch weiter ausgebaut werden, indem mehrere Schichten übereinandergelegt werden. In diesem Fall kann man erreichen, dass sich für weite Teile des Spektrums bei der Reflexion eine destruktive Interferenz ergibt und die Reflexion so unterdrückt wird. Hochwertig entspiegelte Gläser haben diese Art der Beschichtung zur *Reflexunterdrückung* (*Antireflexbeschichtung*). Allerdings bleibt die konstruktive Interferenz für einige wenige Wellenlängen bestehen, so dass die Gläser entsprechender Optiken teilweise eine Eigenfarbe (z.B. rot) zu haben scheinen.

Sowohl die Stärke als auch die Wellenlängenabhängigkeit des Reflexionsfaktors hängt stark mit der Anzahl an Schichten zusammen, die zur Reflexion führen. Für viele $\lambda/4$ -Schichten (im Grenzfall unendlich viele) ergibt sich eine Abhängigkeit gemäß

$$R = 1 - \sqrt{1 - r / \cos^2(2nd\pi/\lambda)}, \quad (7.15)$$

wie sie in Abb. 7.2.10 dargestellt ist.⁸ Dabei bezeichnet r den Betrag des Reflexionsfaktors für eine einzelne Schicht (Gl. 6.12). Wenn man zu weniger Schicht-

Perlen und Interferenzlacke erzielen die Farbigeit durch Interferenzeffekte

Antireflexschichten arbeiten durch destruktive Interferenz

⁷Optics Express 12, S. 4847 (2004)

⁸M.F. Land, D.E. Nilsson, "Animal Eyes", Oxford University Press 2002



(a) Haliotis iris



(b) Öl auf Straße, Foto mit freundlicher Genehmigung von Jason Eppink



(c) Reflexion von Fischschuppen



(d) Lapradorsierung bei Schinken

Abbildung 7.2.9: Einige weitere Interferenzeffekte. Farbtafel: 12.0.35

en geht, dann verringert sich das Maximum des Reflexionsfaktors und die Verteilung über die Wellenlänge wird breiter.

Praktisch alle Reflexionen im Tierreich werden durch entsprechende Interferenzspiegel realisiert. Nachtaktive Tiere (z.B. *Katzen*, *Hunde*, *Wale*, *Pferde*, einige *Spinnen*) aber auch z.B. diverse Fische (u.a. Lachse) nutzen das einfallende Licht besonders gut aus, indem bei ihnen nach Durchlauf des Lichts durch die Schicht lichtempfindlicher Sehzellen das Licht reflektiert wird und erneut durch die Schicht läuft. Die reflektierende Schicht nennt sich *Tapetum lucidum*. Ein Photon hat daher zweimal die Chance absorbiert zu werden. Dieser Effekt erklärt auch das Leuchten der Augen dieser Tiere, wenn sie beleuchtet werden (Abb. 7.2.11, siehe auch Abschnitt 5.8).

Die Hauptanwendung der Interferenzspiegel ist aber natürlich in der Änderung des Erscheinungsbilds zu sehen. Die *schillernden Farben* von *Pfauedern* oder von Stockentenerpeln beruhen ebenso wie die metallisch anmutenden Farben einiger *Schmetterlinge* und *Käfer* (s. Abb. 7.2.12) auf komplizierten Inter-

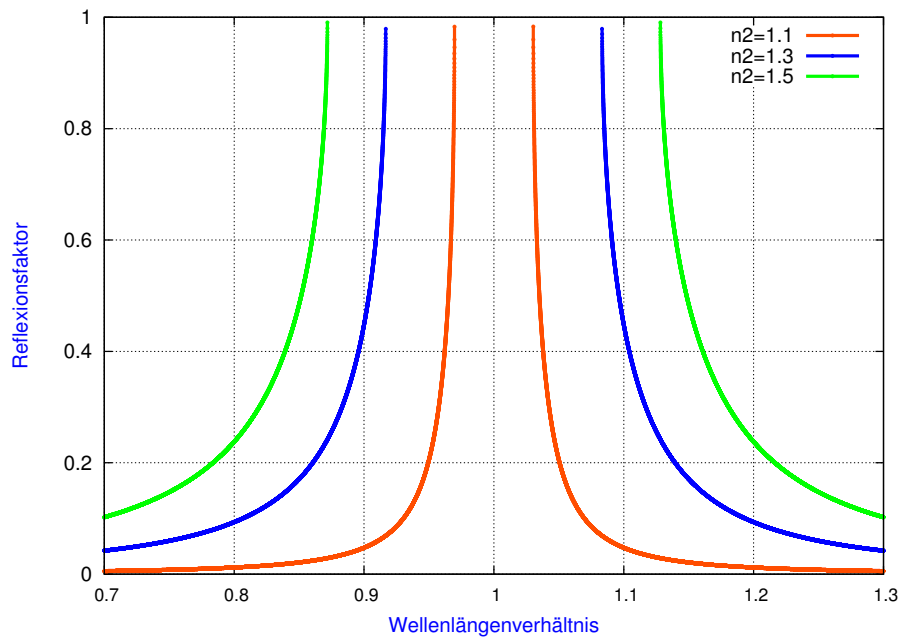


Abbildung 7.2.10: Reflexionsfaktor in Abhängigkeit der Wellenlänge für senkrechten Einfall auf einen $\lambda/4$ -Schichtstapel (mit unendlicher Ausdehnung).

ferenzeffekten an Schichtsystemen, teilweise in Kombination mit Beugung und Streuung.⁹ Der Zweck solcher Lichteffekte kann in der Abschreckung oder Verwirrung von möglichen Räufern, der Tarnung (s.u.) oder aber der Partnersuche liegen.

Bei *Neonfischen* verliert sich die blaue Leuchtkraft unter Stress und kann vom Fisch aktiv abgeschaltet werden. Hierzu wird der Abstand der für die Multischicht-Reflexion verantwortlichen Guaninkristalle verändert und damit das Reflexionsmaximum in den ultravioletten Spektralbereich verschoben.

Auch die silbrig wirkenden Reflexionen von vielen Fischen beruhen auf der Reflexion durch Mehrschichtsysteme. Diese Tarnung durch Spiegelung funktioniert dann sehr gut, wenn das den Fisch umgebende Medium sehr homogen texturiert ist. Wenn z.B. ein Raubfisch von unten in Richtung Wasseroberfläche schaut, dann wird er die Brechungen des Sonnenlichts an der Wasseroberfläche als ein Glitzern wahrnehmen. Ein nichtreflektierender Fisch wird als dunkle Silhouette vor diesem Glitzern leicht wahrgenommen werden. Ganz anders der spiegelnde Fisch. Ein Spiegel spiegelt das umgebende Glitzern und die Abschattungswirkung wird aufgehoben. Der Fisch ist also deutlich schlechter wahrnehmbar.¹⁰ Bei Fischen wie dem Hering wird die wellenlängenunabhängige Reflexion durch Mehrschichtsysteme durch eine abwechselnde Folge von $\lambda/4$ -Schichten aus Guanin ($n=1.83$) und Zytoplasma ($n=1.34$) erreicht, indem mehrere Schuppen mit spektral gegeneinander verschobenen Reflexionsmaxima übereinander liegen. Wenn solche Fische nicht mehr ganz frisch sind, verlieren sie einige dieser Schuppen und reflektieren dadurch in schillernden Interferenzfarben.

⁹z.B. Berthier und Chevalley, Spektrum der Wissenschaft Spezial: Farben, S. 28-34

¹⁰Bei allen Tarnvorrichtungen von Tieren muss auch immer bedacht werden, dass die räumliche Auflösung des Jägers oft deutlich geringer ist, als das was wir von unseren Augen gewohnt sind. So erzielen geringe optische Effekte oft eine große Wirkung.



Abbildung 7.2.11: Reflexion am Mehrschichtsystem in der Retina eines Waschbärs. Sehr schön ist die Abhängigkeit der spektralen Verteilung des Reflexionsfaktors vom Einfallswinkel (gelbe und grüne Augen) zu sehen. Foto mit freundlicher Genehmigung von Hobvias Sudoneighm.

7.3 Beugung - Übersicht und einführende Bemerkungen

Beugung beruht genau wie die Interferenz auf der Überlagerung von Wellen. Im Gegensatz zur Interferenz werden bei der Beugung viele Wellen überlagert. Wir wollen hier auf eine mathematische Ableitung der Beugungsformeln verzichten und stattdessen einige wesentliche Resultate anführen sowie ein einigermaßen anschauliches Bild der Beugung entwickeln. Die Betonung liegt dabei aber auf „einigermaßen“. Leider ist die Beugung ein kompliziertes Phänomen und es ist zunächst mühsam, sich mit ihr vertraut zu machen. Um diesen Abschnitt und den Rest des Kapitels anzugehen, benötigen Sie daher — je nach mathematischer und physikalischer Vorbildung — ein nicht zu vernachlässigendes Maß an Motivation und eventuell auch Frustrationstoleranz. Für all jene, die hierauf verzichten wollen, werde ich im folgenden kurz einige wesentliche Fakten listen:

Beugung = Überlagerung vieler Wellen

- Licht breitet sich nur näherungsweise geradlinig aus. Die Vorstellung eines (unendlich) dünnen Lichtstrahls ist eine Idealisierung. Ein reales Lichtbündel hat eine endliche Ausdehnung und eine endliche Divergenz, d.h. das Licht „läuft auseinander“.
- Auch bei der Fokussierung kann Licht nicht auf einen unendlich kleinen

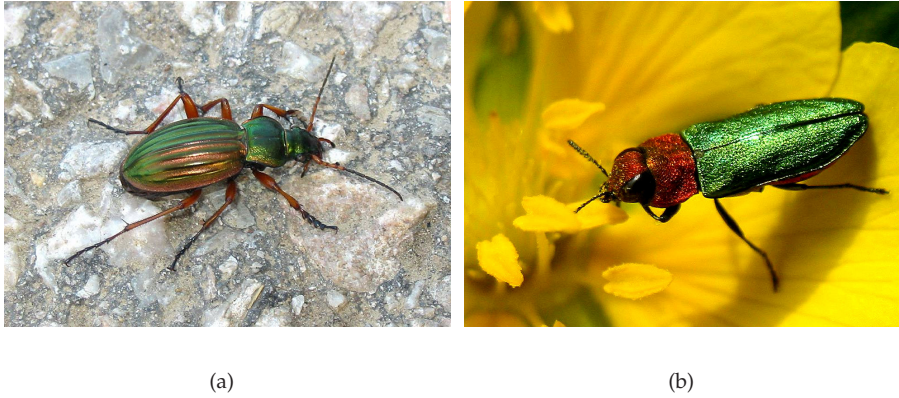


Abbildung 7.2.12: Zwei schillernde Käfer, Bilder mit freundlicher Genehmigung von Walter Müller. Farbtafel: 12.0.34

Bereich gebündelt werden. Die minimale erzielbare Größe eines Lichtflecks liegt in der Größenordnung der halben Lichtwellenlänge. Da die Abbildung als ein Sonderfall der Lichtfokussierung aufgefasst werden kann gilt diese Beschränkung ebenfalls für Abbildungen aller Art.¹¹ Beachten Sie: Nicht begrenzt ist die Auflösung der Positionsbestimmung (durch Abbildung) *eines* Objekts. Eine Begrenzung ergibt sich lediglich in der „Punkttrennung“, d.h. *zwei (oder mehrere)* eng benachbarte Objektpunkte werden nicht als getrennte Punkte gesehen.

- Fällt Licht auf eine kleine Begrenzung, dann wird das Licht an dieser Begrenzung „gebeugt“. Es ergibt sich eine mehr oder weniger starke Auffächerung des Lichts.
- Fängt man das gebeugte Licht auf einem Schirm (oder mittels einer Kamera) auf, so zeigt sich, dass es Positionen mit hoher Intensität gibt, andererseits aber auch Stellen gefunden werden, bei denen die Intensität auf Null fällt.
- Die Lichtverteilung in der Schirmebene hängt im wesentlichen von der Lichtwellenlänge, der Öffnung selbst und dem Abstand des Schirms von der Öffnung ab. Für den Sonderfall einer großen Entfernung (mehrere Meter) ergibt sich — abgesehen von einer einfachen Skalierung — näherungsweise dieselbe Intensität wie im Fokus einer nachgeschalteten Linse.
- Für den elementaren (und wichtigen) Sonderfall einer kreisförmigen Begrenzung des Lichts ergeben sich im Beugungsbild abwechselnde Ringe von hoher Intensität und der Intensität Null.
- Da die Lichtverteilung des gebeugten Lichts von der Wellenlänge abhängt überlagern sich unterschiedliche Farbanteile in komplizierter Weise. Eine Reihe optischer Phänomene (z.B. Corona, Glorie) zeichnet sich so durch farbige Ringmuster aus.
- Feine Gitter führen zu einer Aufspaltung des Lichts in eine Ebene senkrecht zur Gitterorientierung. Wieder ist die Aufspaltung abhängig von der Wellenlänge.

¹¹Viele Tricks sind bekannt, um die Auflösung bei der Abbildung zu verbessern. Teilweise hängen diese Tricks von der Definition der „Auflösung“ ab, teilweise sind sie über nichtlineare Effekte nur für spezielle Anwendungen realisierbar.

- Entsprechende Gitterstrukturen werden sowohl in der Natur (z.B. verschiedene Schmetterlinge) als auch der Technik (z.B. Sicherheitshologramme auf Geldscheinen) genutzt, um winkelabhängig verschiedene Farbeffekte zu generieren. Aufgrund der Winkelabhängigkeit ergibt sich eine „irisierende Wirkung“ (Farbe variiert mit Blickrichtung).
- Interferenz tritt nur auf, wenn die interferierenden Lichtanteile zueinander „kohärent“ sind. Für die Beurteilung der Interferenz ist es daher notwendig, sowohl die Lichtquelle also auch die Geometrie des Experiments in Betracht zu ziehen. Bei der Überlagerung vieler Lichtanteile muss also berücksichtigt werden, wie stark die unterschiedlichen Anteile untereinander korreliert sind denn zueinander unkorrelierte (inkohärente) Anteile werden anders überlagert (Addition der Intensitäten) wie zueinander korrelierte Anteile (Addition der (elektrischen) Felder).
- Die Kohärenzlänge ist ein Maß zur (teilweisen) Beschreibung der Kohärenz. Sie gibt an, wie stark unterschiedliche Wege von der (punktförmigen) Lichtquelle bis zum Beobachtungspunkt in der Länge variieren können, ohne dass die Interferenzfähigkeit verloren geht¹². Für Sonnenlicht beträgt sie lediglich einige Mikrometer während sie für das Licht eines Lasers viele Kilometer betragen kann.

7.4 Beugung

Wenn eine Lichtwelle auf ein kleines Hindernis trifft, dann passieren aus Sicht des Strahlenmodells merkwürdige Dinge. Das Licht bildet nicht einfach nur Schattenbereiche, sondern ein Teil des Lichts dringt auch in Schattenbereiche ein.

Der berühmte *Poissonsche Fleck* ist solch eine helle Stelle im Zentrum eines Schattenbereichs. Poisson, einer der angesehensten Mathematiker seiner Zeit, sagte diesen Fleck mittels der Wellentheorie eines jungen französischen Brückenbauingenieurs namens *Fresnel* voraus. Er wollte damit zeigen, dass diese Wellentheorie offensichtlich Unsinn war. Zu seinem großen Erstaunen zeigte das daraufhin durchgeführte Experiment aber genau die berechnete Helligkeit im Zentrum des Schattens und die Wellentheorie des Lichts konnte so 1818 eindrucksvoll bestätigt werden.

Wie kann man sich nun die Wellenausbreitung in der Nähe von Hindernissen vorstellen? Das einfallende Licht führt zu einer Anregung vieler kleiner Kugelwellen, die sich dann im folgenden weiter ausbreiten. Natürlich entstehen die Kugelwellen nur dort, wo kein Hindernis vorhanden ist.

Eine Kugelwelle wird mathematisch durch $E = 1/r \cdot \cos(2\pi r/\lambda)$ beschrieben (siehe Abb. 7.1.3). Durch diese Form ist einerseits sichergestellt (Argument des Kosinus), dass die Wellenfronten Kugelschalen bilden und dass andererseits die Energieerhaltung erfüllt ist (Intensität im Abstand r sinkt auf $1/r^2$). Wir müssen nun die Überlagerung unendlich vieler Kugelwellen betrachten, wenn wir uns für das Feld $E(P)$ in einem Punkt P interessieren. Dies geschieht ein-

¹²Wesentlich ist nicht die rein geometrische Länge sondern die sogenannte „optische Länge“, also das Produkt aus Brechzahl und geometrischer Länge.

Poissonscher Fleck: Licht im Schattenbereich

Anschauliches Bild: Überlagerung vieler Kugelwellen

fach durch Summation (bzw. Integration):

$$E'(P) = \int_A E(x, y) \frac{1}{r} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} r\right) dx dy \quad (7.16)$$

Die Integration erfolgt über die freie Fläche der Apertur A . r bezeichnet den Abstand vom Punkt P zu dem (variablen) Punkt (x, y) in der Apertur. Eine genauere Analyse verschiedener Beugungsmodelle führt auf verschiedene, aber zu Gl. 7.16 analoge Gleichungen.

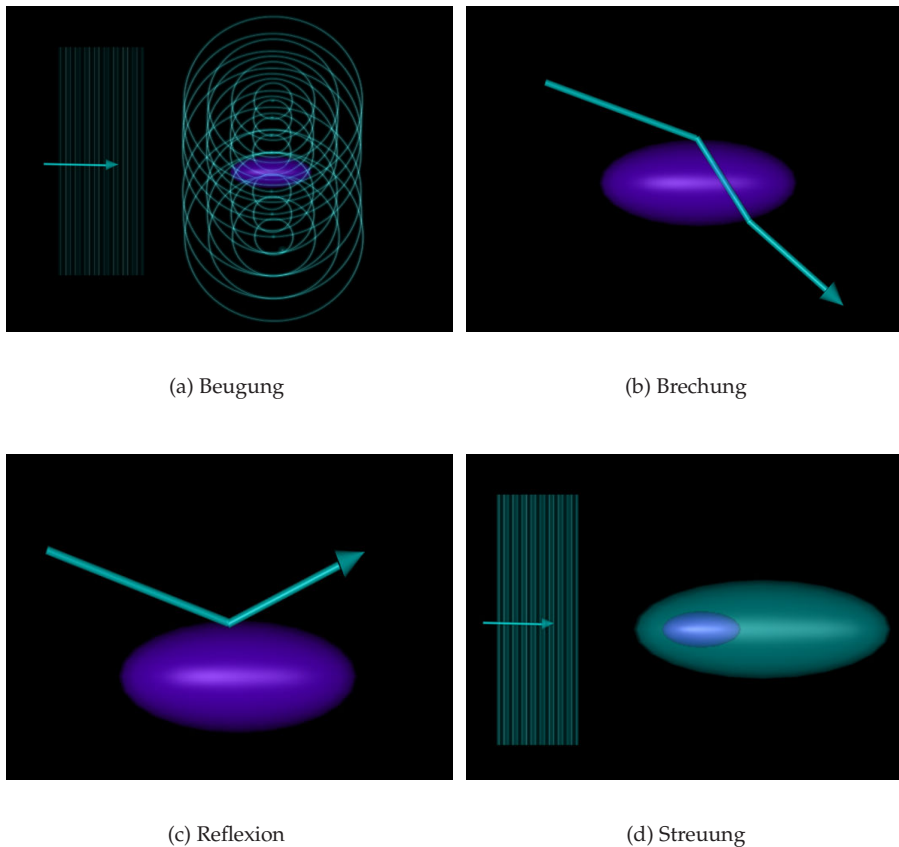


Abbildung 7.4.13: Verschiedene Modelle zur Ausbreitung und Interaktion von Licht mit Materie. Je nach zu betrachtendem Phänomen und den genauen Gegebenheiten beschreiben die Modelle mehr oder weniger gut die Realität.

Die Beugung ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn das Licht auf sehr kleine Strukturen fällt. Was ist aber nun der Unterschied zur Streuung? Auch dort sind ja sehr kleine Partikel die Ursache für die Richtungsänderung des Lichts. Letztlich ist die Frage an sich falsch. Egal, ob man den Vorgang Streuung, Reflexion oder Beugung nennt, es gibt zunächst eben nur *eine* physikalische Wechselwirkung des Lichts mit dem Objekt. Je nach Versuchbedingung (und damit insbesondere der Strukturgröße der Objekte) kann man diese Wechselwirkung durch verschiedene vereinfachte Modelle, eben Reflexion, Beugung, rigorose Beugung mittels Maxwell-Gleichungen, Streuung oder auch quantenmechanisch beschreiben. So ist die Beugungstheorie z.B. nicht adäquat, um die Wechselwirkung mit sehr kleinen Partikeln (kleiner der Wellenlänge) zu beschreiben. Stattdessen wird hierfür die Rayleigh-Streutheorie verwendet. Umgekehrt kann diese Streutheorie wieder nicht für die Wechselwirkung mit großen Partikeln eingesetzt werden.

Streuung, Brechung, Reflexion und Beugung: „Alles eigentlich dasselbe“....

Verschiedene Autoren verwenden die Begriffe Streuung und Beugung unterschiedlich (und einige lehnen eine Aufspaltung sogar gänzlich ab). Wir wollen im Folgenden als „Beugung“ die vergleichsweise einfache Überlagerung von Elementarwellen (Gl. 7.16) bezeichnen. Das macht Sinn, denn mit diesem Modell können wir eine Reihe von wichtigen optischen Phänomenen mit ausreichender Genauigkeit beschreiben.

7.5 Beugung an Gittern und Spalten

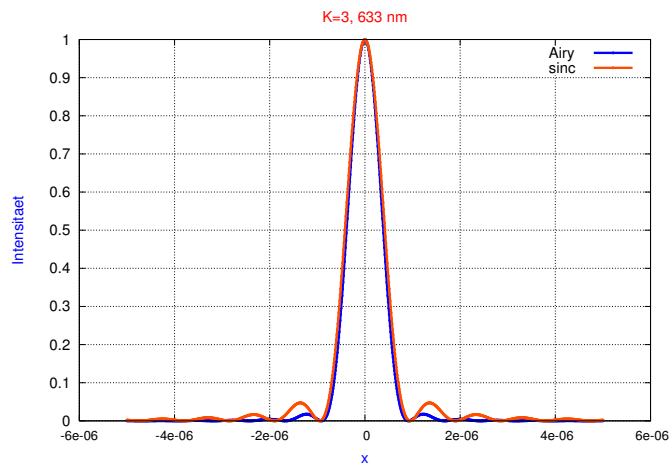
Betrachten Sie eine nahezu punktförmige, helle Lichtquelle¹³ durch einen dünnen *Spalt* (Sie können z.B. zwei Bleistifte eng (deutlich geringer als einen Millimeter) zusammenbringen oder auch mit den Fingern eine kleine Öffnung schaffen). Anstatt der punktförmigen Quelle werden Sie einen farbigen Streifen mit Maximas und Minimas sehen (Abb. 7.5.15). Durch Variation der Spaltbreite können Sie dieses Muster beeinflussen. Noch schönere Effekte erzielen Sie, wenn Sie die Lichtquelle durch ein engmaschiges Gitter (z.B. sehr feine *Gardinen*, Damenstrumpfhosen, *Regenschirme*) betrachten (Abb. 7.5.18 und 7.5.14).

Betrachtung von Lichtquellen durch feine Stoffe (z.B. Gardinen)

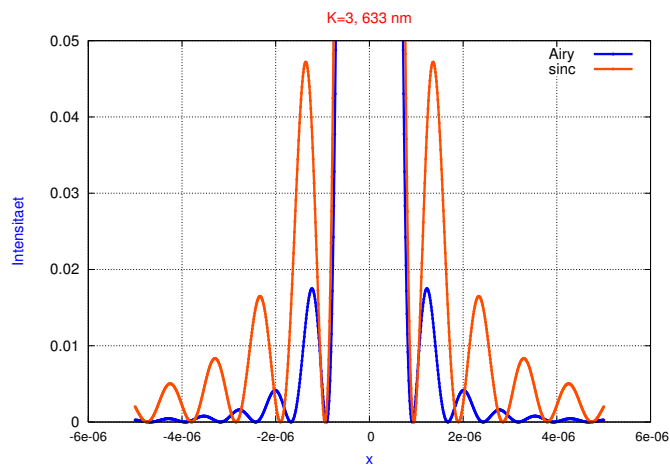


Abbildung 7.5.14: Beugung am Gitter einer Vogelfeder. Farbtafel: 12.0.37

¹³hierzu eignen sich weit entfernte Halogenbirnen oder LEDs, aber auch die Reflexion der Sonne auf gekrümmten spiegelnden Flächen (z.B. Autokarosserie)



(a) Gesamtansicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 7.5.15: Intensität bei Beugung am Loch (blau) und am Spalt (orange) für die Beleuchtung mit einer Wellenlänge. Diese Beugungsfiguren ergeben sich im Fernfeld und im Fokus von optischen Systemen. Ein ideal punktförmiger Objektpunkt wird also durch ein rotationssymmetrisches Abbildungssystem in einen ausgedehnten Bildpunkt abgebildet. Die Skalierung der Beugungsbilder ist proportional zur Wellenlänge des Lichts.

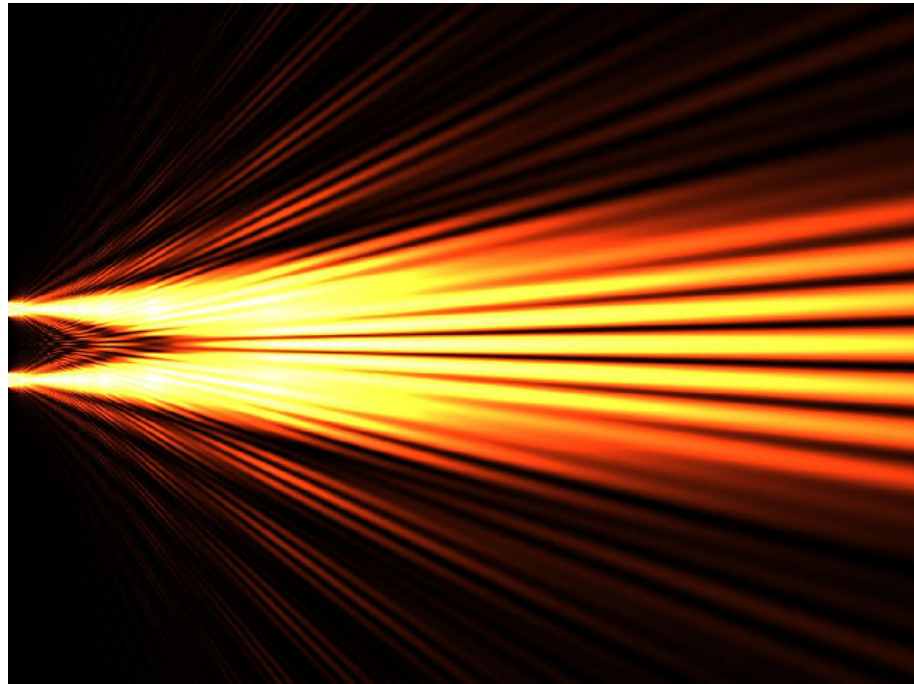


Abbildung 7.5.16: Beugung am Doppelspalt. Dargestellt ist die Intensitätsverteilung (Simulation) in einer Ebene, in der die Spalte sowie die Ausbreitungsrichtung liegen, Grafik mit freundlicher Genehmigung von John Murphy, <http://www.hotquanta.com>

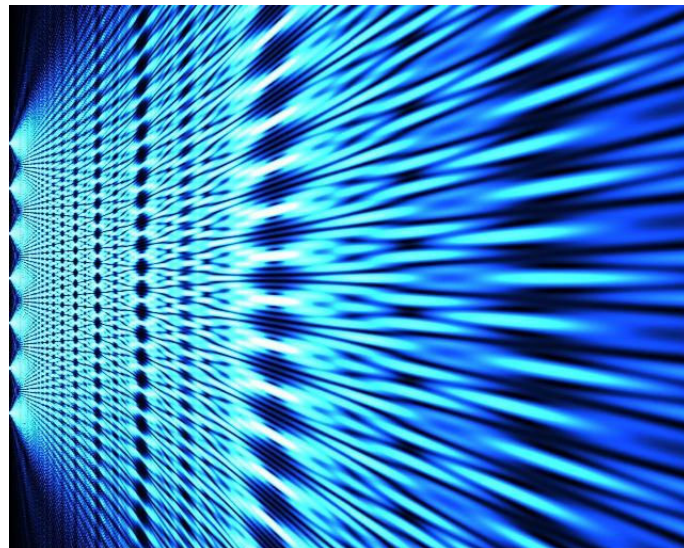
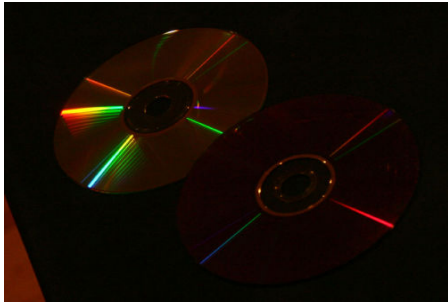
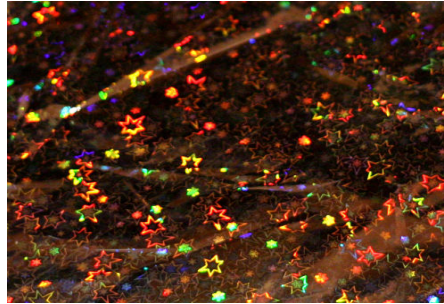


Abbildung 7.5.17: Beugung am einem „Gitter“ mit sieben Spalten. Dargestellt ist die Intensitätsverteilung (Simulation) in einer Ebene, in der die Spalte sowie die Ausbreitungsrichtung liegen, Grafik mit freundlicher Genehmigung von John Murphy, <http://www.hotquanta.com>



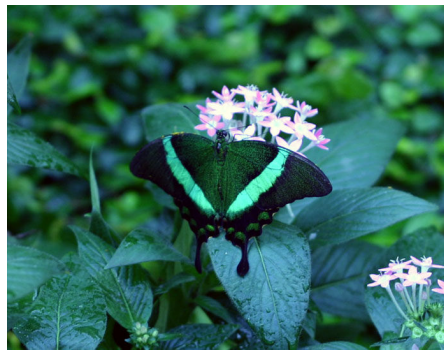
(a) Beugung an Compact Discs



(b) Beugung an den Gittern eines Geschenkpapiers



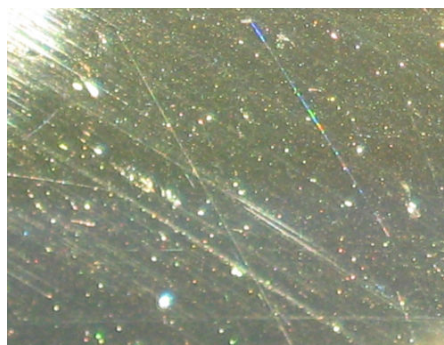
(c) Beugung am Gitter (eines Damenstrumpfes). Die Gitterorientierung ist dabei variabel. Ein ähnlicher Effekt wird bei sehr feinen Gardinen oder Regenschirmen beobachtet.



(d) Schwalbenschwanz-Schmetterling



(e) Ein Öltropfen auf dem Flügel ändert die Interferenzbedingung (andere Brechzahl) und statt Blau wird Grün reflektiert, Foto mit freundlicher Genehmigung von P. Vukusic.



(f) Beugung an Kratzern auf einer Scheibe

Abbildung 7.5.18: Verschiedene Beugungseffekte. Farbtafel: 12.0.36

Warum ist dies so? Wir werden im Folgenden versuchen, eine anschauliche Erklärung zu finden.¹⁴ Hierzu betrachten wir das Lichtfeld in großer Entfernung von der beugenden Struktur (warum das sinnvoll ist, wird später klar). Abb. 7.5.19 veranschaulicht die zu Grunde liegende Geometrie.

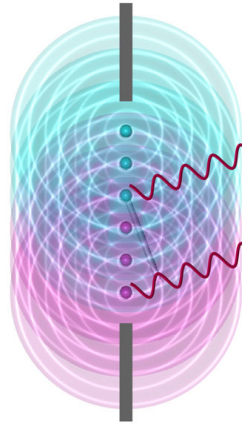


Abbildung 7.5.19: Zur Beugung am Spalt

Gemäß der Beugungstheorie müssen wir das einfallende Lichtfeld in der Ebene der Apertur (Spalt) in sphärische Elementarwellen (Kugelwellen) zerlegen. Von dieser Ebene starten also viele (bzw. unendlich viele) Kugelwellen und breiten sich im Raum aus. Dies ist zunächst eine merkwürdige Sicht auf die Dinge, denn man kann demnach dann erwarten, dass das einfallende, parallele Licht nicht etwa parallel weiter läuft, sondern sich mehr oder weniger im gesamten Raum jenseits der Apertur ausbreitet. Dies steht aber ganz offensichtlich im Widerspruch zu unserer Erfahrung, dass kollimiertes (=paralleles) Licht, das durch eine Blende fällt, weiter parallel fortschreitet.

Unsere Erfahrung stimmt. Allerdings nur zu einem gewissen Grad. In der Tat ergibt sich für die Photonen eine von Null verschiedene Wahrscheinlichkeit, irgendeinen Ort jenseits der Apertur zu treffen. Diese Wahrscheinlichkeit ist umso größer, je stärker die Begrenzung des Lichts durch die Apertur ist, also je kleiner die Blende ist. Trotzdem werden wir eine wirklich starke Intensität des Lichts in der Richtung finden, die wir auch im Strahlenmodell erwarten, also in Richtung des einfallenden Lichts.

Um das zu verstehen, müssen wir die Überlagerung der Elementarwellen betrachten. Dazu gehen wir zunächst in einen vergleichsweise großen Abstand von der Apertur. Diesen Sonderfall nennt man *Fraunhofer Beugung*. Damit zwei Strahlen, die zu verschiedenen Wellen gehören (z.B. die roten Strahlen in Abb. 7.5.19) am selben Ort an einem unendlich weit entfernten Schirm auftreffen und damit die Voraussetzung für eine Überlagerung (=Interferenz) gegeben ist, müssen die beiden Strahlen parallel zueinander laufen. Im Folgenden betrachten wir daher die Beugung am Spalt in einer idealerweise unendlich entfernten Ebene.

Bei der Überlagerung der beiden Strahlen müssen wir dann die beiden elek-

¹⁴Eine rein mathematische Erklärung ergibt sich sehr einfach wenn die Grundlagen der Fouriertransformation bekannt sind. Es zeigt sich nämlich, dass die Intensitätsverteilung, die wir sehen, durch das Quadrat der Fouriertransformation der beugenden Struktur (z.B. Gitter) gegeben ist, siehe z.B. J.W. Goodman, "Fourier Optics".

Fraunhofer Beugung: vereinfachte mathematische Beschreibung der Beugung für große Abstände

trischen Felder (unter Berücksichtigung der Phase) addieren. Das heißt konkret, dass die Überlagerung dann einen großen Wert ergibt, wenn beide Strahlen mit derselben Phase ankommen und daher dieselbe Weglänge durchlaufen haben. Dies ist idealerweise aber nur in einer Richtung parallel zur Richtung der einfallenden Strahlen (in Abb. 7.5.19 parallel zur optischen Achse) möglich. Alle Strahlen, die in diese Richtung laufen, überlagern sich konstruktiv und führen so zu einer hohen Intensität. Sobald man eine andere Schar von parallelen Strahlen – und damit eine andere Ausbreitungsrichtung – wählt, nimmt die konstruktive Interferenz und damit die Intensität ab. Für Richtungen, die weitab von der Ausbreitungsrichtung liegen, ergibt sich in der Regel eine Überlagerung von vielen Kosinusschwingungen mit annähernd „zufälliger“ Phase¹⁵, so dass in Summe Null (bzw. ein sehr kleiner Wert) für die Intensität zu erwarten ist. Bei näherer Betrachtung widerspricht das Beugungsmodell also nicht unserer Alltagserfahrung.

Wir wollen uns aber nun qualitativ überlegen, wie bei sehr kleinen Aperturen die Intensitätsverteilung auf einem weit entfernten Schirm im Detail aussieht. Hierzu suchen wir zunächst die Position des ersten Minimums im Intensitätsbild. Ein Minimum ergibt sich, wenn die Überlagerung aller dort ankommenden Wellen destruktiv ist und die Summe aller Wellen exakt Null ergibt. Diese Position können wir durch eine einfache gedankliche Aufspaltung der Apertur in zwei gleich große Teilbereiche finden (Abb. 7.5.19). Nun wird jeweils ein Paar von Wellen aus einer Welle der oberen Hälfte und einer Welle der unteren Hälfte gebildet (Abb. 7.5.19). Wenn sich die beiden Wellen eines Paares durch destruktive Interferenz jeweils vernichten, dann entsteht als Summe aller Paare die Intensität Null, denn jedes Paar für sich gibt summiert ebenfalls Null.

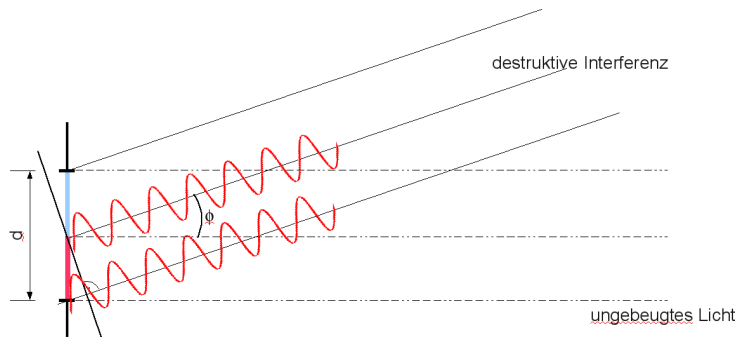


Abbildung 7.5.20: Zur Beugung am Spalt: Destruktive Interferenz ergibt sich dann, wenn jeweils zwei Strahlen im Abstand $d/2$ (in der Spaltebene) eine halbe Wellenlänge Phasendifferenz aufweisen.

Damit dies passiert, muss die Phasendifferenz der beiden zusammengehörigen Wellen jeweils π (bzw. $\lambda/2$ auf die optische Wegdifferenz umgerechnet) betragen. Dies bestimmt die Richtung, in der die perfekte destruktive Interferenz auftritt denn in der Aperturebene starten alle Elementarwellen zunächst mit derselben Phase. Die Wegdifferenz zwischen den beiden Strahlen in Abb. 7.5.19 muss also genau $\lambda/2$ betragen. Das lässt sich aber leicht erreichen, wenn die Richtung ϕ der beiden Strahlen so gewählt wird, dass (Abb. 7.5.20)

$$\sin \phi = M \frac{\lambda}{d} \quad (7.17)$$

ist. Dabei ist M eine ganze Zahl ungleich 0.

¹⁵Wirklich zufällig ist die Phase natürlich nicht, aber sie ist zumindest gleichverteilt.



(a) ohne Vorhang

(b) mit Vorhang

Abbildung 7.5.21: Beugung am Gitter eines Vorhangs. Farbtafel: 12.0.38

Wenn die Wegdifferenz stattdessen λ beträgt, erwartet man wieder eine konstruktive Überlagerung.¹⁶ Insgesamt ergibt sich also eine Abfolge von Maxima und Minimas der Intensität (Abb. 7.5.15). Da nach Gl. 7.17 der Sinus des Winkels linear von der Wellenlänge abhängt, liegen die Extrema für unterschiedliche Wellenlängen an verschiedenen Positionen.

Beugung am Gitter

Ganz ähnlich kann man auch die *Beugung an Gittern* analysieren. Eine konstruktive(!) Interferenz ergibt sich, wenn Gl. 7.17 erfüllt ist. In diesem Fall ist der Gitterabstand d . Im Unterschied zur Beugung am Einzelspalt ist die Intensität der Nebenmaxima wesentlich stärker und an der Position der Minima des Einzelspalts erhält man Maxima.

Eine Linse transformiert das Fernfeld aus dem Unendlichen in die Fokalebene der Linse

Verwendet man nach der beugenden Struktur eine Linse, dann kann man das Fernfeld, das sich ideal im Unendlichen ergibt, in die Brennebene der Linse holen. In jedem Punkt des Fernfelds interferieren zueinander parallele Strahlen. Eine Linse sorgt dafür, dass zueinander parallele Strahlen jeweils in einem Punkt in der Brennebene der Linse fokussiert werden. Dabei bleiben die Phasenbeziehungen erhalten. D.h. eine konstruktive Interferenz im Unendlichen ergibt auch eine konstruktive Interferenz in der Brennebene der Linse. Das für einen unendlich weit entfernten Schirm abgeleitete Resultat ist von großer praktischer Bedeutung, weil es damit eben auch in der Bildbene von optischen Systemen (z.B. auf der Netzhaut unseres Auges) gilt.

Die starke Wellenlängenabhängigkeit in den Gleichungen (z.B. Gl. 7.17) führt zu den ausgeprägten Farbeffekten bei der Beugung. Gitterstrukturen, zeigen sich dadurch – je nach Beobachtungsrichtung – in unterschiedlichen Farben, wie es auch bei Interferenzfarben (Seifenblase) der Fall ist.

Sogenannte *photonischen Kristallen* ergeben sich, wenn dreidimensionale

¹⁶Allerdings mit reduzierter Intensität, da die Einzelstrahlen eben unterschiedliche Längen haben und daher mit unterschiedlicher Amplitude (Energieerhaltung) interferieren. Für eine nähere graphische Begründung siehe z.B. Halliday, Resnick, Walker: „Fundamentals of Physics“, Wiley.

Mikrostrukturen mit Perioden im Bereich von einigen Zehntel der Wellenlänge auftreten. Während bei gewöhnlichen Kristallen die Abstände der Elementarbausteine (Atome) so klein sind, dass das Licht lediglich eine gemittelte Umgebung bestehend aus vielen Atomen sieht, werden die mathematische Beschreibung und die sich ergebenden Effekte bei den Dimensionen, die für photonische Kristalle wirksam werden, deutlich komplexer. Insbesondere eine starke Wellenlängen- und Winkelabhängigkeit der Reflexionsfaktoren kann beobachtet werden. Sehr schön ist dies an den Farben des *Pfau* sichtbar. Die Härchen der Feder beinhalten — wie viele andere irisierenden Vogelfedern auch — Melaninstäbchen mit einer vergleichsweise hohen Brechzahl ($n=2$), die durch Kreatin verbunden sind. Interessant ist aber vor allem die Anordnung der Stäbchen, die eben zu einer photonischen Kristallstruktur führt. Je nach (Haupt-)Farbe der Feder ergeben sich unterschiedliche Abstände zwischen den Stäbchen in der Größenordnung von ca. 150 nm. Diese Strukturierung ist dabei wesentlich für die schillernden Farben der Pfaufeder.¹⁷

7.6 Auflösung

Zweidimensional betrachtet wird die Spaltbeugung des letzten Abschnitts mathematisch etwas komplexer, wenn man das Beugungsbild eines rotierten Spaltes, also einer Kreisblende berechnen will. Dieser Fall ist natürlich von großer praktischer Bedeutung, denn die meisten optischen Systeme, so z.B. auch die Blende unseres Auges (Iris), sind mehr oder weniger rotationssymmetrisch. Es ergibt sich für die Helligkeit ein ähnlicher, aber leicht anderer Verlauf als beim Spalt (siehe Abb. 7.5.15).

Für die erste Nullstelle der Helligkeitsverteilung in der Bildebene bei Verwendung einer kreisförmigen Blende mit Blendenzahl K erhält man

$$r_A = 1,22 \lambda K. \quad (7.18)$$

Die Blendenzahl K ist dabei definiert als $K = f'/D$ mit der Brennweite f' und dem Durchmesser D der Eintrittspupille der Optik. Bei Einzellinsensystemen ist dies gerade der Linsendurchmesser. Die Abbildung eines idealen Punktes führt also zu einer ausgedehnten Bildstruktur, deren Durchmesser gerade $2 r_A$ ist. Wenn ein Objekt aus mehreren Punkten besteht, dann ist zu fordern, dass sich die einzelnen Bildpunkte nur gering überlagern. Als typische Größe der maximal zulässigen Überlagerung wird oft r_A verwendet. Zwei Objektpunkte, deren Bilder eben gerade um r_A separiert liegen, werden noch als getrennte Punkte wahrgenommen.

Gl. 7.18 bedeutet, dass die Auflösung optischer Systeme prinzipbedingt begrenzt ist. Man könnte annehmen, dass K beliebig klein gemacht werden kann und die Auflösung doch beliebig klein („gut“) realisiert werden kann. Dies ist leider nicht der Fall. Eine genauere Analyse¹⁸ zeigt, dass maximal (für stark geöffnete Systeme) eine Auflösung von ca. $\lambda/2$ (ohne Immersion) erzielt werden kann.

¹⁷Zi et al., PNAS 100, 12576 (2003).

¹⁸z.B. Hecht: „Optik“

Neben der prinzipbedingten Auflösungsbegrenzung führen natürlich auch Fehler des optischen Systems und Fehler in der Fokussierung zu ausgedehnten Bildpunkten und damit verringerter Auflösung.



(a) Hintergrund unscharf



(b) Vordergrund und Hintergrund leicht unscharf

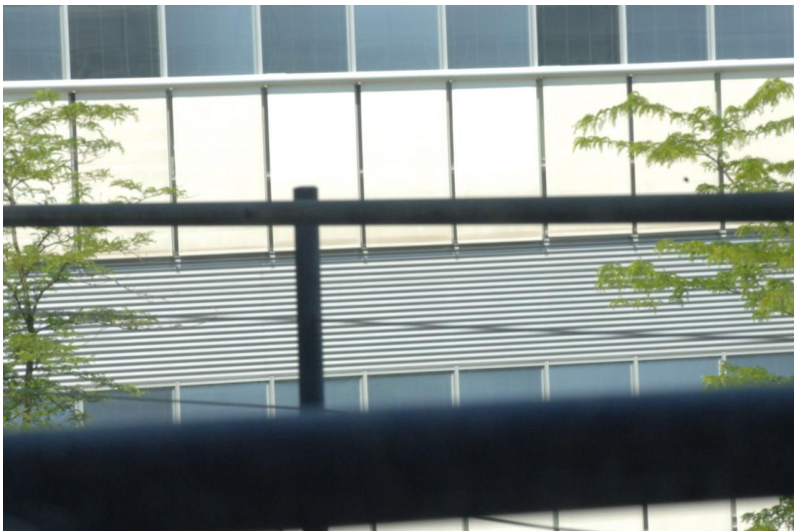
Abbildung 7.6.22: Treppenstufeneffekt bei der Abbildung von Einzelstrukturen vor einem periodischen Hintergrund. Die Unschärfe (begrenzte Auflösung) des Hintergrunds führt bei der Überlagerung mit der scharfen Vordergrundstruktur zu dem Effekt. Foto mit freundlicher Genehmigung von E. Garbusi.

Abb. 7.6.22 zeigt ein sehr häufig zu sehendes optisches Phänomen, das auf der begrenzten Auflösung beruht. Bei der Überlagerung von feinen regelmäßigen Strukturen und Einzelstrukturen sieht man oft einen sehr ausgeprägten Treppenstufeneffekt. Entscheidend ist dabei, dass die Strukturen in unterschiedlichen Tiefen liegen (Perspektiveneffekt) und damit teilweise unscharf abgebildet werden. Der Effekt ist – so man auf ihn achtet – in vielfältiger Weise in unserer Umwelt mit dem bloßen Auge beobachtbar.

Bei der Aufnahme mit einer Kamera kann man durch Wahl der Blende und damit der Tiefenschärfe den Effekt stark beeinflussen (Abb. 7.6.23, 7.6.24). Bei geschlossener Blende (große Blendenzahl) ergibt sich eine große Tiefenschärfe und die Jalousien im Hintergrund und das Kabel im Vordergrund werden gleichzeitig scharf abgebildet. Bei einer Verringerung der Tiefenschärfe ergibt sich aber z.B. eine scharfe Abbildung des Kabels und eine unscharfe Abbildung der Jalousie.



(a) hohe Tiefenschärfe durch geringe Blende: Der Effekt verschwindet.

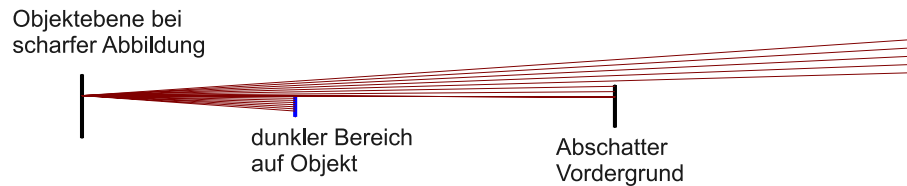


(b) geringe Tiefenschärfe: Nur der Vordergrund bleibt scharf.

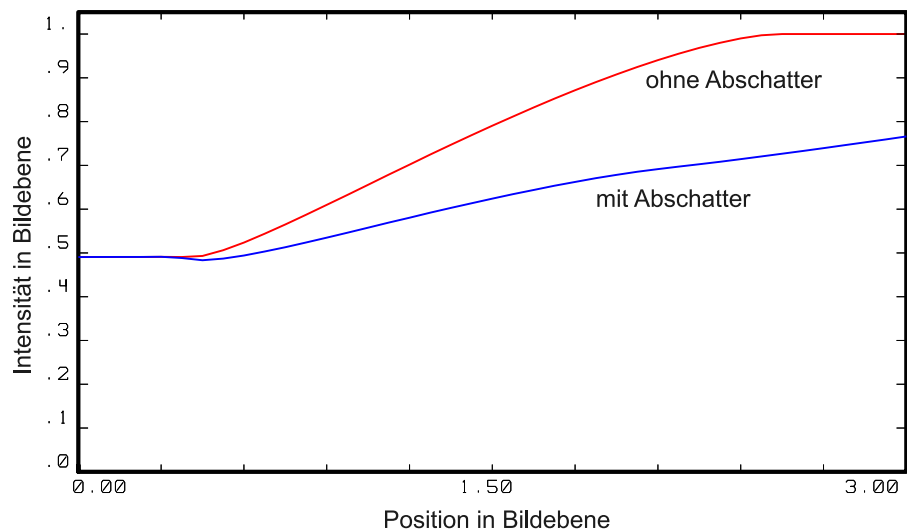
Abbildung 7.6.23: Variation des Effekts durch Änderung der Tiefenschärfe der Abbildung.

Zur Erklärung des Effekts betrachten wir die Überlagerung einer unscharf abgebildeten Hell–Dunkel–Hell Struktur mit einer einzelnen Dunkelstruktur (Abschatter), die näher beim Auge liegt (siehe Abb. 7.6.24). Je nach Position in der Bildebene (in Abb. 7.6.24 (a) ist nur ein Strahlenbündel für eine Position gezeigt) ergibt sich eine unterschiedliche Stärke der Abschattung.

Die Unschärfe der Abbildung führt dazu, dass bereits ohne den Abschatter kein optimaler Kontrast erzielt werden kann und daher für keinen Feldpunkt die Intensität Null wird (Abb. 7.6.24 (b), rote Kurve). Der zusätzliche Abschatter bewirkt, dass für außeraxiale Objektpunkte im eingezeichneten Fall die Intensität in der Bildebene abnimmt, d.h. zwischen den Hellbereichen des ersten Objekt und des Abschatters ergibt sich eine verringerte Helligkeit. Dies ist exakt das, was in Abb. 7.6.22 zu sehen ist und was zu dem Treppenstufeneffekt führt. Der Effekt ist im übrigen eng verwandt mit den Schattenüberlagerungen (Abschnitt 2.2).



(a) Strahlengang für einen Punkt in der Bildebene



(b) Intensität in der Bildebene mit und ohne Abschatter

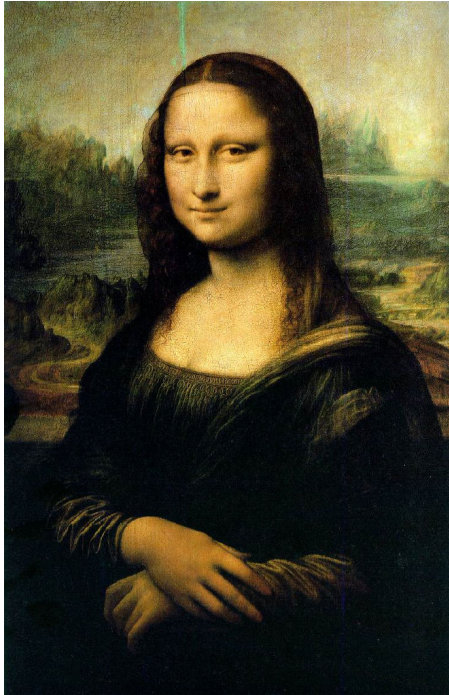
Abbildung 7.6.24: Zur Erklärung des Treppenstufeneffekts durch unscharfe Abbildung: Ein Bildpunkt im Auge (rechts, nicht dargestellt) empfängt das eingezeichnete Strahlenbündel. Ein Teil des Strahlenbündels fällt weg weil es dunklen Bereichen auf dem Objekt entspricht. Ein weiterer Teil fällt aber durch den zweiten Abschatter weg, so dass in diesem Fall die ankommende Intensität verringert wird.

Die begrenzte Auflösung optischer Abbildungen führt letztlich dazu, dass hohe Frequenzen eines Objekts, also feine Strukturen, aus großer Entfernung nicht mehr gesehen werden. Das menschliche Sehsystem ist dabei maximal sensitiv für Strukturen von ca. 5 Linienpaaren pro Grad des Seh winkels. Der Effekt zeigt sich – gewollt oder ungewollt – bei Bildern. Beispielsweise lächelt Leonardo da Vincis Mona Lisa, wenn man sie aus großer Entfernung betrachtet. Aus der Nähe verschwindet das Lächeln.

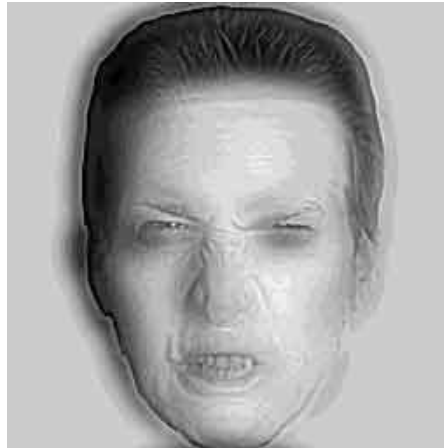
Durch die Kombination passender tief- und hochfrequenter Bilder lassen sich so erstaunliche Effekte erzielen, die neben dem rein didaktischen und unterhal-

Hohe Raumfrequenzen (also feine Strukturen) werden durch die Optik nur schlecht abgebildet. Die feinen Strukturen werden verschmiert.

tenden Nutzen (siehe Abb. 7.6.25) auch z.B. zum Verstecken von Information genutzt werden können¹⁹.



(a) Mona Lisa lächelt nur aus großer Entfernung



(b) Aus großer Entfernung wird aus dem ärgerlichen Mann eine neutrale Frau, Bild mit freundlicher Genehmigung von A. Oliva, <http://cvcl.mit.edu/hybridimage.htm>

Abbildung 7.6.25: Variation des Bildes mit der Entfernung des Beobachters. Betrachten Sie die Bilder aus unterschiedlicher Entfernung. Hochfrequente Details (feine Strukturen) fehlen bei der Betrachtung aus großer Entfernung.

Eine weitere Folge der begrenzten Auflösung ist die unterschiedlich wahrgenommene Breite von dünnen Strichen in Abhängigkeit von der Helligkeit. Dunkle Striche auf hellem Grund erscheinen bei der Betrachtung aus großer Entfernung schmaler als entsprechend helle Striche auf dunklem Untergrund. Die Unschärfe der Abbildung führt zu einem Helligkeitsverlauf, bei dem eben auch eine geringe Helligkeit noch als vergleichsweise hell wahrgenommen wird (vgl. Abschnitt 10.2). Als Folge hiervon kann Licht aus dem hellen Umgebungsbereich den schwarzen Strich verringern.

¹⁹A. Oliva, A. Torralba, P.G. Schyns, Hybrid Images. ACM Transactions on Graphics, ACM Siggraph, 25-3, 527-530 (2006).

7.7 Koronae, Glorien und Irisierung

Sobald dünne Wolken oder Nebel zwischen Sonne (oder Mond) und uns liegen, können wir mit etwas Glück eine sogenannte *Korona* um die Lichtquelle beobachten²⁰. Der Begriff *Korona* hat dabei nichts mit dem zu tun, was Sonnenphysiker darunter verstehen. In der atmosphärischen Optik sind damit farbige Ringe um die Lichtquelle gemeint. Da die Sonne so hell ist, lassen sich Koronae an ihr nur beobachten, wenn die Sonne deutlich (z.B. durch ein Hindernis oder durch Wolken) abgedunkelt ist und zusätzlich eine Sonnenbrille verwendet wird. Eine Beobachtung beim Mond ist daher wesentlich einfacher.²¹

Korona: farbige Ringmuster um Lichtquelle aufgrund der Beugung an kleinen Objekten (z.B. Wassertropfen)



Abbildung 7.7.26: *Korona um den Mond*, Foto: Tom Ruen, dieses Bild basiert auf dem Bild *Lunarcorona.jpg* aus der freien Enzyklopädie Wikipedia. Farbtafel: 12.0.39

Der Grund für die farbigen Ringe ist die Beugung des Lichts an den Wassertropfen (meist mit Durchmessern zwischen 10 und 20 μm), die zwischen der Lichtquelle und dem Beobachter liegen.²² Das Licht, das an einem Wassertropfen gebeugt wird, führt (s.u.) zu einem farbigen Ringsystem. Wenn nun alle Tropfen eine ähnliche Größe haben, dann haben die Ringmuster alle dieselbe Ausdehnung und überlagern sich daher konstruktiv (alle roten Ringe liegen aufeinander, alle blauen Ringe ebenso). Diese Überlagerung ist eine inkohärente Überlagerung, so dass sich die Intensitätsmuster der einzelnen Tropfen einfach additiv überlagern (näheres siehe Abschnitt 7.9).

Inkohärente Überlagerung der an verschiedenen Tropfen gebeugten Wellen

²⁰Man spricht auch von *Mondhof* oder *Kranz*.

²¹Wenn man nachts eine *Korona* um den Mond sieht, dann macht es auch Sinn, tagsüber nach einer *Korona* Ausschau zu halten.

²²Bei deutlich kleineren Durchmessern wird sehr wenig Licht (kleiner Durchmesser) auf einen großen Winkelbereich (wieder kleiner Durchmesser) gestreut und ist somit kaum wahrnehmbar. Bei sehr großen Durchmessern ist die Winkelaufspaltung zu gering.



Abbildung 7.7.27: Aureole/Glorie an den Nebeltropfen in einem Wald, Foto copyright T. Credner und S. Kohle, www.AlltheSky.de, <http://www.allthesky.com/copyright-d.html>. Farbtafel: 12.0.40

Um die Korona zu verstehen, müssen wir also zunächst die Beugung an einem einzelnen Tropfen betrachten. Das einfallende parallele Licht wird durch den Tropfen abgelenkt. Dies sieht man bereits im Strahlenmodell (Abb. 7.7.29). In Richtung des Beobachters kommt daher deutlich weniger Licht an. Der Tropfen wirkt effektiv wie eine inverse Blende bzw. eine Obstruktion. Es ist also die Beugung des Lichts an einer Obstruktion mit dem Durchmesser des Tropfens zu betrachten.

Man kann (mittels der Fouriertheorie recht einfach) zeigen, dass die Beugungsmuster einer Apertur gleich dem Beugungsmuster der inversen Apertur ist (*Babinet Prinzip*).

Tropfen wirkt wie inverse Blende

Babinet Prinzip: Beugungsmuster einer Blende entspricht (weitgehend) dem Beugungsmuster der inversen Blende

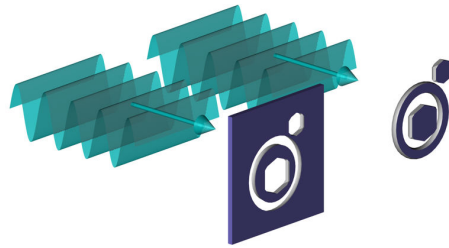
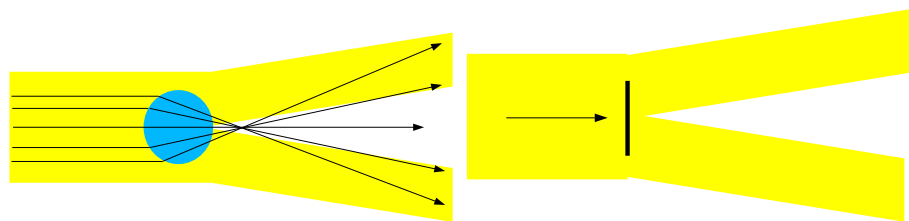


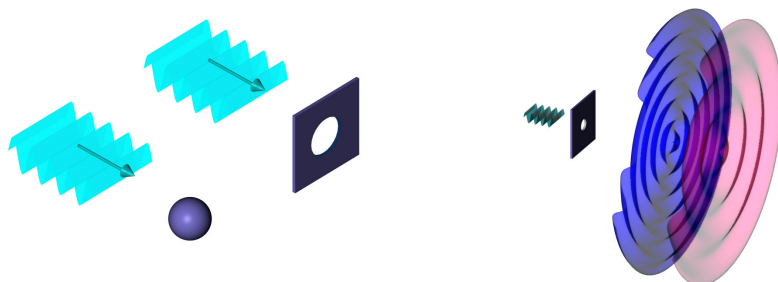
Abbildung 7.7.28: Babinet Prinzip: Die Beugung im Fernfeld (Fraunhofer Beugung) einer inversen Apertur ergibt (bis auf das Zentrum (0. Ordnung) und die Gesamthelligkeit) dasselbe Beugungsmuster wie für die Apertur.



(a) Die Lichtintensität auf der Achse wird durch die Brechung an der Kugel reduziert

(b) Idealisierung durch Kreisblende

Abbildung 7.7.29: Ablenkung von Licht durch einen Tropfen im Strahlenmodell



(a) Babinet Prinzip: Das Fernfeld entspricht dem einer Kreisblende

(b) Das Fernfeld einer inversen Kreisblende ergibt ein farbiges Ringmuster

Abbildung 7.7.30: Prinzip der Entstehung einer Korona Teil 1: Jeder Wassertropfen (Nebel) ergibt in großer Entfernung (Vorsicht: hier zur besseren Veranschaulichung im Nahfeld gezeichnet) ein farbiges Ringmuster (hier für Rot und Blau eingezeichnet). Das blaue Ringmuster ist dabei hochfrequenter als das rote.

Dies bedeutet aber, dass ein Wassertropfen mit z.B. $10\ \mu\text{m}$ Durchmesser zum selben Beugungsbild führt wie eine Ringblende (bzw. eindimensional ein Spalt) mit einem Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$. Das heißt wir erhalten ein Ringmuster, das mehr oder weniger der rotierten Spaltbeugungsfunktion entspricht²³ (s. Abschnitt 7.5).

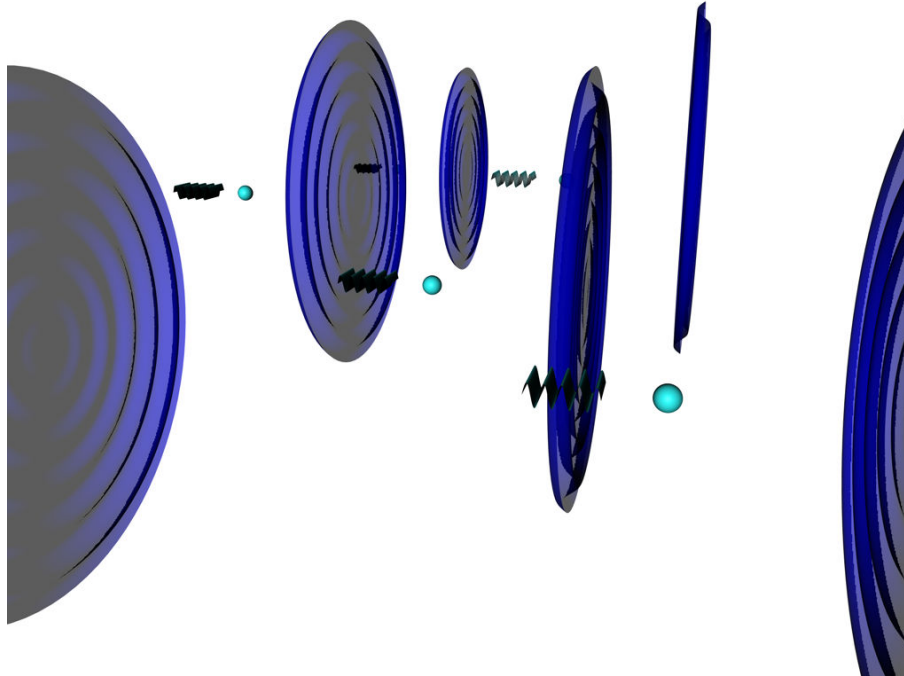
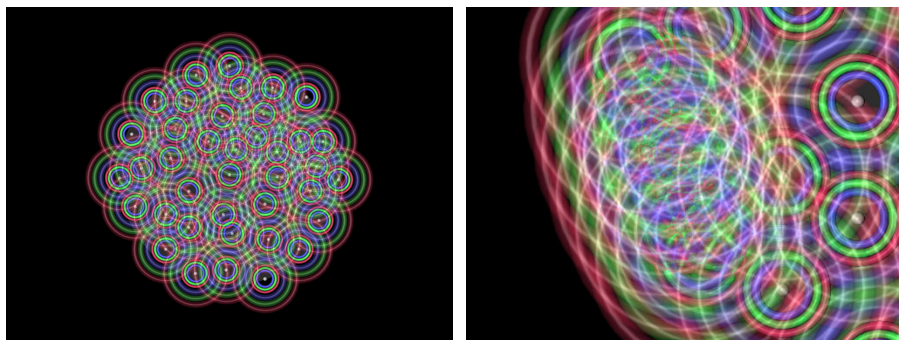


Abbildung 7.7.31: Prinzip der Entstehung einer Korona Teil 2: Alle Ringmuster der Wassertropfen (Nebel) überlagern sich inkohärent und ergeben dasselbe Ringmuster wie das eines Einzeltropfens (nur mit höherer Intensität).



(a) Gesamtansicht

(b) Detailansicht

Abbildung 7.7.32: Prinzip der Entstehung einer Korona Teil 3: Bei einer ausgedehnten Lichtquelle ergibt sich für jeden Punkt der Lichtquelle ein farbiges Ringmuster. Die Überlagerung der Ringmuster ergibt auf der Fläche der Lichtquelle „weiß“. Am Rand heben sich die Farben nicht komplett weg, so dass ein farbiges Ringmuster um die Lichtquelle beobachtbar ist (im Bild durch den roten Rand veranschaulicht).

²³Eine genaue Rechnung zeigt einen etwas komplexeren mathematischen Zusammenhang, das grundsätzliche Ringmuster bleibt aber sehr ähnlich und hat nur eine etwas andere Ausdehnung und Form.



Abbildung 7.7.33: Glorie. Das farbige Ringmuster ist um die Position des Fotografen im Flugzeug zentriert. Oft sind auch höhere Ringordnungen (schwächer) sichtbar. Farbtafel: 12.0.41

dünne Wolken führen am ehesten zu Koronae

Die Wolken müssen vergleichsweise dünn sein, um eine Korona zu generieren (entsprechendes gilt auch für irisierende Wolken, siehe unten). Sobald Vielfachstreuungen dominieren, ergibt sich eine komplette Mischung und damit ein Verschwinden der farbigen Ringstrukturen.

Pollenkorona

Die Korona kann auch an Eiskristallen oder Pollen (in Deutschland vor allem an Kieferpollen) auftreten. Die Pollen haben alle eine ähnliche Größe, so dass die Beugungen an den Pollen sich wieder konstruktiv überlagern. Dabei ist die fehlende Rotationssymmetrie der streuenden Objekte kein Problem, da die vielen Objekte in zufälliger Orientierung in der Atmosphäre vorliegen. Daher ist die beobachtete Korona nach wie vor ein rotationssymmetrisches Ringsystem.

Viel einfacher können Sie eine Korona sehen, wenn Sie bei Dunkelheit in eine starke Lichtquelle (z.B. entgegenkommendes Auto) schauen. Die Beugung tritt in diesem Fall an kleinen Unregelmäßigkeiten²⁴ ihrer Hornhaut auf (*Ciliare Korona*).

Glorie: Korona aufgrund von rückgestreutem Licht

Ebenfalls beobachtbar ist eine Art Korona an Wassertropfen in *Reflexion*. In diesem Fall wird die Korona als *Glorie* bezeichnet. Grundlage ist der starke Rückstreuanteil bei der Streuung an kleinen Partikeln (Wassertropfen). Vergleichsweise viel Licht läuft also in dieselbe Richtung, aus der die Beleuchtung erfolgt, zurück. Die effektive abstrahlende Fläche ist dabei natürlich wieder (in erster Näherung) gleich der Tropfengröße, so dass auch in diesem Fall dasselbe (bzw. ein ähnliches) Beugungsmuster entsteht.²⁵ Wieder gilt, dass sich die Beugungsmuster der verschiedenen Tropfen überlagern und dass daher dann eine konstruktive Überlagerung (alle roten Ringe liegen übereinander) auftritt, wenn die Tropfen alle eine ähnliche Größe aufweisen. Zur Berech-

²⁴Computer Graphics 29, S. 325 (1995)

²⁵Im Detail ist die Streuung in diesem Fall recht komplex (s. Vollmer, „Lichtspiele in der Luft“, Elsevier 2005, für Details). Eine quantitative Beschreibung ist mittels der Mie Streutheorie möglich.

nung des Farbeindrucks beim menschlichen Beobachter muss wie bei allen Farbphänomenen auch die spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Zapfen des menschlichen Sehsystems und die spektrale Abstrahlcharakteristik der Quellen berücksichtigt werden.

Die Glorie wird am besten vom Flugzeug aus beobachtet und zeigt sich in Richtung des eigenen Schattens (weil sie ja in derselben Richtung liegt wie die Einstrahlung der Lichtquelle, siehe Abb. 7.7.34). D.h., die farbigen Ringe bei einer Glorie sind um den eigenen Schatten zentriert. Damit kann man aus der Betrachtung der Glorie ermitteln, wo man im Flugzeug sitzt (Abb. 7.7.33). Die Glorie kann auch beim Brockengespinst auftreten (vgl. Abschnitt 2.7.23).

Position der Glorie gibt die Position des Beobachters an

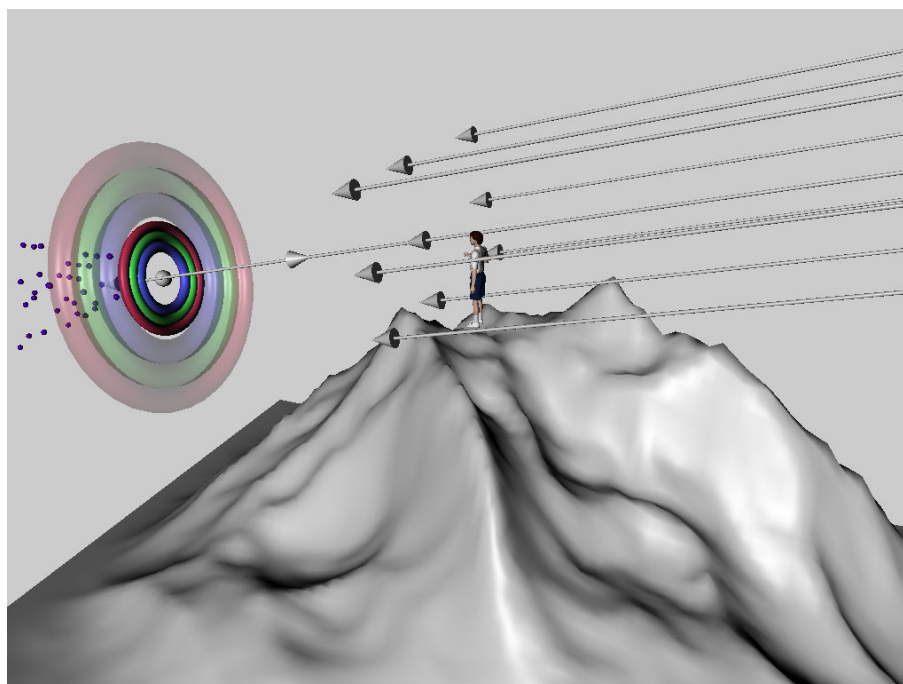


Abbildung 7.7.34: Entstehung der Glorie

Irisierende Wolken sind farbige Wolkensegmente. Die Farbe kommt wieder durch die Beugung an Wassertropfen oder Eiskristallen zustande.²⁶ Es handelt sich somit um kurze Koronasegmente. Die Ringstruktur ist aber nicht sichtbar, da nur ein Teil des Ringbereichs mit passenden Wassertropfen/Eiskristallen bedeckt ist, zum anderen variiert unter Umständen die Größe der Streuer, so dass komplexere Farbmuster entstehen (siehe Abb. 7.7.35).

Irisierende Wolken: kurze Koronasegmente

Im Gegensatz zur gewöhnlichen Korona sind für die starke Winkelablenkung sehr kleine Tropfendurchmesser mit einer breiten Größenverteilung notwendig. Genau diese breite Größenverteilung bei geringer mittlerer Größe ist an Wolkenrändern (starkes Wachstum oder starke Verdunstung) gegeben. Außerdem ist an Wolkenrändern die Wolke dünn, so dass die Vielfachstreuung kein Problem darstellt. Bei sehr kleinen (einige μm) Partikeln mit derselben Größe kann sich ein besonders eindrucksvoller großer Koronaring, der sogenannte *Bishopsche Ring* ausbilden. Besonders häufig wird das Phänomen nach *Vulkanausbrüchen* oder *Waldbränden* beobachtet.

Bishopscher Ring nach Vulkanausbrüchen oder Waldbränden

²⁶Der Name Irisierung geht auf die griechische Göttin des Regenbogens, Iris, zurück. Der Begriff „Irisierung“ im weiteren Sinn beschreibt alle Arten von winkelanhängiger Farbe. Ein Ölfilm mit den sich ergebenden Interferenzfarben „irisiert“ damit ebenfalls.



Abbildung 7.7.35: Irisierende Wolke: Die Farben entstehen durch Beugung an den Wassertropfen bzw. Eiskristallen in den Wolken. Es handelt sich letztlich um Koronasegmente. Foto mit freundlicher Genehmigung von L. Seifert. Farbtafel: 12.0.42

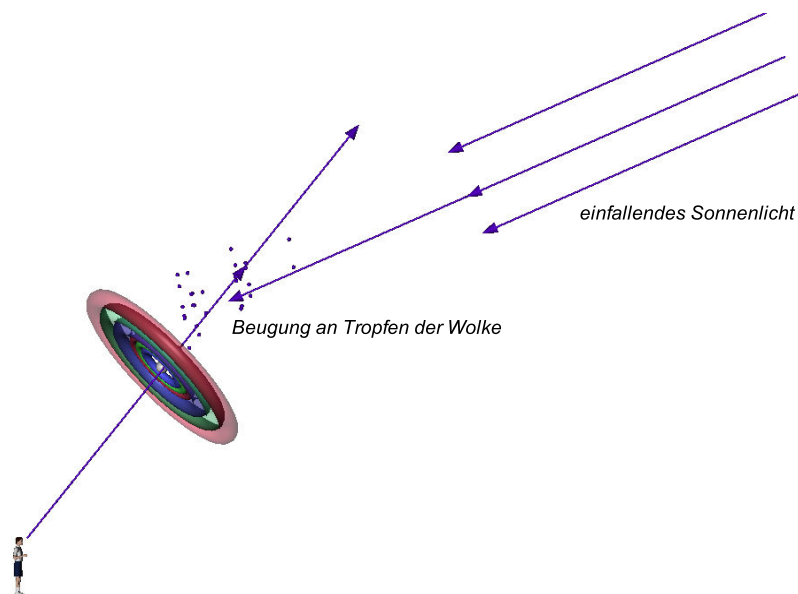


Abbildung 7.7.36: Prinzip der Entstehung einer irisierenden Wolke

Wenn der Abstand der irisierenden Wolke von der Sonne vergleichsweise groß (z.B. mehrere 10 Grad) ist, dann sind in der Regel Eiskristalle für die Farbeffekte verantwortlich. Bei Wassertropfen ergibt sich nur in Vorwärtsrichtung und in der entgegengesetzten Richtung eine starke Lichtintensität. Bei der Reflexion an Eiskristallen (siehe Abschnitt 6.6) kann dagegen auch unter ganz anderen Winkeln im Sinne einer Reflexion eine starke Beugung beobachtbar sein. Genau wie bei der Corona muss man in der Regel eine Sonnenbrille in Kombination mit der Abschattung der Sonne verwenden, um irisierende Wolken beobachten zu können.

7.8 Beugung und Regenbogen

Zu Interferenzeffekten beim Regenbogen kommt es, weil an unterschiedlichen Positionen einfallende Strahlen unter demselben Winkel aus dem Tropfen austreten und daher im Auge des Beobachters interferieren können (die Strahlen werden auf dieselbe Sehzelle fokussiert), siehe Abb. 7.8.37 und 7.8.39. Solange der Wegunterschied zwischen den Strahlen kleiner als die Kohärenzlänge ist, ergeben sich sichtbare Interferenzen.

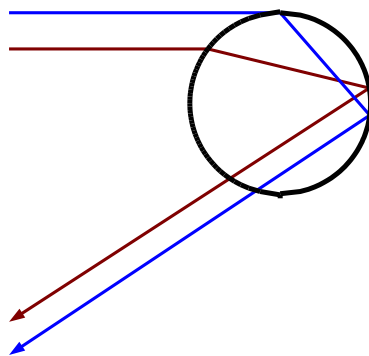


Abbildung 7.8.37: Jeweils zwei verschiedene Einfallsorte auf dem Regentropfen führen zur exakt selben Winkelablenkung, so dass die beiden austretenden Wellen (bzw. Strahlen) im Auge des Beobachters interferieren.

Eine genaue Analyse zeigt, dass die Beugungsmaxima in der Nähe der Winkelablenkung für den Haupt- und den Sekundärbogen auftreten. Man spricht von sogenannten *überzähligen Bögen* bzw. *supernumeraries*.²⁷ Die genaue Position ist dabei abhängig von der Größe der Regentropfen. Bei stark unterschiedlich großen Tropfen ergibt sich dementsprechend eine Verschmierung der Maxima. Die überzähligen Bögen sind daher dann nicht beobachtbar. Beobachtbar sind sie also nur, wenn die Tropfengröße vergleichsweise konstant ist (was eher selten der Fall ist).

Die Position der Maxima sind natürlich auch von der Wellenlänge des Lichts abhängig. Es ergibt sich eine Überlagerung verschiedener Beugungsfiguren unterschiedlicher Farbe, die dann oft zu rosa und violetten Streifen führt. Aufgrund der begrenzten Kohärenzlänge des Sonnenlichts sind nicht mehr als zwei oder drei überzählige Bögen beobachtbar.

Überzählige Bögen beim Regenbogen treten auf, wenn alle Regentropfen näherungsweise dieselbe Größe haben

²⁷Umgekehrt lässt sich aus der Vermessung der überzähligen Bögen in der Technik auf die streuenden Teilchen und ihre Brechzahl rückschließen. Dieses Verfahren wird Rainbow Thermometry genannt, siehe z.B. Vetrano et al., Applied Optics 44, S. 7275, 2005.



Abbildung 7.8.38: Überzählige Bögen kommen durch Beugung an Regentropfen beim Regenbogen zustande. Dabei müssen aber die Regentropfen eine sehr homogene Größenverteilung aufweisen. Farbtafel: 12.0.43



Abbildung 7.8.39: Detailaufnahme Überzähliger Bögen. Meist dominieren Violett und Grüntöne.

Für sehr kleine Tropfen, wie sie im Nebel vorkommen, sind die Beugungsbögen für jede Wellenlänge stark verbreitert und die Position der Bögen variiert – im Vergleich zu dieser Verbreiterung – nur vergleichsweise gering. Man spricht von *Nebelbögen*. Daher ergibt sich eine Überlagerung aller Farben und damit werden die Nebenbögen der Nebelbögen weiß.

Nebelbogen: Beugungseffekte an den sehr kleinen Tropfen im Nebel

7.9 Kohärenz und Speckles

Bisher sind wir davon ausgegangen, dass die elektrischen Felder von Lichtwellen einfach addiert werden können und dass der Beobachter dann das Quadrat der Summe dieser Felder – eben die Intensität – sieht. Diese Art der Überlagerung ist physikalisch zunächst sehr einleuchtend und wird *kohärente Überlagerung* genannt. Sie ist die Grundlage der bisher besprochenen Beugungsphänomene, aber auch aller Arten von Interferometrie. Gleichzeitig sind wir aus unserem Alltagsleben jedoch das inkohärente Verhalten von Licht gewohnt.

Ein Verständnis der Kohärenz kann am besten über den Umweg der Interferometrie gewonnen werden. In Abb. 7.9.40 ist ein einfaches Interferometer dargestellt. Das einfallende Licht wird am Strahlteiler in zwei Wellen geteilt. Welle 1 läuft den Weg 1 (rot), Welle 2 läuft den Weg 2 (violett). Beide Wellen werden nach der Reflexion an dem jeweiligen Endspiegel wieder am Strahlteiler vereint. Die Hälfte des Lichts wandert in Richtung des Detektors D.

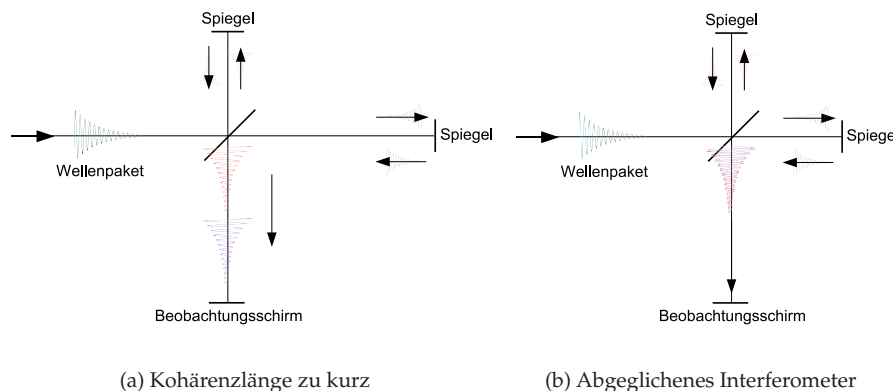


Abbildung 7.9.40: Michelson Interferometer und zeitliche Kohärenz: Ein deutlicher Wegunterschied (größer als die Kohärenzlänge) der beiden Pfade führt zu einem Verschwinden der Interferenz.

Nehmen wir zunächst an, dass die Wege 1 und 2 exakt gleich lang sind. In diesem Fall ergibt die Überlagerung der Wellen 1 und 2 am Detektor eine konstruktive Interferenz, d.h. eine hohe Intensität wird dort detektiert.²⁸ Verschieben wir hingegen Spiegel 2 um eine viertel Wellenlänge ($\lambda/4$), so durchläuft die Welle 2 einen um eine halbe Wellenlänge längeren Weg. Am Detektor wird daher eine destruktive Interferenz erwartet, die Intensität wird Null. Dies ist im übrigen die Grundlage, um interferometrisch hochgenau Längen zu messen.

Zeitliche Kohärenz = Kohärenzlänge: Endliche Wellenpaketlänge der Lichtemission begrenzt die Möglichkeit der kohärenten Überlagerung

²⁸Es ergibt sich eigentlich noch jeweils ein Phasensprung von π am Strahlteiler.

Was passiert nun aber, wenn wir den Spiegel 2 nicht um ein Viertel der Wellenlänge, sondern z.B. um 1 mm verschieben? Ergibt sich eine konstruktive oder eine destruktive Interferenz? Wenn die Lichtquelle nicht (in ausreichendem Maße) kohärent ist, ergibt sich weder das eine noch das andere. Die Interferenz bleibt aus.

Um dies zu verstehen müssen Sie die Wellen, die die Lichtquelle in das Interferometer einspeist, betrachten. Für inkohärente Lichtquellen sind das keine unendlich ausgedehnten Kosinusschwingungen, sondern relativ kurze Wellenpakete (mit einer Länge von z.B. $5 \mu\text{m}$ (bzw. einer Dauer von $1,7 \cdot 10^{-14} \text{ s}$)). Die Lichtquelle sendet pro Sekunde astronomisch viele solcher Wellenpakete aus. Entscheidend ist dabei aber, dass die Wellenpakete untereinander keinerlei konstante Beziehung haben. Sie werden praktisch unabhängig voneinander ausgesendet.²⁹ Insbesondere tritt eine zufällige Phasenbeziehung zwischen verschiedenen Wellenpaketen auf. Damit wird dann der Interferenzterm in Gleichung 7.8 **im zeitlichen Mittel Null**.

Da die Wellenpaketdauer so kurz ist und daher sehr viele Wellenpakete während eines Detektionsintervalls eines realen Detektors am Detektor ankommen, werden viele Wellenpaketüberlagerungen stattfinden. Einige dieser Überlagerungen sind konstruktiv, andere sind destruktiv, in Summe ergibt sich für die Interferenzen Null.

Diese Argumentation bricht dann zusammen, wenn die Wegdifferenz kleiner als die Wellenpaketlänge ist (kohärenter Fall). In diesem Fall ergeben sich nämlich lauter Überlagerungen von Wellen mit derselben Phasendifferenz. Die Interferenzterme sind also gleich und addieren sich damit zu einer (in der Regel) von Null verschiedenem Gesamtinterferenz.

Zusammenfassend: Der Interferenzterm wird also in jedem Fall dann Null, wenn die Wegdifferenz zwischen den beiden Interferometerarmen größer der Wellenpaketlänge ist. Die räumliche bzw. zeitliche Wellenpaketlänge wird *Kohärenzlänge* bzw. *Kohärenzzeit* genannt. Der Vorgang selbst wird als *zeitliche Kohärenz* bezeichnet.

Man kann sich nun noch fragen, bei welcher Art von Lichtquelle die Wellenpakete lang sind und daher eine große zeitliche Kohärenz vorhanden ist. Da zwischen dem zeitlichen Verlauf einer Schwingung und der spektralen Darstellung der Schwingung eine Fouriertransformationsbeziehung besteht, kann allgemein gesagt werden, dass spektral schmalbandige Lichtquellen eine hohe *Kohärenzlänge* aufweisen (auf eine nähere Begründung soll hier nicht eingegangen werden³⁰). Ein extremes Beispiel ist der Laser. Hier erfolgt eine nahezu monochromatische Lichtaussendung. Entsprechend ergibt sich eine hohe zeitliche Kohärenz. Sonnenlicht auf der anderen Seite ist breitbandig, d.h. es enthält Wellenlängen in einem breiten Spektralbereich. Die Kohärenzlänge ist daher sehr gering (wenige μm).

Bei der bisherigen Betrachtung wurde von einer punktförmigen Beleuchtung ausgegangen.³¹ Reale Lichtquellen haben aber eine endliche, räumliche Ausdehnung, die die Betrachtung etwas komplexer macht.

Hierzu betrachten wir die berühmte *Doppelspaltanordnung*, die auf Thomas

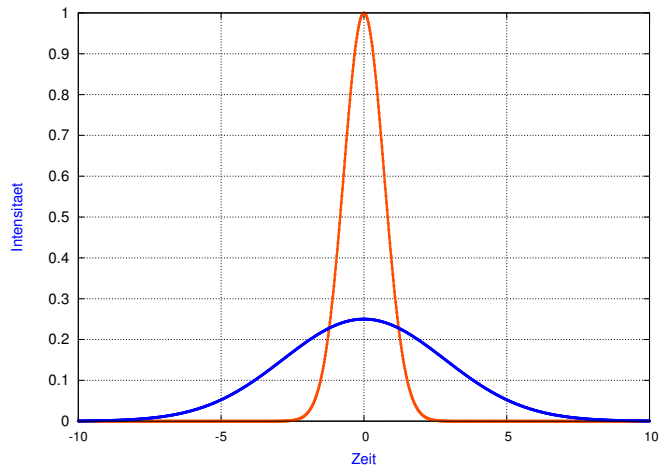
²⁹In Wirklichkeit ist diese Aussendestatistik nicht ganz so simpel, sondern es ergibt sich bei thermischen Quellen eine leichte Neigung zum Aussenden von Gruppen.

³⁰z.B. Saleh, Teich: „Fundamentals of Photonics“

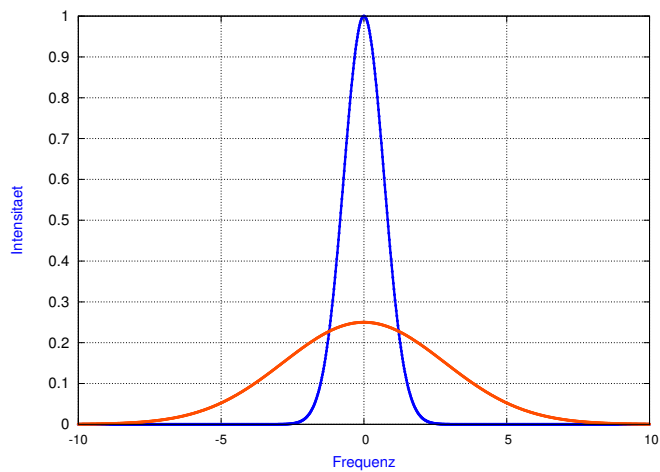
³¹Der Punkt lag dabei im Unendlichen, was zu kollimierten, also parallelem Licht führt. Die Lage des Punkts ist aber ohne Belang.

Interferenzterm verschwindet bei zu großer Wegdifferenz

Kohärenzlänge von Sonnenlicht: wenige μm



(a) Ortsraum



(b) Frequenzraum

Abbildung 7.9.41: Zusammenhang zwischen spektraler Breite und Wellenpaketlänge. Eine kurze Wellenpaketlänge (orange) ergibt ein breites Spektrum, eine breite Wellenpaketlänge (blau) resultiert entsprechend in einem schmalen Spektrum.

Young zurückgeht (Abb. 7.9.42): Zwei Spalte werden durch eine Lichtquelle beleuchtet. Zunächst denken wir uns die Lichtquelle punktförmig. Es ergibt sich ein Interferenzmuster auf dem Schirm, das dadurch zustande kommt, dass zwei Kugelwellen, ausgehend von den beiden Spalten, überlagert werden.

Nun denken wir uns eine zweite Punktquelle, die seitlich gegenüber der ersten Punktquelle versetzt ist. Auch für diese ergibt sich ein Interferenzmuster. Dieses ist aber gegenüber dem Muster der ersten Quelle seitlich verschoben weil die beiden Spalte durch die Quelle mit unterschiedlicher Phase beleuchtet werden. Dieser Phasenversatz kommt dadurch zustande, dass der Weg von der Quelle zu den beiden Spalten unterschiedlich lang ist.

Die beiden Interferenzmuster werden inkohärent überlagert, denn die beiden Lichtquellen sind zueinander inkohärent, weil die an den entsprechenden Stellen sitzenden lichtsussendenden Atome unabhängig voneinander abstrahlen. Eine ausgedehnte Lichtquelle können wir uns ganz entsprechend als

*Ausgedehnte Lichtquelle:
Einzelpunkte der Quelle interferieren nicht untereinander*

die Überlagerung vieler Einzellichtquellen denken. In der Schirmebene ergibt sich dann die (inkohärente) Überlagerung von zueinander verschobenen Interferenzmustern.

Diese Überlagerung ergibt dann und nur dann wieder ein (deutliches) Streifenmuster, wenn die Verschiebung der Einzelmuster (deutlich) geringer als eine halbe Streifenperiode ist (Abb. 7.9.42). Wenn dies der Fall ist, spricht man von einer räumlich kohärenten Quelle. Dies zeigt aber, dass die Entscheidung, ob eine Quelle räumlich kohärent oder inkohärent ist, nicht nur von der Ausdehnung, sondern auch von der Anwendung der Quelle abhängt.

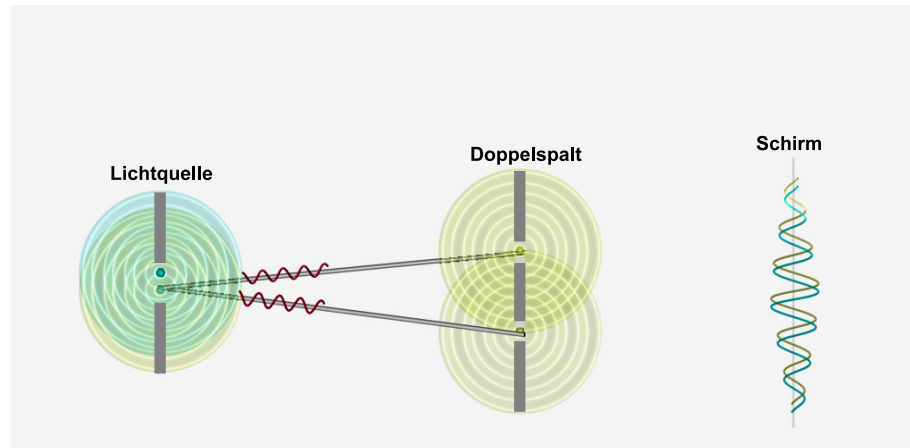


Abbildung 7.9.42: Doppelspaltversuch nach T. Young zur Erklärung der räumlichen Kohärenz. Die emittierenden Atome einer ausgedehnten Quelle strahlen inkohärent, also unabhängig voneinander. Jede von einem Atom ausgesendete Welle hat eine unterschiedliche Phasendifferenz an den beiden Spaltöffnungen, so dass sich für jedes Atom ein unterschiedlich verschobenes Interferenzmuster am Schirm ergibt.

Es soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Lichtwellen (bzw. die Photonen), die von unterschiedlichen Punkten der Quelle ausgehen, *nicht* miteinander interferieren. Diese Punkte strahlen unabhängig voneinander ab und sind daher inkohärent zueinander.

Wenn eine raue Oberfläche mit kohärentem Licht beleuchtet wird, dann gehen von dieser Oberfläche viele Kugelwellen aus, die eine zufällige Phase zueinander aufweisen. In einer Bildebene (z.B. auf der Netzhaut unserer Augen) ergibt sich daher die Interferenz von vielen Wellen mit zufälliger Phasenbeziehung. Dies resultiert in einer mehr oder weniger zufälligen Intensitätsverteilung, die *Granulation* oder *Speckle* genannt wird.

Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Überlagerung kohärent erfolgt. Es ist daher zu fordern, dass die Wegunterschiede von den eng benachbarten Oberflächenpunkten mit zufälliger Phase bis zum Bildpunkt so gering sind, dass sie innerhalb der Kohärenzlänge liegen. Wenn die Speckles unter Sonnenlicht beobachtet werden sollen bedeutet das, dass die Rauigkeit in jedem Fall geringer als die halbe Kohärenzlänge, also einige Mikrometer, ist (Abb. 7.9.43). Eine zu geringe Rauigkeit andererseits wäre natürlich ebenfalls nicht günstig, denn dann würde die zufällige Phasenbeziehung zwischen den Einzelwellen nicht mehr bestehen. Typische *Daumennägel* haben eine sinnvolle Rauigkeit, so dass ein Specklemuster in Sonnenlicht beobachtbar ist. Aber auch raue Metalloberflächen mit geringer Rauigkeit (z.B. Münzen) oder Papier und Kunststoffoberflächen zeigen teilweise das Phänomen.

Speckles (= Granulation): raue Oberfläche führt zu zufälligen Phasen der zu überlagernden Wellen

Speckles auf dem Daumennagel

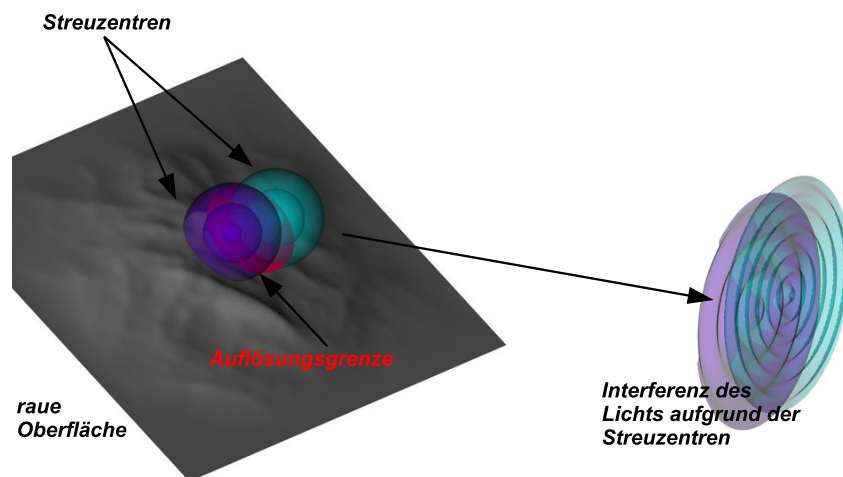


Abbildung 7.9.43: Prinzip der Speckleentstehung: Die von eng benachbarten Punkte auf der rauhen Oberfläche ausgehenden Wellen überlagern sich in der Bildebene aufgrund der begrenzten Auflösung (Aberrationen und Beugungsbegrenzung). Die zufälligen Phasen dieser Wellen (raue Oberfläche) führen bei der Interferenz zu zufälligen Helligkeitsmustern. Voraussetzung ist allerdings ausreichende zeitliche und räumliche Kohärenz.

Neben der zeitlichen Kohärenz muss auch wieder die räumliche Kohärenz gegeben sein. Daher kann man die Granulation im direkten Sonnenschein, nicht aber bei diffuser Beleuchtung (Bewölkung) beobachten. Wenn die Abbildung perfekt punktwise (ohne Beugungsbegrenzung und Aberration) wäre, würden wir keine Speckles beobachten. In diesem Fall würde jede Sehzelle nur von *einem* Oberflächenpunkt bestrahlt werden. Der Grund für die Speckles ist aber gerade, dass das Licht benachbarter Objektpunkte interferiert. Die in jedem Fall nicht-punktförmige Abbildung sorgt dafür, dass die Speckles überhaupt erst möglich werden. Aus diesem Grund nimmt auch die Specklegröße mit dem Blendendurchmesser (und damit der beugungsbedingten Schärfe) ab.

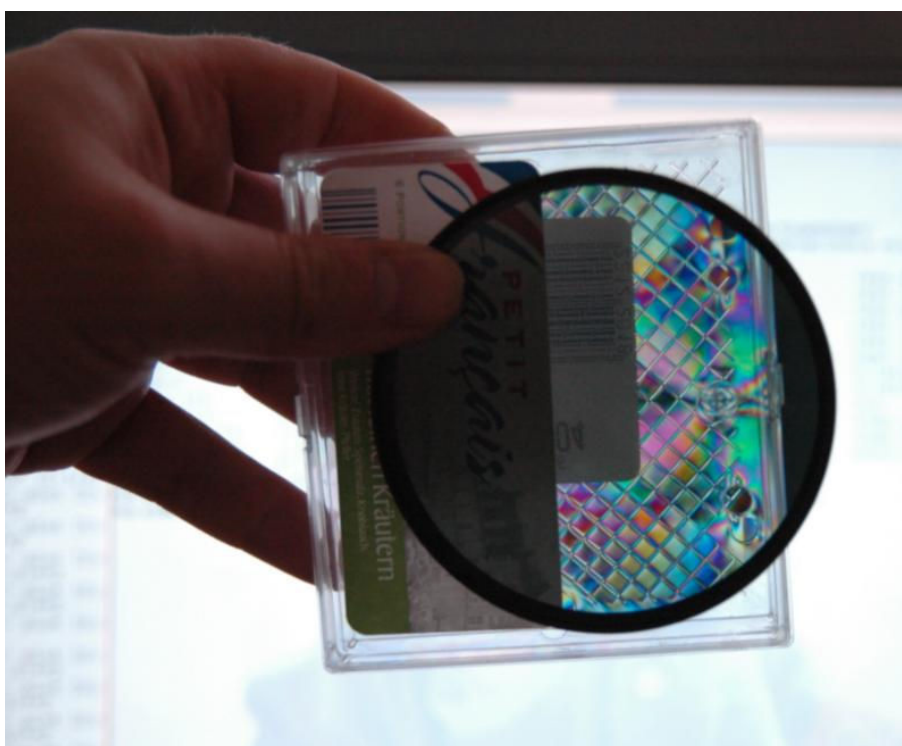
Entscheidend ist aber zusätzlich, dass das unscharf abgebildete Gebiet räumlich kohärent ausgeleuchtet ist. Oder mit anderen Worten: Der Bereich auf dem Objekt, der – aufgrund der unscharfen Abbildung – einem Punkt auf der Netzhaut entspricht, sollte eine geringere Ausdehnung als die Kohärenzbreite der Beleuchtung haben.

Bei der Beleuchtung durch die (direkte) Sonne ergibt sich eine räumliche Kohärenzbreite von ca. $150 \mu\text{m}$. Dies bedeutet, dass Licht, ausgehend von der rauhen Oberfläche in einem Bereich von dieser Kohärenzbreite, interferiert. Um dies mit dem bloßen Auge sehen zu können, sollte man also den Daumen schon relativ nah an das Auge halten oder die Lichtquelle (Sonne) durch Teilabschattung künstlich verkleinern.

Auf rauhen Oberflächen, die (aufgrund der großen Rauheit) bei Sonnenlicht keine Speckles zeigen, können starke Speckles sichtbar werden, wenn die Oberfläche durch spektral aufgespaltenes Licht (z.B. Prisma) beleuchtet wird.

Kapitel 8

Polarisation



„Den Rest meines Lebens werde ich darüber nachsinnen,
was Licht ist.“
(A. Einstein, 1912)

Bereits im vorangegangenen Kapitel wurde der vektorielle Charakter des Lichts verdeutlicht. Eine elektromagnetische Welle – und damit auch Licht – ist eine *transversale Welle*. Die Schwingungsebene, in der das elektrische Feld schwingt, liegt in jedem Fall senkrecht zur Schwingungsebene des magnetischen Felds¹ und sowohl der Vektor des elektrischen Feldes als auch der des magnetischen Feldes stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichts. Daher genügt es, lediglich die Schwingungsebene des elektrischen Feldes anzugeben.

Schwingungsebene des elektrischen Feldes = Polarisation

¹Zumindest gilt dies in homogenen Medien bzw. schwach inhomogenen Medien, siehe z.B. M. Wagner: Elemente der theoretischen Physik 2, Vieweg.

Das magnetische Feld kann daraus dann direkt abgeleitet werden.

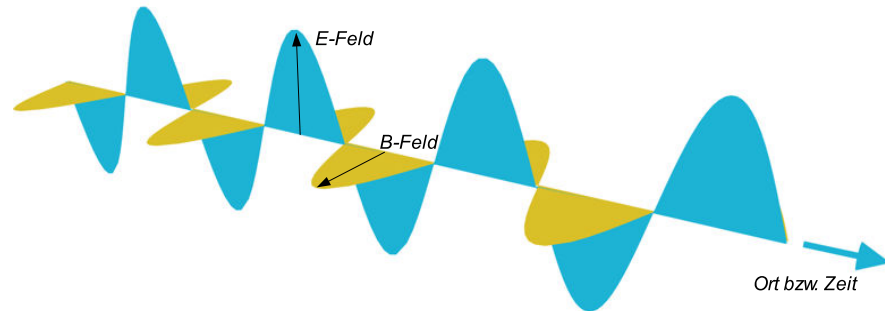


Abbildung 8.0.1: Licht als elektromagnetische Welle. Der Vektor des elektrischen Felds steht senkrecht auf dem Vektor des magnetischen Felds. Beide stehen senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung. Das Diagramm kann sowohl als eine Momentaufnahme (Zeit t =konstant) als auch eine Aufnahme des zeitlichen Verlaufs (Ort x =konstant) betrachtet werden. Die horizontal verlaufende Achse ist dann jeweils die Ortsachse (x) oder die Zeitachse (t).

Die Schwingungsebene des elektrischen Felds kann zunächst beliebig, aber unter Einhaltung der Forderung der Orthogonalität von Ausbreitungsrichtung und E-Feld Vektor liegen. Die Richtung des elektrischen Felds wird als *Polarisation* bezeichnet.

Polarisation bezeichnet die Schwingungsebene des elektrischen Felds

Lineare Polarisation: Schwingung in einer konstanten Ebene

Solange das elektrische Feld immer in derselben Richtung schwingt, spricht man von *linearer Polarisation*. Eine andere Lösung der Maxwell-Gleichungen und damit eine weitere mögliche Form von Licht ist das *zirkular polarisierte* Licht. In diesem Fall rotiert die momentane Schwingungsebene des elektrischen Felds mit hoher Geschwindigkeit – eben der Lichtfrequenz, also ca. $5 \cdot 10^{14}$ Hz – um die Ausbreitungsrichtung.

Polarisationen lassen sich zerlegen

Eine angenehme Eigenschaft elektromagnetischer Wellen ist ihre sogenannte Linearität². Vereinfacht ausgedrückt bedeutet diese Linearität, dass die Summe zweier elektromagnetischer Wellen wieder eine (erlaubte) elektromagnetische Welle ist. Wir können also z.B. zwei zueinander senkrechte lineare Polarisationen beliebig gewichtet addieren und bekommen so eine neue Polarisationsrichtung. Oder anders formuliert: Jede Polarisation lässt sich als gewichtete Summe aus zwei zueinander orthogonalen Polarisationen darstellen.

8.1 Polarisatoren und Helligkeitsänderungen

Die meisten natürlichen und künstlichen Lichtquellen (z.B. Sonne, Glühlampe) senden *unpolarisiertes Licht* aus.³ Von unpolarisiertem Licht spricht man, wenn die Photonen des Lichtfelds eine „zufällige“ Polarisation aufweisen.

Natürliche Lichtquellen sind in der Regel unpolarisiert

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, aus unpolarisiertem Licht teilweise oder komplett polarisiertes Licht herzustellen. Bei jeder Reflexion an einer dielek-

²die im übrigen direkt aus der Linearität der Maxwell-Gleichungen folgt

³Laser als bedeutende technische Lichtquellen liefern je nach Bauart polarisiertes oder unpolarisiertes Licht.

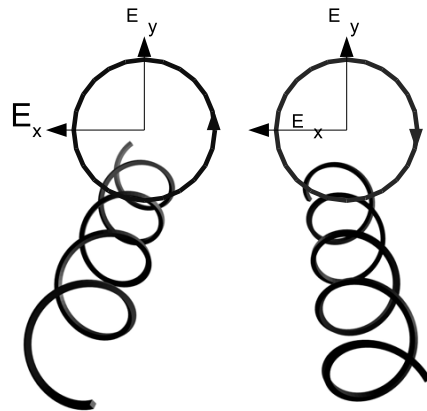
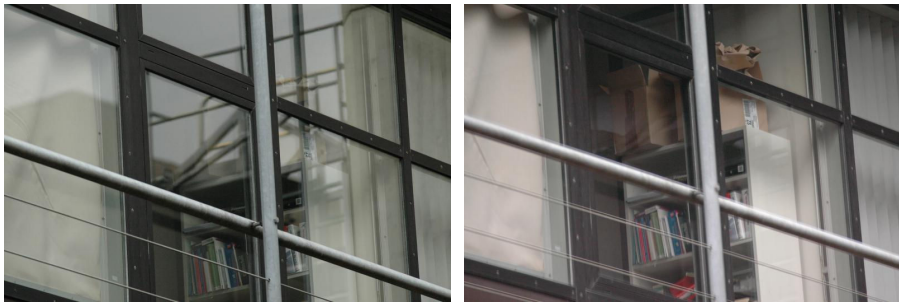


Abbildung 8.0.2: zirkular polarisiertes Licht

trischen Grenzschicht (also z.B. an einer Glasscheibe) ergibt sich eine teilweise Polarisierung. Der Grund hierfür liegt in den Fresnelgleichungen (siehe Abschnitt 6.3). Der Reflexionsfaktor hängt stark vom Einfallswinkel, den Brechzahlen der Medien und eben der Polarisierung ab, so dass im reflektierten Licht in der Tat eine der beiden Polarisationsrichtungen stärker vertreten ist.

Polarisation durch Reflexion



(a) ohne Polarisator

(b) mit Polarisator

Abbildung 8.1.3: Reduzierung von störenden Reflexionen durch Polarisationsfilter. Bei geeigneter Drehung eines Polarisationsfilters vor der Kamera können störende Reflexe vermindert werden weil das reflektierte Licht teilpolarisiert ist (Fresnelgleichungen).

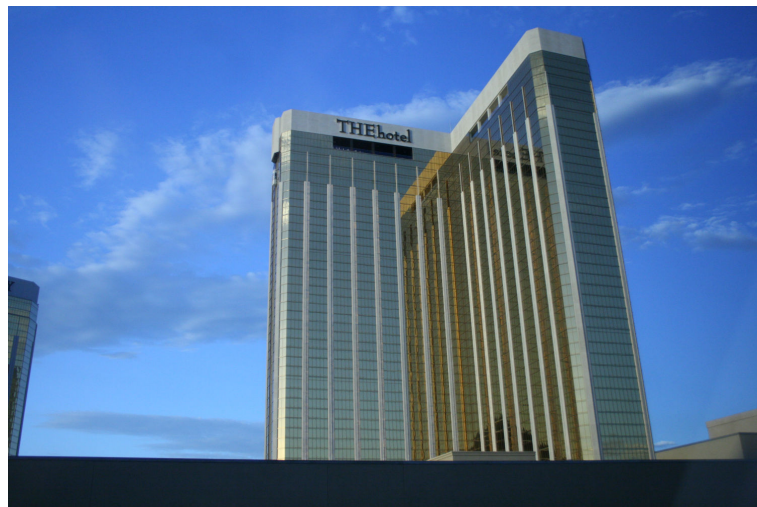
Abb. 8.1.4 zeigt, wie man beim Fotografieren auf diese Weise ungewollte Reflexionen vermindern kann. Das reflektierte Licht ist aufgrund der Fresnelgleichungen teilpolarisiert und lässt sich daher – durch geeignete Wahl eines Polarisators – stärker abschwächen als das transmittierte oder gestreute Licht. Entsprechend werden Sonnenbrillen mit polarisierenden Gläsern verwendet, um Reflexionen zu vermindern. Besonders beliebt sind sie bei Wassersportlern (Reflexion der Sonne am Wasser), aber auch die Reflexion am Asphalt von Straßen kann leicht reduziert werden, um das Autofahren zu erleichtern.

Polarisationsfilter vermindern Reflexionen

Ganz generell gilt, dass sich eine Szene, die reflektierende Anteile enthält, deutlich durch Polarisatoren bei der Bildaufnahme beeinflussen lässt (siehe z.B. Abb. 8.1.4). Insbesondere lässt sich aber auch der Himmel (polarisiert) künstlich abdunkeln. Somit wirkt der Himmel deutlich „blauer“ (weil dunkler). Der Kontrast zu Wolken (unpolarisiert) wird dabei erhöht. Zirkularpolarisatoren sind dabei einfach lineare Polarisatoren mit einer zusätzlichen $\lambda/4$ -Schicht.⁴



(a) Polarisator Stellung 1



(b) Polarisator Stellung 2

Abbildung 8.1.4: Reduzierung von störenden Reflexionen durch Polarisationsfilter. Bei geeigneter Drehung eines Polarisationsfilters vor der Kamera können störende Reflexe vermindert werden weil das reflektierte Licht teilpolarisiert ist (Fresnelgleichungen).

Für raue Oberflächen ist die Beeinflussung der Polarisation komplexer. Solange unpolarisiertes Licht auf die Oberfläche fällt, kommt von der rauen Oberfläche auch polarisiertes Licht zurück. Wenn man die Fläche aber mit polarisiertem Licht bestrahlt, dann ergibt sich eine Depolarisation, d.h. der Grad

⁴Einige Kameras benötigen aufgrund einer linear-polarisationsabhängigen internen Strahlteilung (Belichtung und Helligkeitsmessung) idealerweise einen Zirkularpolarisator um eine perfekte Belichtung zu erzielen.

der Polarisierung nimmt ab. Generell kann man sagen, dass mit zunehmender Oberflächenrauheit und Irregularität die Depolarisation zunimmt. Als anschaulichen Grund kann man die Mehrfachstreuungsprozesse bei stark rauen Oberflächen annehmen⁵.

Dies erklärt auch, warum die Depolarisation zunimmt, je heller das Objekt ist (*Umov Effekt*). Man geht davon aus, dass dabei ein natürliches Objekt wie z.B. Gras oder Gestein zwei Lichtanteile aufweist. Der direkt reflektierte Anteil hat einen hohen Polarisationsgrad. Zusätzlich addiert sich aber ein Anteil, der nicht von der obersten Objektschicht kommt denn ein Teil des Lichts dringt in die äußeren Schichten des Objekts ein und wird dort gestreut. Dieser zweite Anteil ist stark depolarisiert. In Summe ergibt sich so eine teilweise Polarisation und der Polarisationsgrad ist umso stärker, je größer der direkt reflektierte Anteil des Lichts ist. Bei einem dunklen Objekt ist nun gerade der Anteil des Lichts aufgrund des nahe der Oberfläche gestreuten Lichts verringert (deswegen erscheint das Objekt ja dunkel). Da dieses Licht depolarisiert ist verringert sich somit der Anteil des depolarisierten Lichts und damit erhöht sich der Polarisationsgrad.

Eine in der Technik besonders häufig verwendete Form des Polarisators, der Folienpolarisator, ist in der Lage, auf einfache Weise (preiswert) eine nahezu vollständige Polarisation zu erzielen. Das Prinzip ist in Abb. 8.1.5 anhand eines *Drahtgitterpolarisators* für Mikrowellen (ebenfalls elektromagnetische Wellen, aber mit deutlich geringerer Frequenz als Licht) dargestellt. Das schwingende elektrische Feld der Mikrowelle bewirkt in den Drähten einen Wechselstrom und wird dadurch durch ein gleich starkes Gegenfeld ausgelöscht.

Prinzip von Polarisationsfolien: Absorption durch Stromfluss

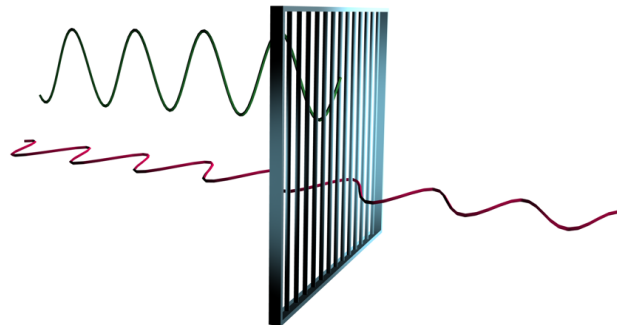


Abbildung 8.1.5: Prinzip eines Folienpolarisators: Elektrische Feldkomponenten, die parallel zu den Gitterstäben laufen, führen zu einem Stromfluss. Entsprechend wird durch den Stromfluss die Energie dieser Feldkomponenten absorbiert bzw. durch das induzierte Feld das Originalfeld ausgelöscht. Für optische Frequenzen werden keine Metalldrahtgitter, sondern molekulare Gitter verwendet.

Dass der Stromfluss zu einer Auslöschung führt, können Sie sich auf zwei Weisen anschaulich klar machen: Zum einen führt ein Stromfluss zu Wärme

⁵M. Eyler, Polarimetric imaging for the detection of disturbed surfaces, Thesis Naval Postgraduate School Monterey (2009)

und damit muss dem einfallenden Lichtfeld wegen der Energieerhaltung Energie entzogen werden, das Licht wird also schwächer. Zum anderen führt der wechselnde Stromfluss (das elektrische Feld aufgrund des Lichts wechselt schließlich mit hoher Frequenz) zu einem induzierten magnetischen Feld, das das magnetische Feld des Lichts gerade ausgleicht.

Die Erklärung macht wohlgermt aber nur dann Sinn, wenn die Drähte parallel zum Vektor des elektrischen Feldes liegen. Das heißt nur das entsprechend dieser Drahrichtung polarisierte Licht wird absorbiert. Die senkrecht hierzu polarisierten Lichtanteile können den Polarisator ungehindert passieren (rot in Abb. 8.1.5).

Aufgrund der geringen Wellenlänge von Licht sind die Gitterpolarisatoren nicht für Licht verwendbar. Benötigt werden leitfähige Gitter im mikroskopischen Maßstab. Edwin *Land*, ein sehr vielseitiger Erfinder⁶, entdeckte 1938 eine preiswerte Herstellungsmethode für solche Gitter. Hierzu wird Polyvinylalkohol erhitzt und gestreckt. Durch Eintauchen in Jod erreicht man, dass sich die Leitungselektronen der Jodatome entlang der nun langgestreckten CH-Ketten bewegen können. Eine Leitfähigkeit ist also – analog zum Drahtgitterpolarisator – entlang parallel zueinander ausgerichteter Ketten möglich.

Entsprechende Polarisatoren finden Sie vor praktisch allen *Flüssigkristalldisplays* (liquid crystal display, LCD), egal ob an der *Armbanduhr*, dem Taschenrechner oder am Laptop. Das Prinzip der am häufigsten verwendeten Anzeigeelemente, den sogenannten verdrillt-nematischen (twisted-nematic, TN) LCDs, ist in Abb. 8.1.6 dargestellt.

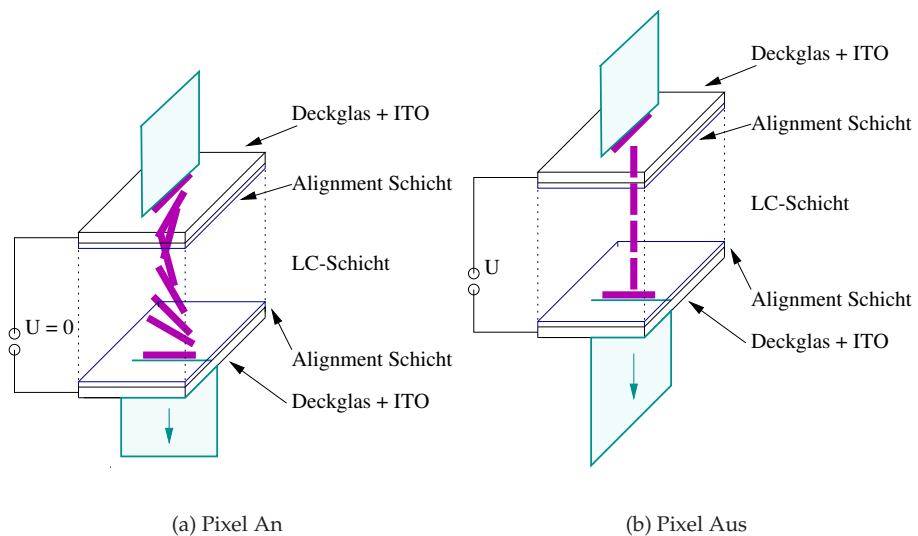


Abbildung 8.1.6: Verdrillt-nematisches Flüssigkristallelement. Ohne Spannung wird die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts um 90° gedreht („Waveguiding“). Diese Rotation wird durch Anlegen einer Spannung aufgehoben.

Vor dem Eintritt in das Display wird das Licht zunächst durch einen Folienpolarisator polarisiert. Mit angelegter Spannung durchdringt das Licht ungestört die Flüssigkristallschicht und wird durch den darauf folgenden Polarisator geblockt, d.h. kein Licht durchdringt das Display. Ohne angelegte Spannung ergibt sich allerdings ein anderer Effekt. Das polarisierte Licht wird

⁶Von ihm stammen neben den Polarisationsfolien auch die Polaroidkamera, die Landsche Farbtheorie und viele weitere Erfindungen.

durch die Flüssigkristallschicht um 90° gedreht. Die schraubenförmig angeordneten Moleküle der Schicht leiten das Licht (in erster Näherung) entlang ihrer Orientierung weiter. Man spricht von „Waveguiding“. Dementsprechend passiert das die Flüssigkristallschicht verlassende Licht den Polarisator, das Display ist „hell“.

Einen interessanten Versuch kann man mit drei Polarisatoren durchführen (siehe Abb. 8.1.7). Der erste Polarisator (z.B. horizontal) ist senkrecht zum dritten Polarisator (z.B. vertikal) orientiert. Ohne den zweiten Polarisator ergibt sich damit durch den dritten Polarisator eine komplette Auslöschung des Lichts denn das Licht hinter dem ersten Polarisator ist zwangsläufig horizontal polarisiert und kann damit den dritten Polarisator nicht passieren.

Durch Einfügen des zweiten Polarisators ergibt sich erstaunlicherweise eine teilweise Passage des Lichts durch die Anordnung. Der zweite Polarisator reduziert nun zwar bereits die Lichtmenge, bevor das Licht den dritten Polarisator trifft, aber gleichzeitig ändert der Polarisator die Polarisation des Lichts und damit kann ein Teil des noch verbleibenden Lichts den dritten Polarisator passieren.

Am Polarisator muss also jeweils eine Zerlegung in Durchlass- und Blockier- richtung vorgenommen werden. Neben der Intensität ändert sich beim Durchgang durch den Polarisator eben auch die Polarisation des Lichts.⁷

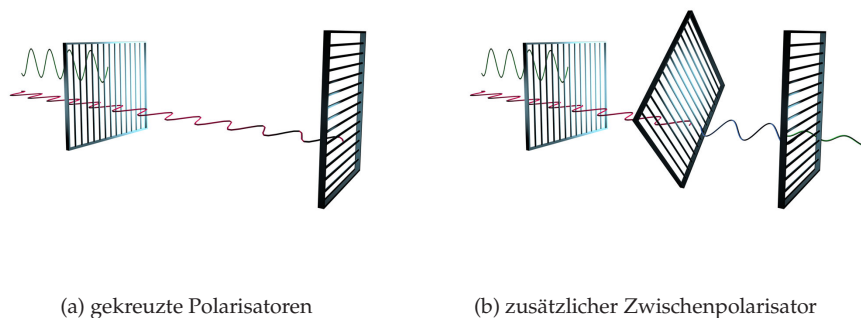


Abbildung 8.1.7: Gekreuzte Polarisatoren führen zu einer kompletten Auslöschung des Lichts. Ein zusätzlicher Zwischenpolarisator führt dazu, dass ein Teil des Lichts die Anordnung passiert.

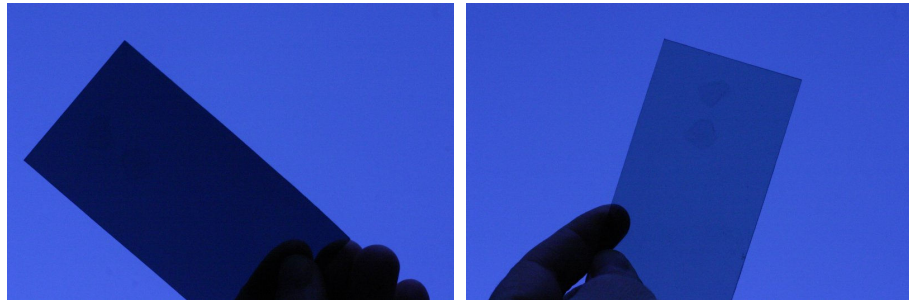
8.2 Die Polarisation des Himmels

Wenn Sie den Himmel durch einen Polarisator betrachten und den Polarisator drehen, werden Sie feststellen, dass das blaue Himmelslicht polarisiert ist (siehe Abb. 8.2.8). Bei einer genauen Untersuchung werden Sie weiterhin beobachten, dass der Grad der Polarisation (und damit die Helligkeitsänderung beim Drehen des Polarisators) von der Position am Himmel abhängt. Das Maximum des Polarisationsgrades liegt bei ca. 75% (wenn die Sonne tief steht und

Das Himmelslicht ist polarisiert

⁷Gedanklich noch verzwickter wird dieser Versuch im Photonenbild. In diesem Fall beschreibt man die Polarisation durch den sogenannten „Spin“ des Photons.

keine Bewölkung vorhanden ist). Falls Sie den Versuch zu unterschiedlichen Tageszeiten durchführen, wird sich zeigen, dass der Polarisationsgrad insbesondere auch von der Position der Sonne abhängt.



(a) Polarisator in Stellung 1

(b) Polarisator in Stellung 2

Abbildung 8.2.8: Aufnahmen des Himmels (nahe Zenit) mit Polarisationsfilter bei tiefstehender Sonne. Der starke Helligkeitsunterschied zeigt, dass das Licht stark polarisiert ist.

Abb. 8.2.9 veranschaulicht, warum die Rayleigh Streuung, die für das blaue Himmelslicht verantwortlich ist, zu polarisiertem Licht führt. Die Streuung erhält die Schwingungsebene des elektromagnetischen Felds. Damit ist aber rein geometrisch klar, dass ein Beobachter, der senkrecht zur Verbindungsstrecke Sonne–Luftmolekül steht, polarisiertes Licht sieht. Da das auf den Streukörper fallende Licht keine Komponente des elektrischen Felds in Ausbreitungsrichtung hat, fehlt eine der beiden Hauptpolarisationen für den Beobachter.

Dadurch ist auch klar, dass der Grad der Polarisation mit der Position der Sonne und dem Himmelsbereich, der betrachtet wird, variiert.⁸ Eine sehr starke Polarisation ergibt sich bei tiefstehender Sonne in Richtung des Zenits. Idealerweise würde man für den Polarisationsgrad

$$P(\phi) := \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{1 - \cos^2 \phi}{1 + \cos^2 \phi} \quad (8.1)$$

finden.⁹

Allerdings hat dieses Einfachmodell gewisse Schwächen. Die Polarisation müsste entgegen der Sonne eigentlich komplett verschwinden, in der Praxis erhält man allerdings immer noch einen Polarisationsgrad von ca. 20 bis 30%. Der Grund hierfür liegt vor allem in der Beleuchtung des Himmels, nicht nur durch das direkte Sonnenlicht, sondern auch durch bereits gestreutes Licht.¹⁰

⁸Streuung und Polarisation führen so zusammen auch zu einer leichten Verringerung der Helligkeit des Himmels 90° von der Sonne, siehe G.P. Können „Polarized light in Nature“.

⁹Vollmer: „Lichtspiele in der Luft“, Elsevier 2005

¹⁰Der Punkt bei dem die vertikale Polarisation in die einfache horizontale Polarisation übergeht (an diesem Punkt ist der Polarisationsgrad Null), wird *Arago Punkt* genannt.

Grund: Streuung

Polarisation variiert mit Sonnenposition und beobachtetem Gebiet

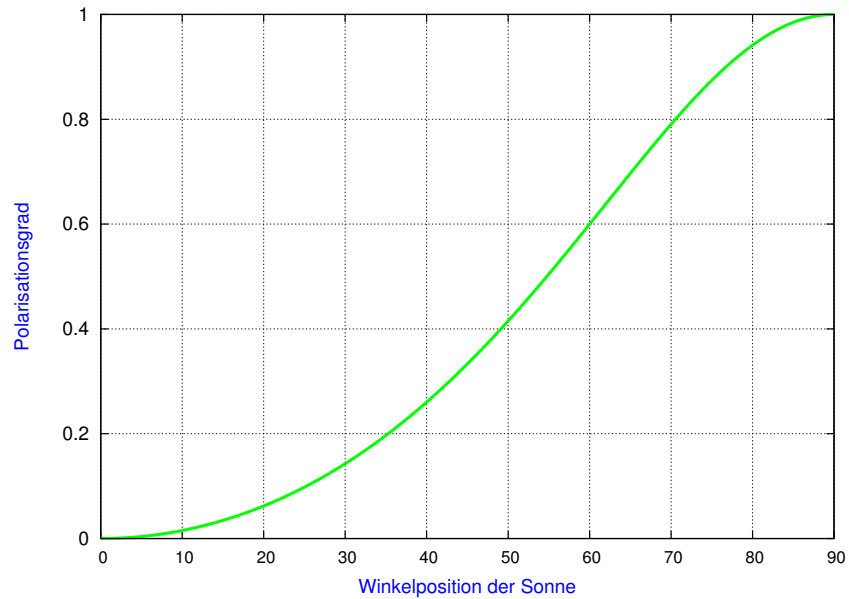


Abbildung 8.2.10: Theoretischer Polarisationsgrad des Himmels in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Sonne und Beobachtungsrichtung (vereinfacht).

Dies führt auch dazu (Streuwahrscheinlichkeit für blaue Photonen besonders stark), dass blaues Licht weniger stark polarisiert ist als rotes oder grünes Licht. Die Mehrfachstreuungen, die bei blauem Licht häufiger auftreten, führen zu einer Depolarisation, weil bei jedem Streuvorgang die Lichtrichtung und damit auch die Polarisation geändert wird. Von besonderer Bedeutung sind aber auch Aerosole, die aufgrund ihrer Größe nicht sinnvoll mittels der Rayleigh Streutheorie beschrieben werden können. Der Himmel ist bei Dunst dementsprechend deutlich geringer polarisiert.

Ein Fotograf kann durch Einsatz eines Polarisationsfilters das blaue Himmelslicht „verstärken“, indem er den Filter so einstellt, dass das teilweise polarisierte nicht-blaue Licht gut absorbiert wird. Die Hälfte des restlichen, weniger polarisierten blauen Lichts wird durch den Filter durchgelassen. Der Anteil von blauem Licht zu rotem Licht wird vergrößert.

Eine noch stärkere Depolarisation ergibt sich für Wolken¹¹ (Mehrfachstreuung). Dementsprechend kann genauso das Blau des Himmels durch den Polarisationsfilter stärker abgeschwächt werden als das Weiß der Wolken. Auf diese Weise kann man den Kontrast der Wolken zum Himmel verstärken.

8.3 Doppelbrechung

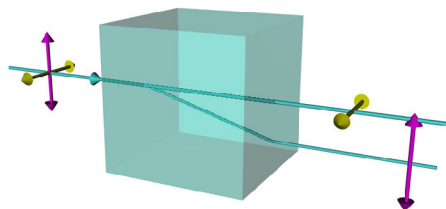
Mit dem Begriff *Doppelbrechung* werden zwei zwar eng zusammenhängende, aber doch phänomenologisch unterschiedliche Effekte bezeichnet. Zum einen versteht man darunter den in Abb. 8.3.11 dargestellten Vorgang der Aufspaltung des Lichts in zwei Strahlen bei der Brechung. Obwohl in der Abbildung der einfallende Strahl senkrecht zur Grenzfläche liegt, ergibt sich für den sogenannten *außerordentlichen Strahl* ein Brechungswinkel ungleich Null. Dies widerspricht klar dem Brechungsgesetz (Gl. 5.9). Die beiden sich ergebenden

¹¹Sehr dünne Wolken depolarisieren kaum. Leuchtende Nachtwolken können dagegen sogar einen außerordentlich hohen Polarisationsgrad von bis zu 95% aufweisen.

*intensiveres Himmelsblau
durch Polarisatoren*

Strahlen sind unterschiedlich polarisiert und hierin liegt auch letztlich die Basis für die Erklärung des Phänomens. Wir wollen hier nicht auf die doch recht komplexen Details eingehen.¹²

Grundlage ist aber – und das ist die zweite Bedeutung des Begriffs „Doppelbrechung“ –, dass unterschiedlich polarisiertes Licht sich in doppelbrechenden Medien (z.B. Kalkspat, Quarz) unterschiedlich schnell fortpflanzt und daher einen unterschiedlichen Brechungsindex „sieht“¹³.



(a) Prinzip Doppelbrechung



(b) Doppelbrechung an Kalkspat

Abbildung 8.3.11: Doppelbrechung: Ein senkrecht auf einer Grenzfläche zu einem anisotropen, doppelbrechenden Material einfallender Strahl wird (teilweise) gebrochen. Dies widerspricht dem konventionellen Brechungsgesetz.

Dieses unterschiedliche Verhalten für unterschiedliche Polarisation führt auch zu weiteren, teilweise recht beeindruckenden Erscheinungen. Abb. 8.3.12 zeigt die Aufnahme einer Plastiksachtel zwischen Polarisatoren. Das transparente Plastik weist eine deutliche Doppelbrechung auf.

bunte Muster in transparentem Plastik

Um zu verstehen, was hier passiert, müssen wir das einfallende Licht gedanklich in zwei zueinander senkrechte Hauptpolarisationsrichtungen zerlegen (Abb. 8.3.13). Als Hauptrichtungen x und y wählen wir die Hauptrichtungen des Plastiks. Licht mit einer Polarisation der Hauptrichtung 1 sieht also den Brechungsindex n_1 , während auf Licht mit einer Polarisation senkrecht dazu der Brechungsindex n_2 wirkt.

Zur Erinnerung: Beim Durchlauf von Licht durch ein Medium der Brechzahl n wird das Licht gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 um gerade den Faktor n verlangsamt, d.h. seine Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt lediglich $c = c_0/n$. Wenn nun zwei (idealisiert gedachte) Lichtpulse durch das Material laufen und der eine Puls aufgrund seiner Polarisation den Brechungsindex n_1 , der andere Lichtpuls aber den Brechungsindex n_2 sieht, dann wird der eine Puls vor dem anderen das Material verlassen.

Denkt man die Pulse als Wellenpakete, so wird zwischen beiden Schwingungen eine Phasendifferenz entstehen. Die Phasendifferenz ist anschaulich direkt proportional zur Brechzahldifferenz $\Delta n = n_1 - n_2$ und zur Materialdicke d :

$$\Delta\phi = \Delta n d \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8.2)$$

¹²z.B. Kühlke, „Optik“, Verlag Harri Deutsch

¹³Letztlich ergibt sich bei Strukturen, die nicht in allen Raumrichtungen gleich aufgebaut sind („Anisotropie“), eine unterschiedliche Polarisierbarkeit des Materials. Dies führt dann zu einer veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts.

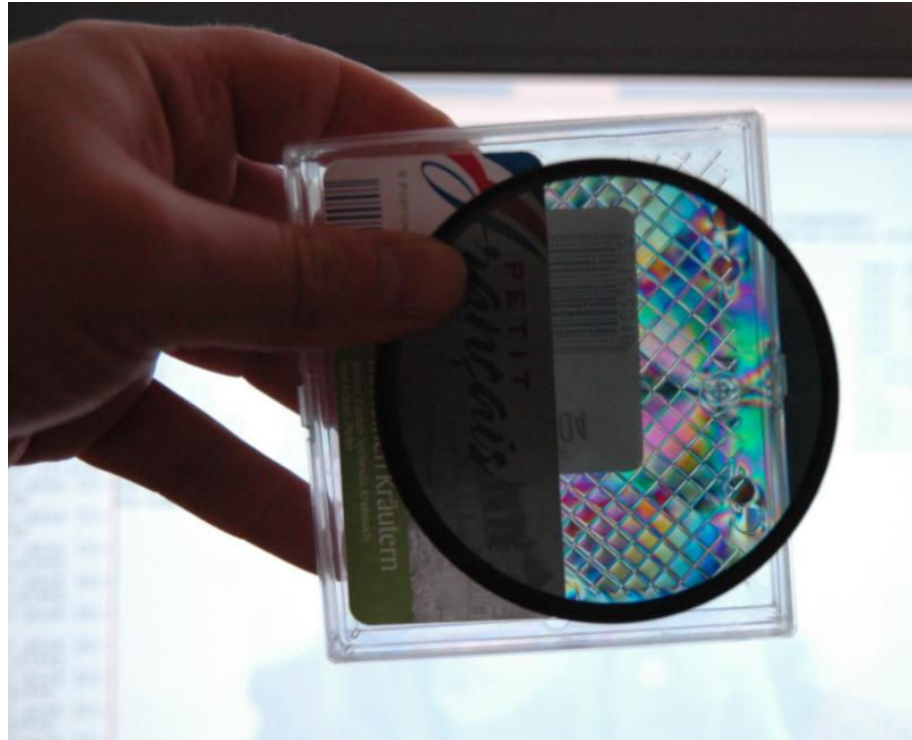


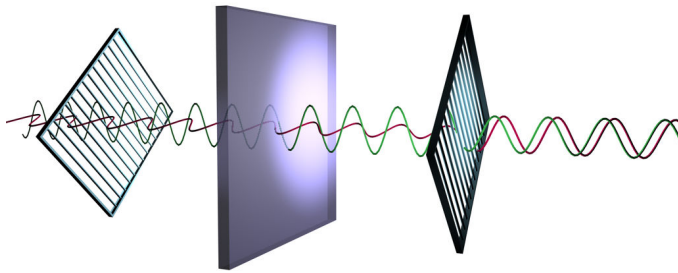
Abbildung 8.3.12: Farbeffekte aufgrund der Doppelbrechung. Doppelbrechende Materialien führen zwischen Polarisatoren zu Farbeffekten. Farbtafel: 12.0.44

Der Faktor $2\pi/\lambda$ ist notwendig, um die optische Wegdifferenz $\Delta n d$ (vgl. Abschnitt 5.12) in eine Phase umzuwandeln. Eine Phasenschiebung von 2π entspricht ja gerade einer Wellenlänge, so dass die optische Weglänge lediglich durch die Wellenlänge geteilt und mit 2π multipliziert werden muss, um eine Phase zu bekommen.

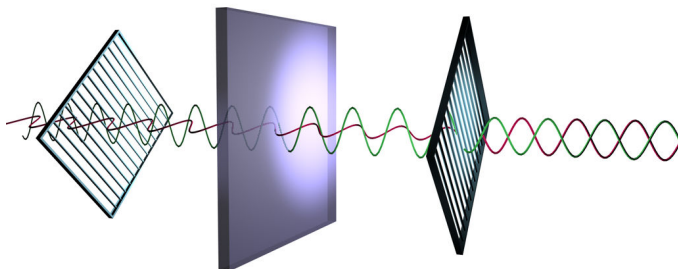
Laufen nun die beiden Lichtwellen durch einen Polarisator, so werden jeweils wieder nur Teile der beiden Wellen passieren. Diese passierenden Wellen sind dann aber gleich polarisiert und können daher miteinander interferieren, d.h. sich gegenseitig auslöschen oder verstärken. Sobald das $\Delta\phi$ aus Gl. 8.2 ein Vielfaches von 2π beträgt, ergibt sich eine Verstärkung der entsprechenden Wellenlänge λ , während ein ungeradzahliges Vielfaches von π zu einer destruktiven Interferenz, also Auslöschung, der entsprechenden Wellenlänge führt. Geringe Dickenschwankungen, lokale Änderungen der Geometrie (Einfallswinkel) oder der Doppelbrechung¹⁴ Δn führen so zu ganz unterschiedlichen Farben und ergeben damit letztlich das bunte Bild aus Abb. 8.3.12. Aus der Farbe der Muster kann dementsprechend auf die Doppelbrechung und/oder die Dicke des Materials rückgeschlossen werden.

Abb. 8.3.14 zeigt, dass polarisationsbedingte Farbeffekte auch ohne einen Eingangspolarisator stattfinden können. In der Regel erfolgt die Beleuchtung dann mit teilweise polarisiertem Licht (z.B. Himmel, oder Reflexion). Es geht aber auch komplett ohne Polarisator, wie Abb. 8.3.14 zeigt. Oft sieht man entsprechende Farbeffekte an transparentem Plastik (CD Hüllen), aber auch an dünnen *Zuckerschichten*, z.B. in Saffflaschen.

¹⁴Dieser Effekt wird oft eingesetzt, um mechanische Spannungen in Materialien sichtbar zu machen. Die Spannungen führen zu einer Änderung der Gitterstruktur (Zugspannung \rightarrow größerer Atomabstand) und damit zu einer Änderung der Doppelbrechung.

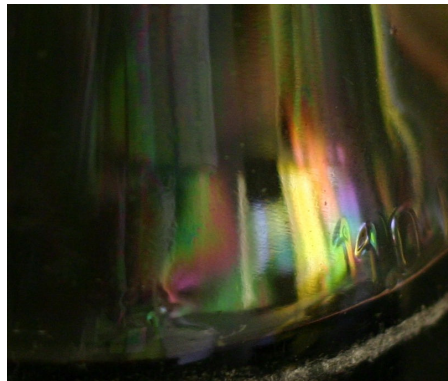


(a) konstruktive Interferenz



(b) destruktive Interferenz

Abbildung 8.3.13: Zur Erklärung der Farbeffekte aufgrund der Doppelbrechung: Je nach Wellenlänge, Schichtdicke und Doppelbrechung ergibt sich destruktive oder konstruktive Interferenz.



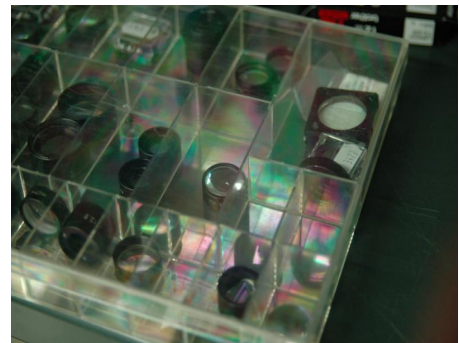
(a) Zuckerschicht auf Glas



(b) Plexiglasbox



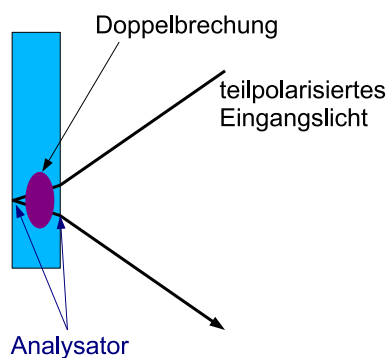
(c) Cockpitfenster



(d) Plexiglasbox

Abbildung 8.3.14: Farbeffekte aufgrund von Doppelbrechung ohne Polarisatoren.
Farbtafel: 12.0.45

Als teilpolarisierte Eingangswelle dient wieder Himmelslicht oder aber auch von einer Glas- oder Plastikfläche reflektiertes Licht (Fresnelgleichungen). Aber auch hier ist eine Art Polarisator nach dem Durchgang durch das Material notwendig. Diese Polarisation kann aufgrund der Fresnelgleichungen bei nicht senkrechtem Einfall durch das Material selbst erfolgen, denn die Gleichungen besagen, dass sowohl transmittierter als auch reflektierter Anteil des Lichts stark von der Polarisation abhängen. Abb. 8.3.15 verdeutlicht, wie es z.B. bei einer CD-Hülle zu einer entsprechenden Farbaufspaltung kommen kann.



*Beobachtung auch ohne
Analysator aufgrund der
Fresnelgleichungen*

Abbildung 8.3.15: Prinzip der Farbeffekte ohne zusätzliche Polarisatoren: Aufgrund der Fresnelgleichungen ergibt sich bei den Reflexionen eine (teilweise) Polarisierung.

8.4 Polarisation Sehen ohne Hilfsmittel

Im letzten Abschnitt wurde schon ein Trick angegeben, um Polarisation ohne Hilfsmittel sichtbar zu machen. Hierbei waren Brechung oder Reflexion die entscheidenden Hilfsmittel, die mittels der Fresnelgleichungen zu einer Abschwächung des Lichts führen. Bis zu einem gewissen Grad sind Menschen aber auch in der Lage, Polarisation direkt und ohne Hilfsmittel zu sehen. Der Effekt ist allerdings sehr gering und benötigt bei den meisten Menschen ein gewisses Training.

Polarisiertes Licht zeigt sich dabei als eine leichte (kaum wahrnehmbare) schmetterlingsartige Figur (siehe Abb. 8.4.16). Die gelben Teile zeigen in die Richtung senkrecht zur Polarisation. Die Figur hat eine Ausdehnung von ca. 3 bis 5° des Sehfelds und wird von verschiedenen Menschen unterschiedlich wahrgenommen. Einige nehmen nur den eher gelblichen Bereich, andere eher den bläulichen Teil wahr. Man spricht zu Ehren des Entdeckers W. von Haidinger vom *Haidinger Brush*. Am besten ist der Effekt bei tiefstehender Sonne und wolkenlosem Himmel direkt im Zenit sichtbar.

Haidinger Brush

Um den Effekt zu sehen, ist einiges an Übung notwendig. Sinnvoll ist es, mit vollständig polarisiertem Licht zu üben.¹⁵ Als Lichtquelle – wenn kein Polarisator zur Hand ist – bietet sich heutzutage ein LCD Bildschirm an. Man verwendet am besten ein homogenes, leicht bläuliches¹⁶ Bild und kippt den Kopf leicht hin und her. Die Bewegung ist notwendig um dafür zu sorgen, dass das Sehsystem den Effekt nicht ausblendet. Da unser Sehsystem besonders stark auf Änderungen reagiert, kann es auch sinnvoll sein, einen Polarisator laufend zu drehen (schnell zwischen 0 und 90° wechseln), um den Effekt zu sehen.

¹⁵Wenn der Polarisationsgrad geringer als ca. 50% ist, kann der Effekt kaum beobachtet werden.

¹⁶Die blauen Sehzellen haben die höchste Polarisations sensitivität.



Abbildung 8.4.16: Haidinger Schmetterling: Genügend Übung vorausgesetzt kann man bei der Beobachtung einer homogenen, aber linear polarisiert leuchtenden Fläche (z.B. Himmel in Richtung des Zenits bei Sonnenuntergang) eine entsprechende Figur (allerdings sehr viel schwächer) bemerken. Das menschliche Auge ist leicht polarisationsempfindlich. Farbtafel: 12.0.46

Eine komplette Erklärung der Details ist kompliziert und wohl nicht komplett geklärt, bereits 1866 hat Helmholtz aber die grundsätzliche Wirkungsweise des Phänomens erkannt: Lutein, ein Pigment der Fovea centralis, dem Bereich schärfsten Sehens auf der Netzhaut, ist doppelbrechend und absorbiert Licht mit einer Polarisationsrichtung parallel zur Molekülachse besonders stark. Aufgrund der kreisförmigen Anordnung der Moleküle auf der Netzhaut (siehe Abb. 8.4.17) ergibt sich auf unterschiedlichen Bereichen der Netzhaut eine unterschiedlich starke Abschwächung des Lichts.

Andere Lebewesen, z.B. *Bienen*, einige *Käfer* und *Spinnen*, sind wesentlich besser in der Lage, polarisiertes Licht wahrzunehmen.¹⁷ Mehr als 100 verschiedene Insektenarten nutzen die Polarisation. Zumindest ein Drittel dieser Insekten nutzt die Polarisation als Navigationshilfe.

Die Bienen nutzen die Polarisation zur Orientierung bzw. Kennzeichnung der Richtung, in der Nahrung zu finden ist. *Frisch* hat den Kommunikationsscode, mit dem die Bienen ihren Artgenossen den Ort einer Nahrungsquelle übermitteln 1944 entschlüsselt. Die Bienen, deren Facettenauge im übrigen aus ca. drei bis vier tausend Facetten besteht, tanzen in der senkrecht zur Erdachse stehenden Wabe eine Acht (Abb. 8.4.18). Die Anzahl der Runden pro Zeiteinheit kennzeichnet die Entfernung der Quelle zum Bienenstock. Die Orientierung der Acht in Bezug auf die Senkrechte gibt die Richtung (Winkelabweichung) in Bezug auf die Sonne an.

Wenn die Sonne nicht sichtbar ist, dann wird der Sonnenstand trotzdem korrekt verstanden, indem die Polarisation des Himmelslichts detektiert wird. Die Detektion der Polarisation erfolgt in den Facettenaugen der Bienen. Pro Linse des Facettenauges werden neun Sehzellen eingesetzt. Eine dieser neun Sehzellen ist polarisationssensitiv.

Zuckmücken nutzen die Polarisation, um geeignete Gewässer für ihre Eiablage auszuwählen. Bei der Reflexion an der Wasseroberfläche ergibt sich eine teilweise Polarisierung des reflektierten Lichts (Fresnelgleichungen). Von den Mücken wird ein möglichst hoher Polarisationsgrad bevorzugt. Tümpel, mit vielen Nährstoffen führen zu einem recht trüben, dunklen Wasser. Damit wird der der Reflexion überlagerte Lichtanteil reduziert und damit der Polarisations-

Bienen können die Polarisation sehen

¹⁷Bild der Wissenschaft 6/2002

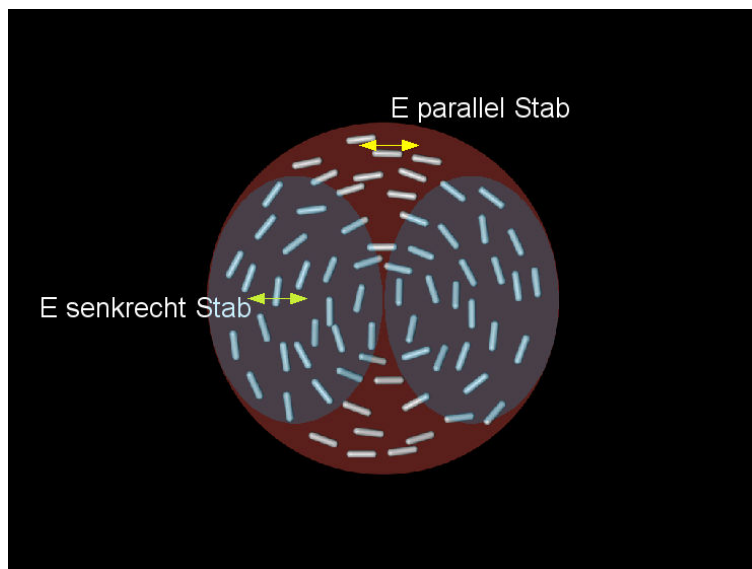


Abbildung 8.4.17: Haidinger-Schmetterling: Wie sehen Menschen die Polarisation? Ausschlaggebend sind Pigmente in der Netzhaut, die Licht mit einer Polarisationsrichtung parallel zur Molekülachse verstärkt absorbieren. Die Moleküle sind über die Netzhaut nicht zufällig, sondern kreisförmig orientiert.

sgrad erhöht.¹⁸

Neben Insekten sind auch andere Tiere, z.B. einige Fische und Vögel oder auch *Oktopusse* in der Lage, Polarisation zu sehen. Der europäische *Tintenfisch* kann sowohl Polarisation sehen als auch das von ihm gestreute Licht in der Polarisation beeinflussen.¹⁹ Bei Oktopussen und Tintenfischen wurde die Theorie aufgestellt, dass ihre Beute (Quallen) besser gegen den teilpolarisierten Hintergrund (Brechung des Sonnenlichts an Wasseroberfläche) beobachtbar ist.²⁰ Die Tiere scheinen aber die Polarisation auch zur Kommunikation untereinander zu nutzen. Durch die Darstellung von Polarisationsmustern auf der Haut kann z.B. die Stimmung anderen Artgenossen mitgeteilt werden. Potentielle Feinde (Wirbeltiere, z.B. Haie, Seelöwen) haben in der Regel kein polarisationsempfindliches Sehsystem) sehen diese Muster nicht. Daher wird die Tarnung der Tintenfische nicht aufgehoben.

Die Beeinflussung der Polarisation erfolgt im übrigen über sehr fein strukturierte (in der Größenordnung der Lichtwellenlänge) Plättchen innerhalb der Iridophore in der Haut. Bei der Reflexion an diesen linear angeordneten Strukturen ergibt sich ein unterschiedlicher Reflexionsfaktor für unterschiedliche Polarisationsrichtungen (*Strukturdoppelbrechung*).

¹⁸Journal of Experimental Biology 211, S. 3536 (2008)

¹⁹Shashar et al., Journal of Experimental Biology 188, 2077 (1996).

²⁰Moody, Parris, Nature 186, S. 839 (1960), Shashar et al., Vision Research 40, 71 (2000)

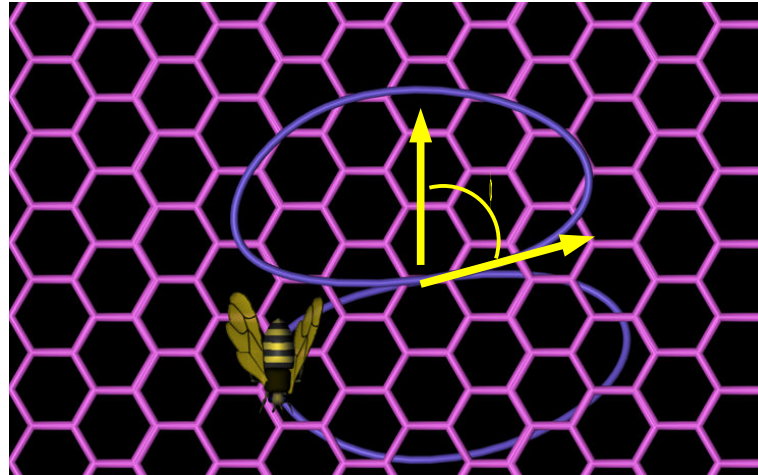


Abbildung 8.4.18: Bienen nutzen ihre Fähigkeit, die Polarisation des Himmelslichts zu detektieren, um auch bei nicht sichtbarer Sonne den Sonnenstand zu ermitteln. Dieser „Sonnenkompass“ dient zur Orientierung. Durch den Bientanz teilen sie ihren Artgenossen die Position von Futterquellen mit. Die Orientierung der „getanzten Acht“ zur Senkrechten gibt dabei den Winkel der Futterquelle zur Sonne an, während die Tanzgeschwindigkeit die Entfernung kodiert.

8.5 Weiteres zum Thema Polarisation

Bei doppelbrechenden Materialien wie z.B. *Turmalin* ergibt sich oft zusätzlich noch eine polarisationsabhängige Absorption, d.h. unterschiedlich polarisiertes Licht wird unterschiedlich stark absorbiert. Dieser Effekt wird *Dichroismus* genannt. So absorbiert ein 1 mm dicker Turmalin Kristall praktisch komplett eine Polarisationskomponente.²¹

Lässt man linear polarisiertes Licht durch eine *Zuckerlösung* passieren (Abb. 8.5.19), so wird die Schwingungsebene des Lichts rotiert. Die Rotation ist dabei linear von der Konzentration der Lösung und der durchlaufenen Dicke abhängig. Grund für dieses Verhalten ist eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit für links- und rechtszirkulares Licht. Die lineare Eingangspolarisation lässt sich als Überlagerung einer links- und einer rechtszirkularen Welle darstellen. Durch die sich bei der Propagation ergebenden Phasendifferenz der beiden Wellen ergibt sich letztlich (Überlagerung von links- und rechtszirkularen Welle) eine rotierte lineare Polarisation.

Dichroismus: Unterschiedliche Absorption für unterschiedliche Polarisierung

Zuckerlösungen rotieren die Polarisationsrichtung

²¹Angeblich (oder auch nicht) haben auf diese Weise schon die Wikinger navigiert. Unter Umständen haben sie hierzu natürlich vorkommende Kristalle eingesetzt, die teilweise aufgrund des Dichroismus (farbabhängig) Blau statt Gelb erscheinen, wenn sie in Richtung Sonne gehalten werden.

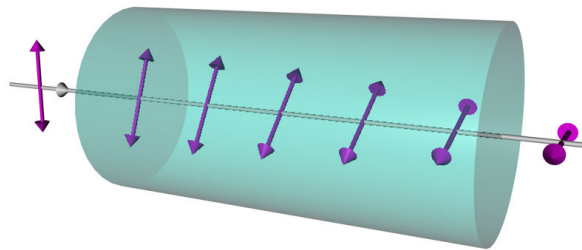


Abbildung 8.5.19: *Optische Aktivität: Optisch aktive Medien weisen für rechts- und linkszirkulares Licht eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit auf. Dies führt bei linear polarisiertem Licht zu einer Drehung der Polarisationssebene. Der Drehwinkel hängt linear von der Dicke des Mediums und bei Flüssigkeiten von der Konzentration (z.B. Zucker) ab.*

Kapitel 9

Lichtquellen

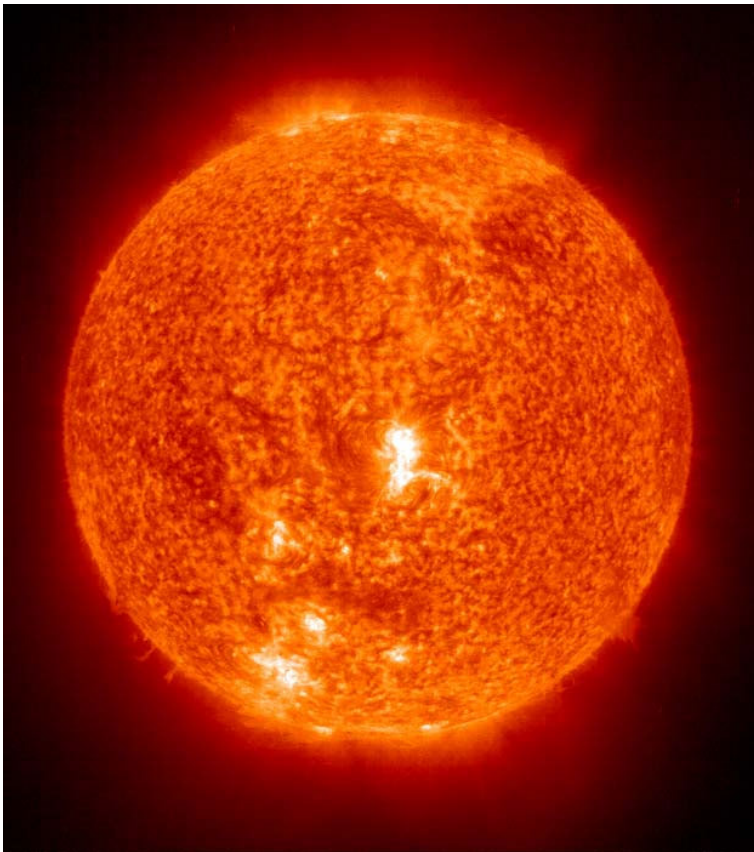


Abbildung 9.0.1: Röntgenaufnahme der Sonne. Mit freundlicher Genehmigung der NASA/ESA

„Und Gott sprach: Es werde Licht! Und es ward Licht.
Und Gott sah, dass das Licht gut war.“

(Genesis 1)

Bevor Licht mit Materie wechselwirkt und so z.B. von uns gesehen oder an Luftmolekülen gestreut wird, muss Licht zunächst entstehen. Atome oder Moleküle senden Licht aus, indem Elektronen von einem energetisch hohen Niveau in ein niedrigeres Niveau fallen. Die dabei frei werdende Energie, also die Energiedifferenz der Niveaus, kann in Form eines Lichtteilchens (Photon)

Erzeugung von Licht: Anregung von Elektronen, die später wieder in das Grundniveau zurückfallen

abgegeben werden.

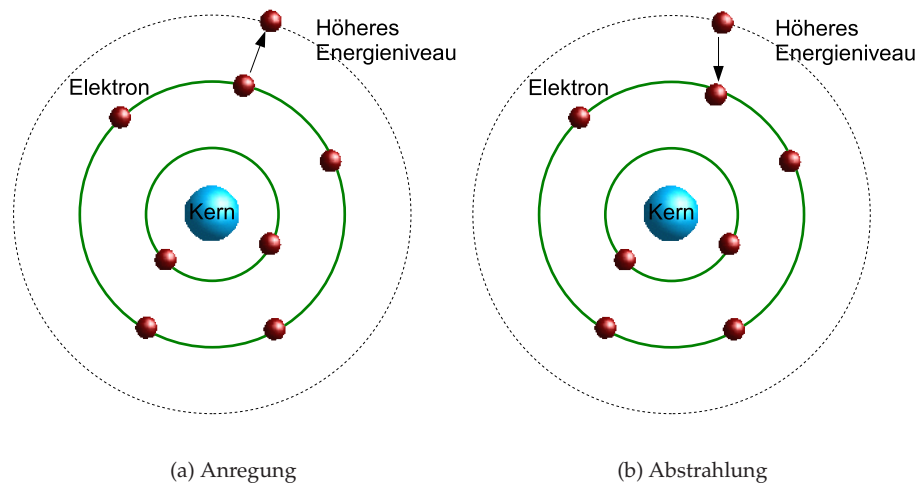


Abbildung 9.0.2: Abstrahlung von Licht: Durch Energiezufuhr wird ein Elektron auf ein höheres Energieniveau angeregt. Die beim Rückfall frei werdende Energie kann als Licht abgegeben werden.

Wesentlich ist also zunächst, dass den Atomen Energie zugeführt wird und dass die zugeführte Energie dann in einem folgenden Schritt (teilweise) in Form von Licht wieder abgegeben wird. Die Anregung kann auf ganz unterschiedliche Weise erfolgen. Gebräuchlich sind

- Thermische Anregung: z.B. Sonne, Glühbirne, Blitze, Kerze
- Stromfluss: z.B. LED, Laserdiode
- Optische Anregung: Fluoreszenz, Phosphoreszenz
- Chemische Anregung: Chemolumineszenz, Biolumineszenz
- Magnetische Anregung: Polarlichter
- Akustische Anregung: Sonolumineszenz
- Mechanische Anregung: Tribolumineszenz

Lichtquellen sind für uns von enormer Bedeutung. Dementsprechend ist der Energieverbrauch, der für Beleuchtungszwecke eingesetzt wird, gigantisch. Zirka 25% der elektrischen Energie wird weltweit für Beleuchtung aufgewendet.¹ Die Effizienz wird dabei in der Regel als *Lichtausbeute* in lm/W angegeben.

¹Es existieren Schätzungen, wonach der weltweite Energieverbrauch um 1,5 PetaWh (10^{15} Wh) reduziert werden könnte, wenn man auf energieeffiziente Beleuchtungsquellen (z.B. LEDs) umsteigen würde.

Als Effizienzen (beim Stand der Technik) einiger typischer Lichtquellen können Sie folgendes annehmen:

Quelle	Effizienz [lm/W]
Monochromatisches Maximum $\lambda = 550 \text{ nm}$	683
Maximum thermischer Strahler	199
Schwefelleuchte	135
Entladungslampe	bis 95
LED (kommerziell)	50
Halogenlampe	15 ... 25
Glühbirne	15
Kerze	0,1

9.1 Thermische Quellen

Thermische Lichtquellen haben für uns traditionell die größte Bedeutung. Die in der Natur vorkommenden Quellen (z.B. Sonne, Blitz, Feuer) sind thermische Quellen. Die Energiezufuhr, die nachfolgend dann zu einer Emission führt, wird per Wärme zugeführt. Trotz der völlig unterschiedlichen thermischen Quellen wird ihr Verhalten doch im wesentlichen durch dieselben Grundgleichungen bestimmt. Diese Gleichungen sollen hier ohne Ableitung² kurz erläutert werden.

Bei thermischen Quellen wird die Energie durch Wärme zugeführt

Strenggenommen gelten die entsprechenden Gesetze für einen sogenannten *schwarzen Strahler*. Einen entsprechenden Strahler kann man sich als ein kleines Loch in einem beheizten Körper denken. Die Unterschiede zu der Abstrahlung anderer beheizter Körper sind aber für unsere Zwecke vernachlässigbar.

Das *Plancksche Strahlungsgesetz* beschreibt die Strahldichte L , also den Strahlungsfluss (Einheit W) einer Einheitsfläche, die in einen bestimmten Raumwinkel emittiert, in Abhängigkeit von der Wellenlänge und der Temperatur des Strahlers:

Abstrahlung thermischer Quellen erfolgt gemäß dem Planckschem Strahlungsgesetz

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \cdot \frac{1}{\Omega_0} \quad (9.1)$$

$\Omega_0 = 1/\text{sr}$ ist dabei lediglich eine Einheitenkonstante, die dafür sorgt, dass in der Gleichung die Einheiten korrekt sind. $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ist die Plancksche Konstante, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit und $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ die *Boltzmann Konstante*. Mit dieser Gleichung ist es somit möglich, die spektrale Abstrahlung zu berechnen, wenn die Temperatur der Quelle bekannt ist.

Oft interessiert man sich nicht für die Abstrahlung in einen bestimmten Raumwinkelbereich bei einer Frequenz, sondern für die gesamte abgestrahlte Leistung. Man kommt durch Integration dann zum *Stefan-Boltzmann-Gesetz*:

$$P(T) = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (9.2)$$

Dabei ist $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ eine Konstante. Man erkennt, dass umso mehr Leistung abgestrahlt wird, je größer die Temperatur ist (vgl. Abb. 9.1.3).

Schließlich ist auch oft von Interesse, in welchem Spektralbereich die Quelle besonders stark abstrahlt. Das Maximum der Abstrahlung lässt sich dabei sehr

²z.B. Haken/Wolf: Atom- und Quantenphysik

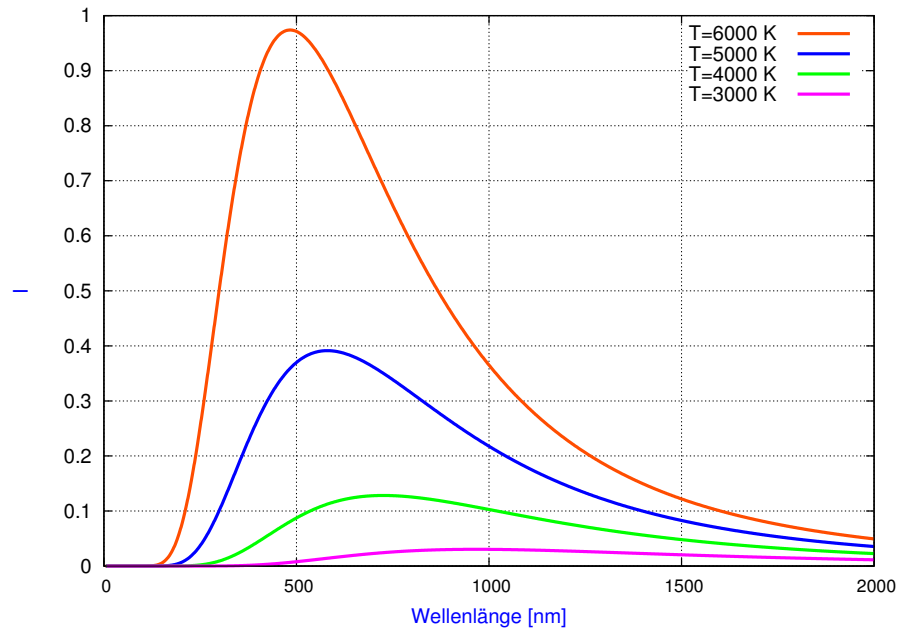


Abbildung 9.1.3: Spektrale Abstrahlcharakteristik einer thermischen Lichtquelle (Plancksches Strahlungsgesetz). Dabei wurden die Einzelkurven nicht zusätzlich normiert (heiße Quellen strahlen mehr Energie ab als kalte Quellen).

Lage des Maximums der Abstrahlung

einfach nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnen:

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{mK} \quad (9.3)$$

Die Sonne emittiert beispielsweise (äußere Sonnenschicht) bei ca. 5800 K. Damit ergibt sich ein Maximum der Abstrahlung für $\lambda = 500 \text{ nm}$. Der oft angestellte Vergleich mit der menschlichen *Augenempfindlichkeit* (Maximum bei 550 nm) ist nicht trivial.³

Für den Farbeindruck beim menschlichen Betrachter ist natürlich nicht nur das Maximum wichtig, sondern der gesamte spektrale Verlauf sowie die spektrale Empfindlichkeit der Sehzellen. Es ergibt sich damit in Abhängigkeit der Temperatur folgender Farbeindruck:

Temperatur [°C]	Farbeindruck
< 500 C	schwarz
500	Rot (kaum sichtbar)
700	Dunkelrot
900	Hellrot
1200	Orange
1500	Gelb
2500	Weiß
> 2500	Blau-weiß

verschiedene Stoffe strahlen bei derselben Temperatur unterschiedliche Leistungen ab

Es sollte noch erwähnt werden, dass verschiedene Stoffe derselben Temperatur zwar dieselbe Abstrahlcharakteristik (Plancksches Gesetz) haben, aber sehr verschiedene Leistungen abstrahlen.⁴ Dabei hängt der Emissionsgrad nicht nur

³Zunächst hat die Absorption in der Atmosphäre einen gewissen Einfluss, andererseits ist aber das Maximum einer Verteilungsfunktion nicht wirklich ausschlaggebend, siehe Soffer und Lynch, Am. Journ. of Phys. 67, 946, 1999.

⁴Viele Strahler sind nicht perfekt „schwarz“, sondern emittieren weniger Leistung. Solche Strahler werden auch als „graue Strahler“ bezeichnet, wenn die Form des Emissionsspektrums weitgehend dem Planckschen Strahlungsgesetz folgt.

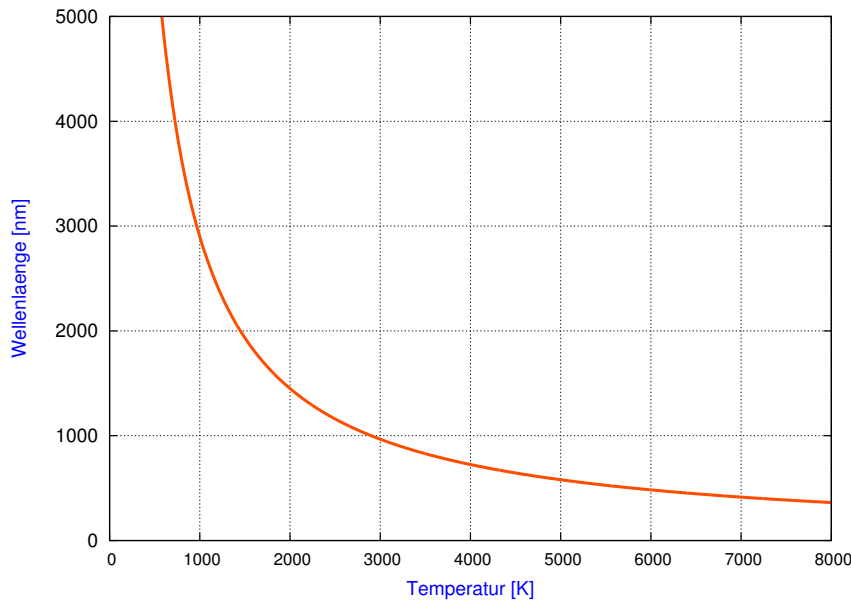


Abbildung 9.1.4: Wiensches Verschiebungsgesetz: Die Kurve zeigt die Wellenlänge mit maximaler Abstrahlung einer thermischen Lichtquelle

vom Material, sondern auch von der Oberflächenbearbeitung ab⁵.

Die Farbtemperatur von üblichen Lichtquellen:

Temperatur [°C]	Farbtemperatur [K]
bedeckter Himmel	6500
direktes Sonnenlicht	5400
Glühbirne	2850
Kerzenflamme	1950

Ohne Zweifel ist die *Sonne* unsere wichtigste Licht- und Energiequelle überhaupt. Pro Sekunde fallen 50 Milliarden kWh Sonnenenergie auf die Erde. Auf einen Quadratmeter der Erdatmosphäre fallen so – wenn der entsprechende Teil bestrahlt wird – 1370 W/m^2 . Durch die Erdatmosphäre wird ein Teil dieser Strahlungsenergie absorbiert, so dass am Erdboden im günstigsten Fall ca. 1000 W/m^2 ankommen.⁶ Diese Leistungsdichte ist für das Leben auf der Erde von großer Bedeutung. Deutlich höhere oder tiefere Werte würden zu Temperaturen führen, bei denen Wasser nicht im flüssigen Aggregatzustand vorliegt.

Im Innern ist die Sonne ca. 15 Millionen Grad heiß, für uns wesentlich ist aber die Abstrahlung über die ca. 5800 K heißen äußeren Schichten der Sonne. Natürlich hängt diese äußere Temperatur mit der durch Fusionsprozesse im Innern der Sonne vorliegenden Temperatur zusammen⁷. Der wesentliche Anregungsmechanismus, der zur Abstrahlung von Licht in den äußeren Schichten der Sonne führt, ist die thermische Anregung.

Für uns sind aber auch andere thermische Quellen von großer Bedeutung. *Kerzen* sind eine moderne Form der Öllampe. Bei der Öllampe wird ein Docht in das Öl gelegt. Der Docht saugt das Öl auf und in der Flamme wird das Öl let-

Sonnenenergie: 50 Milliarden kWh treffen pro Sekunde die Erde

wir sehen nicht das heiße Innere der Sonne

⁵Eine Tabelle einiger Materialien findet man unter <http://www.thermographie-online.com/emissionsgrad.htm>

⁶Erstaunlich ist, dass im Juni pro Tag am Nordpol mehr Energie eingestrahlt wird, als am Äquator. Der Grund hierfür ist natürlich die lange Dauer des Tages am Nordpol.

⁷Für Details siehe z.B. Gerthsen/Kneser/Vogel: Physik



(a) Kerze

(b) Gasverbrennung

Abbildung 9.1.5: Thermische Quellen durch Verbrennung

ztlich erhitzt und verbrannt. Öllampen sind seit mehr als 15.000 Jahren bekannt.

Bei Kerzen wird das Öl praktisch in fester Form verwendet. Mögliche Öllieferanten sind Bienenwachs, das Fett von Meerestieren (Waale, Robben) oder auch künstlich hergestelltes Wachs. Stearin führt zu einer weitgehend rußarmen und geruchsneutralen Flamme und wird aus Palmöl gewonnen.

Das *Stearin* der *Kerze* wird durch die Hitze geschmolzen und wandert im Docht durch Kapillarkräfte nach oben und wird schließlich im heißen Bereich der Flamme verdampft. Im dunklen Bereich der Flamme ist die Luftzufuhr reduziert, so dass hier „lediglich“ Temperaturen von 800 °C bis 1000 °C vorhanden sind. Bei der Verbrennung ergibt sich Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Russ (C) und Wasserstoff:



In den äußeren Bereichen der Flamme (1200°C bis 1400°C) ergeben sich weitere Verbrennungen mit Sauerstoff



Die Kerzenflamme ist dabei eine *Diffusionsflamme* weil der Sauerstoff in den aktiven Verbrennungsbereich lediglich eindiffundiert.

Bei *Gasbrennern* lassen sich höhere Temperaturen erzielen, indem ein Gemisch aus Sauerstoff und Brennstoff verbrannt wird. Eine *Rußbildung* wird so weitgehend vermieden und es ergibt sich – wie am Rand der Kerzenflamme – eine bläuliche Färbung.

Bei der von *Edison* und unabhängig davon von *Swan* entwickelten *Glühbirne* wird ein dünner Draht durch Stromfluss erwärmt. Für den Draht kommen dabei nur Materialien in Frage, die bei hoher Temperatur (ca. 2000 °C bis 3000 °C) nicht sofort verdampfen. *Wolfram* ist hierfür ein sehr geeignetes Material. Um die Lebensdauer in sinnvolle Größenordnungen (ca. 1.000 Stunden) zu bringen, ist die Glühbirne mit inertem Gas (z.B. Stickstoff) gefüllt.⁸

⁸Eine Evakuierung der Glühbirne funktioniert natürlich ebenfalls.

Verbrennung von Stearin

Gasbrenner erzielen eine höhere Temperatur

Glühbirnen sind ebenfalls thermische Strahler

Die im Vergleich zu Sonnenlicht (ca. 6000 K) geringe Temperatur führt zu einem recht „warmen“ Licht. Die *Farbtemperatur* gibt einfach die Temperatur eines Planckschen Strahlers an, der zu einem ähnlichen Spektrum führt. Licht, das von einem Strahler mit einem Spektrum gemäß Planck mit geringerer Temperatur als die Sonne herrührt, wird als „warm“ bezeichnet.

Die *Halogenlampe* funktioniert im Prinzip gleich wie eine herkömmliche Glühbirne. Allerdings werden dem Füllgas Halogene beigemischt. Dadurch wird eine Schwärzung des Glaskolbens verhindert. Sowohl die Lebensdauer (ca. 1,500 bis 2000 Stunden) als auch die Effizienz (ca. 15 bis 25 lm/W) ist gegenüber der Glühbirne (ca. 15 lm/W) besser. Die etwas höhere Temperatur der Glühwendel (ca. 3000 °C) ergibt ein etwas natürlicheres, d.h. näher beim Sonnenlicht liegendes Spektrum. Ein Betrieb mit niedrigen Spannungen ist möglich. Dies kann – je nach Anwendung – Vor- oder Nachteil sein.

Halogenlampen haben gegenüber Glühbirnen eine verlängerte Lebensdauer und eine verbesserte Effizienz

Eine Veränderung der Farbtemperatur (in der Regel zu kälteren Farbtemperaturen) wird oft durch spezielle Reflektorbeschichtungen realisiert. Rote Lichtanteile werden dabei teilweise vom Reflektor der Lampe transmittiert und daher nicht ins zu beleuchtende Gebiet reflektiert.

Bei Bogenlampen werden zwei Elektroden durch ein Gas (z.B. Luft, Xenon) voneinander getrennt. Bei hoher Spannung ergibt sich ein Lichtbogen zwischen den Elektroden. Die ionisierte Luft führt einerseits zur Lichtaussendung, andererseits zu einer hohen Leitfähigkeit zwischen den Elektroden. Neben einem kontinuierlichen Betrieb können die Lampen auch geblitzt eingesetzt werden und erreichen dann extrem hohe Leuchtdichten von bis zu 250.000 candela⁹. Die Farbtemperatur ist hoch (5.000 bis 10.000 K) und es ergibt sich ein einigermaßen kontinuierliches Spektrum. Die Effizienz beträgt bis zu 60 lm/W.

In *Feuerwerkskörpern* wird meist Mangan zu Manganoxid verbrannt. Wenn die Verbrennung sehr schnell erfolgen soll, dann wird eine Oxidation mit Zugabe von Nitraten, Chloraten oder Perchloraten durchgeführt. In jedem Fall ergibt die Verbrennung eine hohe Temperatur und damit eine intensiv weiße Strahlung. Durch Zusatz von verschiedenen Stoffen (oft in Form von *Nitraten*) kann die Farbe verändert werden. So ergibt z.B. eine Beimengung von Natriumnitrat eine Orangefärbung, Kupfernitrat ergibt eine grünbläuliche Farbe. Letztlich sind die aus der analytischen Chemie bekannten *Flammentests* nicht anderes und erlauben anhand der Flammenfärbung einen Rückschluss auf die Substanzen.

Oxidation von Mangan: hohe Temperatur und damit weißes Licht

Farbe wird durch Zusätze (Nitratre) bestimmt

Einweg-Fotoblitze verbrennen *Zirkonium* mit Sauerstoff zu Zirkoniumoxid. Die Verbrennung wird durch elektrische Zündung gestartet. Die Farbtemperatur des Blitzlichtes wird über Bedampfung des transparenten Behälters reguliert.

Einwegblitze oxidieren Zirkonium

Zu *Gewittern* und *Blitzen* kommt es insbesondere im Sommer, wenn durch die starke Sonneneinstrahlung feuchtwarme Luft nach oben steigt und dann kondensiert. In den sich ergebenden Wolken herrschen teilweise starke Aufwinde, so dass kleine Regentropfen nicht gemäß der Gravitation nach unten fallen, sondern nach oben getragen werden und gefrieren. Beim Aufsteig ergibt sich in komplizierter Weise durch Reibungsprozesse eine Ladungstrennung. Insbesondere haben dann die kleinen, nach oben steigenden Teilchen negative Ladung. Die Wolke wird negativ geladen, während der Boden eine positive Spiegelladung aufweist.

Aufstieg von Regentropfen führt zu Ladungstrennung

⁹Candela ist die lichttechnische Einheit für die Leuchtdichte einer Quelle. Eine hohe Leuchtdichte entspricht einer als „hell“ wahrgenommenen Quelle.



Abbildung 9.1.6: Feuerwerkskörper: Verbrennung mit hoher Temperatur und Zusatz von Stoffen (meist Nitrate) zur Generierung von Farbe. Foto mit freundlicher Genehmigung von W. Gorski.

Die Spannungen zwischen Wolke und Erdboden nehmen dabei beträchtliche Werte (bis zu ca. 200.000 V) an. Allerdings reichen diese Spannungen bei weitem nicht aus, um die notwendige Durchbruchfeldstärke in Luft von ca. 2,5 MV/m zu überschreiten. Nach wie vor ist nicht endgültig geklärt, wie die Blitzbildung im Detail abläuft. Eine aktuelle Theorie geht davon aus, dass einzelne, stark beschleunigte Elektronen im elektrischen Feld der Wolke weiter beschleunigt werden und so genügend Energie zur Bildung eines Leitblitzes vorliegt.¹⁰

Zunächst bildet sich letztlich über den langsamen, sogenannten *Leitblitz*, ein ca. 1 m breiter Kanal mit ionisierter Luft. Die Leitfähigkeit in diesem Kanal ist damit sehr hoch, so dass die nachfolgenden *Hauptblitze* sehr schnell (einige 10 μs) den eigentlichen Ladungsausgleich zwischen Wolke und Boden bewirken. Temperatur und Druck steigen dabei auf ca. 30.000 °C bzw. 100 bar. Mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100.000 km/s findet dann die eigentliche Entladung statt. Die hohe Temperatur führt zu einer starken Stoßionisation in der Luft. Die Stoßanregung der Ionen führt wieder zur Anregung von Elektronen, die ihre Energie dann teilweise in Form von sichtbarem Licht abgeben.¹¹ Nur ein Bruchteil der freiwerdenden Energie (ca. 0,1 %) wird dabei in für uns wahrnehmbarer Form als Licht und Schall abgegeben.

Die eigentliche Emission ist blau-weiß. Bei genügender Entfernung der Blitze kann die zwischen den Blitzen und uns liegende Atmosphäre mittels Streuung

¹⁰J. Dwyer, Spektrum der Wissenschaft 11/2005

¹¹Der Hauptanteil des sichtbaren Lichts kommt von Sauerstoff und Stickstoffionen.

aber wieder zu einer Verstärkung des roten Spektralbereichs führen (Rayleigh Streuung). Meist folgen mehrere Hauptblitze mit Abständen von einigen 10 ms hintereinander. Entsprechend scheint der *Blitz* zu flackern.



Abbildung 9.1.7: Blitze, Foto copyright T. Credner und S. Kohle, [www.AlltheSky.de](http://www.allthesky.com/copyright-d.html), <http://www.allthesky.com/copyright-d.html>

Die meisten Blitze finden zwischen Wolken statt. Für uns von besonderer Bedeutung sind aber natürlich die *Erdblitz*, die von einer Wolke bis zur Erde laufen. Man unterscheidet weiter zwischen *Linienblitzen* (ohne Verästelung) und *Flächenblitzen*, bei denen von einem Hauptast fein verzweigte Blitzbahnen abgehen.

Vertikale Blitze sind im Durchschnitt etwa 5 bis 7 km lang. Horizontalblitze sind ebenfalls meist nur einige km lang, können aber auch beträchtliche Distanzen von mehreren 10 km überbrücken. So kann es dann zu dem *Blitz aus heiterem Himmel* kommen, bei dem ein Blitz eines weit entfernten Gewitters einschlägt, ohne dass am Boden vorher Anzeichen eines Gewitters bemerkt werden.

Jede Sekunde schlagen weltweit ca. 100 Blitze ein. Allerdings kommt diese große Anzahl dennoch nicht als relevante Energiequelle in Betracht. Trotz der beeindruckenden Ströme von ca. 10.000 bis 400.000 Ampere und den hohen Spannungen zwischen Wolke und Erdboden können nur in der Größenordnung 25 kWh pro Blitz technisch genutzt werden. Selbst wenn alle Blitze aufgefangen und genutzt werden könnten, würde man so nur auf eine Leistung von ca. 9 GW (6 bis 7 Atomkraftwerke) weltweit kommen.

Wolkenblitze finden zwischen Wolken statt

Blitze sind keine geeignete Energiequelle für die Menschheit

9.2 Lumineszenz

Wenn Licht erzeugt wird, ohne dass Materie erhitzt wird oder brennt, spricht man von *Lumineszenz*. Man unterteilt dabei in die folgenden Lumineszenzarten:

- Elektrolumineszenz (u.a. Entladungslampen („Neonröhren“), LEDs)
- Photolumineszenz (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)
- Chemolumineszenz
- Thermolumineszenz
- Radiolumineszenz
- Sonolumineszenz
- Tribolumineszenz

Thermolumineszenz: Temperatur

Bei der *Thermolumineszenz* kann durch eine Erwärmung die Aussendung von Photonen angeregt werden. Dies darf nicht mit den thermischen Lichtquellen verwechselt werden. Z.B. reicht es aus, einen blauen Fluorit auf ca. 80 °C zu erwärmen, um ein Leuchten zu generieren. Beim Bergkristall ist eine Temperatur von ca. 200 °C erforderlich.

radioaktive Lichterzeugung

Radioaktive Strahlung (α , β oder hochenergetische Photonen) kann durch Lumineszenz in sichtbares Licht gewandelt werden (Abb. 9.2.8). Diese Art der Lichterzeugung kann – aufgrund der meist hohen Halbwertszeiten radioaktiver Stoffe – als *ewiges Licht* verwendet werden (z.B. in *Notbeleuchtungen* oder in *Leuchtzeigern* von Uhren).



Abbildung 9.2.8: Betastrahler mit zusätzlicher Fluoreszenzschicht. Foto mit freundlicher Genehmigung von C. Gommel

Sonolumineszenz: Schall

Bei der *Sonolumineszenz* erfolgt durch Ultraschallanregung einer Flüssigkeit eine Bildung mikroskopischer Blasen, die anschließend extrem schnell kollabieren. Die hohe freiwerdende Leistung führt teilweise zu einer Aussendung von Photonen.

Von *Tribolumineszenz* spricht man, wenn Reibungsenergie (teilweise) zu Licht umgewandelt wird. Dies ist z.B. beim Zerreiben von Zuckerwürfeln oder beim schnellen Öffnen von selbstklebenden Briefumschlägen oder schnellen Abrollen von Klebebändern¹² der Fall. Aber auch das „Funkenschlagen“ von Feuersteinen basiert auf der Umwandlung der mechanischen Energie in Licht.

Tribolumineszenz: Reibung

Eine Tischtennisball große *Schwefel-* oder *Argonkugel* erzeugt bei Bestrahlung mit Mikrowellen eine sehr starke Lichtemission von 135.000 lm. Das emittierte Spektrum ist dabei erfreulicherweise sehr sonnenähnlich und die Gesamteffizienz kann bis zu 135 lm/W erreichen. Die Lebensdauer ist mit bis zu 60.000 Stunden ebenfalls sehr lang. Der Aufwand zur Realisierung einer Lampe ist aber relativ hoch da eine aufwändige Stromversorgung für die Mikrowellen sowie deren Abschirmung getrieben werden muss. Ebenfalls nicht ohne Probleme ist die thermische Belasung. Daher konnten sich diese Lampen bisher nicht wirklich durchsetzen¹³.

Mikrowellenbestrahlung von Schwefel oder Argon ergibt sehr effiziente Lichtemission

Die umgangssprachlich als *Neonröhren* bezeichneten Lichtquellen sind *Leuchtstofflampen* und damit *Entladungslampen*. Ein von Strom durchflossenes Gas (z.B. *Quecksilberdampf*) in einer teilevakuieren Röhre gibt dabei (in der Regel ultraviolette) Strahlung¹⁴ ab, die durch eine fluoreszierende *Leuchtschicht* in sichtbares Licht konvertiert wird¹⁵. Verschiedene Beschichtungen, die zu verschiedenen Spektren führen, sind gebräuchlich und verfügbar. Nur wenn die Lampe rötlich leuchtet, wird dabei Neon als Leuchtgas verwendet. Bei der Verwendung von Argon ergibt sich ein blaugrünes Leuchten, Krypton führt zu Lavendelfärbungen und Xenon leuchtet bläulich.¹⁶ Der Vorläufer der heutigen Entladungslampen war die von W. *Geißler* 1955 entwickelte *Geißlersche Röhre*.

die „Neonröhre“ ist eine Leuchtstofflampe

Damit es zum Stromfluss in der Röhre kommt, werden zunächst Elektronen durch *Glühmission*¹⁷ erzeugt. Die emittierten Elektronen werden zur positiven Gegenelektrode beschleunigt und führen dabei durch Stöße zu Ionen (→ erhöhte Leitfähigkeit) und zur Atomanregung mit nachfolgender Lichtemission. Die Lebensdauer ist gegenüber der Glühbirne um den Faktor 10 (ca. 10.000 bis 50.000 Stunden) besser und die Effizienz ist mit ca. 65 bis 95 lm/W nahezu konkurrenzlos. Durch die Beschichtung lässt sich die Farbe der Lampe variieren. Die Farbtemperatur liegt dabei zwischen ca. 3.000 und 6.000 K.

hohe Effizienz und lange Lebensdauer

Stromsparlampen sind letztlich gewöhnliche Leuchtstofflampen. Lediglich die Röhren selbst sind gebogen um eine geringere Länge der Lampe zu erzielen.¹⁸ Das elektronische Vorschaltgerät für die Zündung ist in der Regel im Sockel der Lampe integriert.

Stromsparlampen sind Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät

Straßenlaternen sind meist ebenfalls Entladungslampen. Die oft gebräuchlichen *Natriumdampflampen* sind sowohl mit Neon als auch mit Natriumdampf gefüllt. Sobald sie gezündet werden, leuchten sie zunächst ca. 15 Minuten lang (rosa-)rot. Grund hierfür ist das *Neon*. Die Zugabe von Neon ist notwendig, da

Natriumdampflampen zur Straßenbeleuchtung: zunächst rosarote, dann gelbe Emission

¹²siehe z.B. Camara et al., Nature 455, S. 1089 (2008)

¹³<http://www.lamptech.co.uk/>

¹⁴Bei Quecksilber vor allem $\lambda=254$ nm.

¹⁵Wenn diese Leuchtschicht beschädigt ist, dann tritt ultraviolettes Licht aus (auch wenn vom Glas selbst einiges absorbiert wird) und es besteht dementsprechend eine Gesundheitsgefahr. Wenn die mit Quecksilber (giftig!) gefüllte Röhre zerplatzt, dann ist das natürlich ebenfalls ungünstig.

¹⁶Durch zusätzliche Fluoreszenzbeschichtungen wird allerdings das Spektrum der Entladungslampe nochmals (teilweise deutlich) geändert.

¹⁷Der hierbei ablaufende Vorgang ist im Detail auch recht verwickelt. Bei alten Röhren wird ein sogenannter „Starter“ benötigt, neuere Röhren werden meist mit einem elektronischen Vorschaltgerät betrieben (bessere Effizienz, kein Flimmern, kein Brummen, längere Lebensdauer).

¹⁸Neben dem rein praktischen Aspekt des geringeren Platzbedarfes ergeben sich dadurch deutlichere Schatten, was für Wohnräume in der Regel angenehmer wirkt.

der Dampfdruck des Natriums bei normalen Temperaturen zu gering ist. Erst die Entladung durch das Neon führt zu einer merklichen Temperaturerhöhung und damit zu einem Anstieg des Natriumdampfdrucks. Das rote Leuchten geht dann in eine gelb–orange Abstrahlung über.

Metaldampflampen benötigen keine Leuchtschicht, *Quecksilberdampf* (mit diversen Zusätzen) unter hohem Druck wird direkt durch eine Bogenentladung zum Leuchten angeregt.

Die Anregung von Elektronen in Atomen kann auch durch Licht erfolgen. Eingestrahlte Photonen führen zu angeregten Energieniveaus. Nach einer gewissen Verweildauer der Elektronen in diesen Niveaus fallen die Elektronen zurück auf ihre Grundniveaus. Dabei werden Photonen abgestrahlt. Unter Umständen erfolgt der Übergang in den Grundzustand (strahlungslos) über Zwischenniveaus, so dass die Energie (und damit die Frequenz) der abgestrahlten Photonen geringer ist als die Energie der anregenden Photonen. Bei einer Einstrahlung mit blauem Licht wird dementsprechend z.B. rotes, grünes oder gelbes Licht abgestrahlt.

Die Unterscheidung zwischen *Fluoreszenz* und *Phosphoreszenz* erfolgt anhand der Zeitdauer zwischen Anregung und Reemission. Bei kurzen Zeiten kleiner 10^{-4} s spricht man von Fluoreszenz. Bei der Phosphoreszenz kann die Dauer der Abstrahlung sehr lange (bis zu mehrere Stunden) sein und findet Anwendung in einer Vielzahl von Spielzeug und Notbeleuchtungen. Phosphoreszenz kann im übrigen nicht nur durch Bestrahlung mit Licht, sondern auch mit Beschuss durch Elektronen (*Kathodolumineszenz*, *Brownsche Röhre* z.B. beim Fernsehgerät) auftreten.

Anregung durch Licht

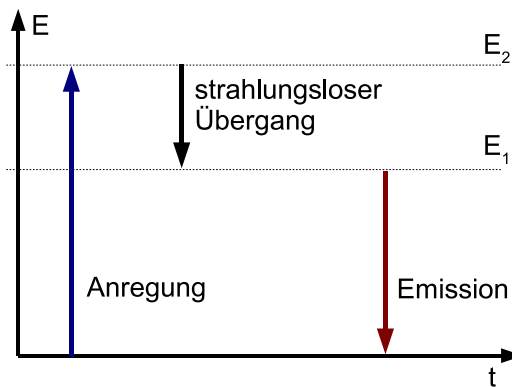


Abbildung 9.2.9: Fluoreszenz: Die Anregung von Elektronen mit energiereichen Photonen führt nach einer gewissen Zeit zu einer Reemission von Photonen mit verringerter Energie und daher längerer Wellenlänge.

Rettungswesten fluoreszieren und sind daher z.B. „gelber als gelb“

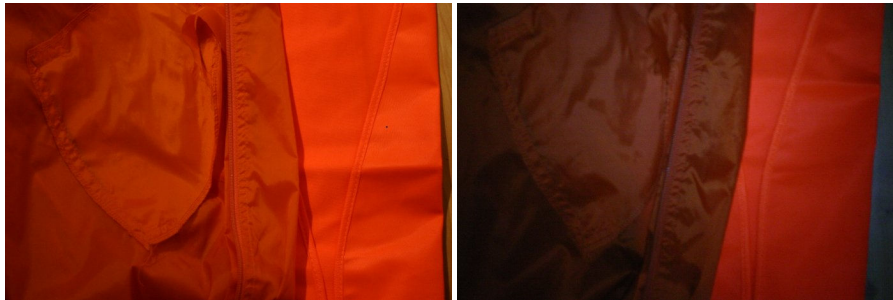
Leuchtfarben, wie man sie z.B. von *Rettungswesten* kennt, erhalten ihre Leuchtkraft durch Fluoreszenz. Kurzwelliges, blaues und ultraviolettes Licht wird z.B. in orangefarbenes Licht (gelb und rot) konvertiert. Damit wird *mehr* Licht im gelb–roten Spektralbereich von der Rettungsweste emittiert als überhaupt im Anregungslicht vorhanden war. Die Weste leuchtet damit deutlich heller orange als eine mit gewöhnlicher orangener Farbe lackierte Fläche¹⁹ (siehe Abb. 9.2.10).

Strahlendes Weiß durch Fluoreszenz

Fluoreszierende Stoffe finden sich auch in den sogenannten *Aufhellern* von *Waschmitteln*. Sie sorgen für strahlendes Weiß, indem ultraviolettes Licht in

¹⁹OPN 6/93, S. 50

weißes Licht konvertiert wird. Viele Stoffe in der Natur (vor allem *Bakterien* und *Mineralien*) fluoreszieren ebenfalls und zum Einsatz kommen fluoreszierende Pigmente auch bei *Sicherheitsanwendungen* (z.B. auf *Geldscheinen*).



(a) Beleuchtung mit Glühbirne

(b) Beleuchtung mit weißer LED

Abbildung 9.2.10: Fluoreszenz am Beispiel einer Sicherheitsweste: Gezeigt ist jeweils eine fluoreszierende Sicherheitsweste (rechts) zusammen mit einem nicht fluoreszierenden Regenmantel. Bei Beleuchtung mit einer Glühbirne wirken beide Materialien annähernd gleich hell. Bei Beleuchtung mit der weißen LED erscheint die Sicherheitsweste deutlich heller. Der deutlich höhere Anteil an kurzwelligem Licht bei der LED führt zu diesem Effekt. Das kurzwellige Licht wird bei der fluoreszierenden Weste in orange-farbenes Licht umgewandelt.

In Kombination mit *Totalreflexion* führt die Fluoreszenz zu hübschen Effekten an transparentem Kunststoff. Enthält der Kunststoff (z.B. Eislöffel, siehe Abb. 9.2.11) fluoreszierende Farbstoffe so wird bei kurzfrequenter Lichteinstrahlung auf den Kunststoff Licht mit längerer Wellenlänge (z.B. Orange) generiert. Dieses Licht entsteht dabei mit einem beliebigen Winkel. Ein nicht geringer Anteil des so produzierten Lichts hat gegenüber den Austrittsflächen des Kunststoffs daher vergleichsweise große Einfallswinkel und wird dementsprechend total reflektiert. Da bei der Totalreflexion kein Lichtverlust auftritt ist das Licht in dem durch die Geometrie festgelegten Kanal genauso gefangen wie in einer Glasfaser und erst am Ende des Kanals, also an der Kante, kann das Licht das Material verlassen. Die Kante leuchtet.

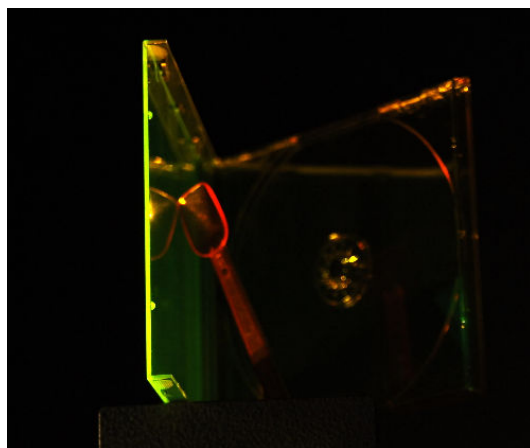


Abbildung 9.2.11: Fluoreszierender Kunststoff in Kombination mit Totalreflexion führt zu hübsch leuchtenden Kanten bei Kunststoffgegenständen.

Bei der *Chemolumineszenz* sorgt eine chemische Reaktion für die Anregung der Elektronen mit nachfolgender Lichtaussendung. Ein typisches Beispiel sind Leuchtstäbe, die zur Absicherung von Unfallstellen oder als Spielzeug verwendet werden.



Abbildung 9.2.12: Chemolumineszenz: Eine chemische Reaktion führt zur Anregung von Elektronen und nachfolgender Lichtaussendung

Chemische Reaktion zweier Stoffe setzt Energie (in Form von Licht) frei

In diesen Stäben sind zwei Chemikalien getrennt. Beim Knicken der Stäbe bricht die Trennstelle zwischen den Chemikalien. Die Chemikalien kommen zusammen und reagieren. Dabei wird Energie frei. Besonders interessant ist, dass praktisch keine Wärme entsteht und die chemische Energie mit hohem Wirkungsgrad in eine Lichtaussendung transformiert wird. Man spricht deshalb teilweise auch von „kaltem Licht“²⁰. Eine Beispielreaktion, die zu Chemolumineszenz führt, ist die Reaktion von *Oxalat* mit einem Aktivator (z.B. Wasserstoffperoxid). Bei der Reaktion wird Licht frei.

Biolumineszenz = Chemolumineszenz von Lebewesen

Wenn die Chemolumineszenz natürlichen Ursprungs ist, d.h. bei Tieren oder Pflanzen vorkommt, spricht man von *Biolumineszenz*. Die Effizienz der dort stattfindenden Energieumwandlungen (Chemisch → Licht) erfolgt mit bis zu 88% Wirkungsgrad (technisch konnte man bisher lediglich 23% erreichen). Nicht nur das *Glühwürmchen* und *Pilze* können per Biolumineszenz leuchten. Fast alle *Tiefseebewohner* (mehr als 90%) nutzen die Leuchtsignale.

Man vermutet als Hauptanwendung die Tarnung. Fische werfen (da sie von oben beleuchtet werden) Schatten. Die dunkle Silhouette der Fische ist von unten schwimmenden Jagdfischen gut zu sehen. Die Fische versuchen daher – so die Vorstellung – durch Eigenbeleuchtung diese dunkle Silhouette zu vermeiden.

²⁰Dies ist nicht zu verwechseln mit der auf das Spektrum einer Lichtquelle bezogenen Bezeichnung „kaltes Licht“. Dort meint „kaltes Licht“, dass das Spektrum besonders stark im kurzwelligen Bereich (blau) ist und die warmen Farbtöne (rot) weniger stark vertreten sind. Erstaunlicherweise ist das bei thermischen Strahlern eigentlich ein Widerspruch zur Realität. Ein hin zu Blau verschobenes Spektrum entspricht einer hohen Temperatur.



Abbildung 9.2.13: Biolumineszenz am Beispiel einer Glühwürmchenart (*Lampyrus noctiluca*), Foto mit freundlicher Genehmigung. Das Bild steht unter der Creative Commons-Lizenz, June 2005, Germany, http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Lampyrus_noctiluca.jpg

Weitere Vorteile beim Einsatz von Biolumineszenz werden im Anlocken von Beute (vor allem Plankton), der Blendung von Angreifern (Ausstoß von biolumineszierendem Material) und der Kommunikation (Partnersuche) gesehen. So sendet beispielsweise jede der rund 2000 Unterarten der Glühwürmchen einen eigenen Blinkcode, der zum Finden des passenden Paarungspartners dient. Der *Drachenfisch* nutzt die Tatsache, dass praktisch alle Tiefseefische Sensoren für blaues Licht besitzen (rot wird ja durch das viele Wasser absorbiert) indem er auch rot biolumineszieren kann. Dadurch kann er dann seine Beute sehen, die Beute selbst sieht aber nichts. Die tiefrote Emission (ca. 700 nm) wird im übrigen — analog den Leuchtstoffröhren — durch blaue Emission und nachfolgende *Fluoreszenz* erzeugt. Technisch wird die Biolumineszenz unter anderem zum Aufspüren von *Fischschwärmen* (leuchtendes Plankton) und *U-Booten* eingesetzt.

9.3 Lichtemittierende Dioden

Das Grundprinzip von *Leuchtdioden* (Lichtemittierende Dioden, LEDs) basiert auf einem pn-Übergang. Es handelt sich bei der LED also um eine Diode, die in Durchlassrichtung betrieben wird. Beim Stromfluss durch die Grenzschicht zwischen n- und p-dotiertem Halbleitermaterial findet eine Rekombination von Elektronen und Löchern statt. Dabei wird Energie frei, die in Form von Licht abgestrahlt wird. Man spricht von *Elektrolumineszenz*.

LEDs haben im Vergleich zu anderen Quellen eine Reihe herausragender Merkmale. Bei geringen Kosten wird eine lange Lebensdauer und eine hohe Robustheit bei guten bis sehr guten Effizienzen erzielt. Zusätzlich benötigen sie nur wenig Bauraum und sind daher gestalterisch sehr gut einsetzbar.

Die Energiekonversion (elektrisch → optisch) findet mit einer Effizienz von

robust, preiswert, lange Lebensdauer, hohe Effizienz, klein



Abbildung 9.3.14: LEDs werden heute in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt.

nahezu 100% statt. Die Gesamteffizienz der LED ist allerdings deutlich geringer und liegt bei ca. 30%. Letztlich ist es schwierig, alle der in der dünnen Grenzschicht (einige Angström bis ca. $1 \mu\text{m}$) generierten Photonen verlustfrei nach außen zu bringen.

Trotzdem ist die Effizienz im Vergleich mit anderen Lichtquellen sehr hoch. Inzwischen lassen sich Effizienzen von bis zu 55 lm/W erzielen. Ebenfalls möglich sind hohe Leistungen von z.B. 200 lm bei 10 W (OSTAR Lighting). Bei vielen LEDs ist ein gepulster Betrieb möglich. Dadurch kann die Leistung im Puls um bis zu den Faktor 10 gesteigert werden.

Die Frequenz der abgestrahlten Photonen wird durch die Bandstruktur der Halbleiter bestimmt und führt zu relativ schmalbandigem (ca. 10 bis 50 nm Halbwertsbreite) Licht²¹. Um zu weißen LEDs zu kommen sind verschiedene Methoden im Einsatz. Am gebräuchlichsten ist die Nutzung einer fluoreszierenden *Konversionsschicht*, die das kurzwellige Licht der LED in ein breitbandiges Fluoreszenzlicht umwandelt. Sehr gebräuchlich (und kostengünstig) ist die Kombination einer blauen LED und einer gelben Konversionsschicht. Es handelt sich also um eine *dichromatische Farbmischung*, Blau + Gelb = Weiß. Ausgewogenere Spektren erhält man durch die Mischung von drei oder vier Spektren. Natürlich lassen sich auch mehrere LEDs mit unterschiedlicher Farbe direkt mischen. Auch dieser Ansatz wird oft eingesetzt. Generell ergibt sich dadurch ein etwas „künstlicheres“ Spektrum (Peaks), aber die Energieeffizienz ist deutlich höher (beim Einsatz von fluoreszierenden Konversionsschichten wird ja ein Teil der Energie der blauen Photonen in Wärme umgewandelt und steht so für die Beleuchtung nicht mehr zur Verfügung). Einzelne LEDs sind vergleichsweise schlecht zur Beleuchtung von Objekten für eine sinnvolle Farbbeurteilung geeignet. Erst eine Kombination von mindestens vier LEDs liefert brauchbare Farbwiedergabewerte²²

²¹Grüne LEDs haben dabei ein vergleichsweise breites Emissionsspektrum.

²²Bezeichnet durch den Farbwiedergabewert R_a , der in diesem Fall größer 90 erreichen kann.

Lichtemittierende Kondensatoren sind dünne *Leuchtfolien* (oft eingesetzt in Anzeigenelementen, Displays), die als Kondensator wirken. Beim Anlegen einer hohen Spannung (100 V) leuchtet das zwischen den „Kondensatorplatten“ eingebrachte Material (z.B. *Zinksulfid* mit Kupfer), es handelt sich also um eine Form der *Elektrolumineszenz*. Die Effizienz ist allerdings sehr gering.

„Leuchtende Kondensatoren“

9.4 Polarlichter

Von der Sonne werden über den sogenannten *Sonnenwind* laufend eine große Anzahl Teilchen in Richtung der Erde getragen. Die Sonne verliert auf diese Weise eine beträchtliche Menge ihrer Masse (1 Million Tonnen pro Sekunde). Die Geschwindigkeit der Teilchen ist vergleichsweise hoch (300 bis 800 km/s). Sobald die geladenen Teilchen (Elektronen und Protonen) auf das Erdmagnetfeld treffen, werden sie abgelenkt (Lorentzkraft). Letztlich spiralen sie auf einer komplexen Bahn nahe der Polarregionen in die Erdatmosphäre und führen dort durch Zusammenstoß mit den Luftmolekülen zu einer Anregung von O_2 und N_2 und damit zu den sogenannten *Polarlichtern* (*Nordlicht*, *Aurora Borealis*).

Grund für Polarlichter:
Geladene Teilchen des Sonnenwinds



Abbildung 9.4.15: Polarlicht. Foto mit freundlicher Genehmigung von Örovar Atli Borgeirsson.

Sauerstoff führt dabei zu grünen und roten Leuchterscheinungen während *Stickstoff* zu eher blau-violettem Leuchten führt. Teilweise sind Polarlichter auch in mittleren und niedrigen geografischen Breiten zu beobachten. Dann allerdings nicht in der spektakulären Form wie in den Polarregionen und meist als rötliche große Flecken. Sogar auf anderen Planeten lassen sich Polarlichter beobachten. So sind Polarlichter sowohl von Jupiter und Saturn als auch von Mars beobachtet worden. Aufgrund der anderen Zusammensetzung der Atmosphären ergibt sich allerdings vor allem eine Strahlung im ultravioletten Spektralbereich.

9.5 Weitere Leuchterscheinungen

Ein faszinierendes Phänomen ist der *Kugelblitz*. Nach wie vor ist unklar, ob es wirklich natürliche Kugelblitze gibt oder nicht. Fest steht, dass es einerseits vergleichsweise viele Berichte über Kugelblitze gibt (2000 in den letzten 300 Jahren), ihre Häufigkeit andererseits aber so gering ist (pro Quadratkilometer eine Kugelblitzbeobachtung alle 600 Jahre), dass Sie wenig Chancen haben, einen Kugelblitz in ihrem Leben zu beobachten und dass eine wissenschaftliche Untersuchung schwierig ist. Wir müssen uns momentan also mit mehr oder weniger ungesicherten Beschreibungen von Zufallsbeobachtungen zufrieden geben und können vor allem nicht sicher sagen, wie glaubwürdig die Beobachtungen an sich sind.

Typischerweise werden die Kugelblitze als leuchtende Kugeln mit Durchmessern zwischen wenigen Zentimetern und ca. einem Meter beschrieben. Alle Farben kommen vor, die Mehrzahl der Beschreibungen nennt allerdings eine rötliche Färbung. Die Dauer der Erscheinung ist kurz (einige Sekunden) und endet entweder lautlos oder mit einem Knall. Die Bewegung der Kugelblitze erfolgt mit einer Geschwindigkeit von wenigen m/s (vor allem in horizontaler Richtung). Teilweise wird berichtet, dass der Kugelblitz durch geschlossene Fenster oder sogar Wände gewandert sei, eine doch eher sehr unwahrscheinliche Behauptung. Forscher am Max Planck Institut für Plasmaphysik haben es aber inzwischen geschafft, leuchtende Plasmakugeln, die den natürlichen Kugelblitzen entsprechen könnten, im Labor herzustellen.²³ Die Details der Physik dieser Plasmoide mit Lebensdauern von bis zu 0,3 s sind allerdings immer noch unklar.

Das *Elmsfeuer* ist ein bläuliches Leuchten an *Kirchturmspitzen*, *Schiffsmasten* oder ähnlichen metallischen Spitzen (Zäune). Es zeigt eine lokale Entladung aufgrund der erhöhten Feldstärke (ca. 30.000 V/cm) an leitenden Spitzen an. Zu dieser Entladung kann es natürlich nur kommen, wenn eine hohe Feldstärke zwischen der Erde und dem Himmel (Wolken) vorliegt. Es wird sehr selten beobachtet. Wenn es aber beobachtet wird, besteht eine hohe Gefahr, dass an der entsprechenden Stelle (oder in unmittelbarer Umgebung) ein *Blitzeinschlag* bevorsteht.

Dies widerspricht in gewissem Sinn der Legende, nach der der Schutzheilige der Seeleute, *St. Elmo*, durch das Leuchten den Seefahrern anzeigt, dass der Sturm nahezu überstanden ist (und daher keine Gefahr mehr droht). In der Tat erfolgt die Elmsfeuerentladung eher, wenn das Wetter aufklart, trotzdem zeigt das Leuchten eine hohe lokale Feldstärke und damit ein Risiko an.

Irrlichter treten (vielleicht²⁴) als kleine (ca. 10 cm), scheinbar ziellos umherwandernde Flämmchen auf moorigem Boden auf. Ihr zielloses Umherwandern, das den Wanderer in die Irre führt, ist für den Namen verantwortlich. Man nimmt an, dass die Ursache für die Flammen in einer Selbstentzündung von aus dem Boden austretenden Gas (Methan in Kombination mit Phosphin) zu sehen ist.

²³<http://www.ipp.mpg.de>

²⁴Ob es nun wirklich Irrlichter gibt oder nicht, ist meines Wissens nach nicht wissenschaftlich gesichert.

Kugelblitze: Ihre Existenz ist ungesichert

Elmsfeuer: lokale Entladung in starken elektrischen Feldern

Irrlichter bei aus dem Boden austretendem Gas



Abbildung 9.5.16: Elmsfeuer als bläuliche Entladung an Spitzen (Schiffsmasten)

Kapitel 10

Auge



Abbildung 10.0.1: Koboldmaki: Das Säugetiere mit dem größten Verhältnis von Augengröße zu Körpermasse, Foto mit freundlicher Genehmigung von Kok Leng Yeo

„Wollte mir jemand ein optisches Gerät mit derartigen Fehlern anbieten, würde ich es in aller Deutlichkeit zurückweisen.“

Hermann von Helmholtz

In Bezug auf die Abbildungsqualität und die Bildfehler des Auges scheint die Aussage von Herrn von Helmholtz richtig zu sein. Andererseits reicht ein kleiner Blick auf die „technischen Daten“ um zu begreifen, was für ein wun-

dervolles Organ das Auge ist:¹

Winkelauflösung	1'
Detektoren	125 Millionen
Geschwindigkeit	50 Hz
Fokus	Autofokus
Spektralbereich	400 - 700 nm
Farbauflösung	1 nm (im gelbgrünen Spektralbereich)
Dynamik	1 : 100.000.000, log. Kennlinie
Empfindlichkeit	70 Photonen
Energieverbrauch	gering
Lebensdauer	ca. 80 Jahre
Sehfeld ²	ca. 180°
Brennweite	22,4 mm
minimale Blendenzahl	2 ... 8

Viele dieser Werte sind umstritten. Dennoch wird bei einem Vergleich mit technischen Systemen sofort klar, dass das Gesamtsystem unwahrscheinlich leistungsfähig ist. Und dabei wird noch nicht einmal das beeindruckendste Leistungsmerkmal unseres Sehsystems, nämlich die Verarbeitung, in Betracht gezogen. Bereits auf der ca. 0,5 mm dicken *Netzhaut (Retina)* werden die ca. 125 Millionen Eingangssignale der Sehzellen (davon ca. 6 Millionen Zapfen) vorverarbeitet und auf ca. 1 Million Signale komprimiert.³ Interessanterweise liegen die eigentlichen lichtempfindlichen Zellen dabei in Lichtrichtung hinter den Nervenzellen.

Die Sehzellen geben dabei ihre Information an jeweils viele (bis zu 1000) Bipolarzellen weiter. Zwischen den Bipolarzellen bestehen weitere Verbindungen und die Bipolarzellen geben ihr Signal an eine weitere Zellschicht, die Ganglienzellen weiter. Auch hier ergibt sich eine schichtinterne weitere Verschaltung. Die entscheidende Verarbeitung erfolgt aber natürlich im Gehirn mit seinen ca. 100 Milliarden Elementarprozessoren (Neuronen). Die Signale beider Augen werden im Chiasma verbunden und dann im visuellen Kortex weiter ausgewertet.

Was das menschliche Gehirn im Bereich der Bildverarbeitung leistet, wird sicher noch lange Zeit technisch in aller Generalität nicht realisierbar sein.⁴ Ein Beispiel zeigt Abb. 10.0.2. Überlegen Sie sich, wie Sie einen Computer programmieren müssten, um eine sinnvolle Deutung der Szene (Anwendungen z.B. autonomes Fahren) zu realisieren.

10.1 Aufbau des Auges

Sowohl die Anzahl der Augen als auch der Aufbau der Augen variiert sehr stark bei unterschiedlichen Lebewesen. Die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit, Auflösung und Lichtempfindlichkeit haben wir bereits angesprochen. Aber auch die Anzahl der Augen varriert massiv vom Einzelauge bis

Auge und Sehsystem haben herausragende Eigenschaften

ca. 125 Millionen Sehzellen und Vorverarbeitung und Komprimierung auf der Netzhaut

Zwei Augen sind nur bei den Wirbeltieren der Standard

¹Dies war im übrigen natürlich auch Herrn von Helmholtz bewusst.

³Dies ist zum einen aus Sicht der schnellen Informationsverarbeitung vorteilhaft, insbesondere wäre es aber auch nicht möglich, einen für schnelle Augenbewegungen ausreichend flexiblen (und damit dünnen) Strang mit 100 Millionen Nervenfasern zu bilden.

⁴In Teilbereichen, z.B. der exakten 3D-Vermessung eines Bauteils, können technische Systeme das menschliche Sehsystem aber durchaus übertreffen.



Abbildung 10.0.2: Einfache (keine Passanten, Kinder, Hunde usw.) Straßenverkehrsszene. Kann ein Computer entscheiden, was zu tun ist?

zu vielen Linsenäugen (Spinnen haben z.B. sechs oder acht Augen, *Skorpione* haben zwischen Null und 12 Augen) bis zu Facettenäugen (z.B. *Fliege*). Im folgenden soll der Aufbau vor allem des *menschlichen* Auges besprochen werden. Hinsichtlich vieler Details unterscheiden sich die Augen im Tierreich natürlich beträchtlich. Es ist aber dennoch erstaunlich, dass der grundsätzliche Aufbau des Auges für Reptilien, Vögel und Säugetiere sehr ähnlich ist. Letztlich haben sich alle Augen in einer vergleichsweise kurzen Periode, der sogenannten kambrischen Explosion, vor ca. 500 Millionen Jahren, gebildet. Unabhängig von diesen komplexen Augen haben natürlich viele niedere Tiere ebenfalls photosensitive Zellen (z.B. beim Blutegel der gesamte Körper) denn die Möglichkeit, Licht und Schatten bzw. Tag und Nacht zu detektieren ist grundsätzlich sicher ein Vorteil.

Der prinzipielle Aufbau eines menschlichen Auges ist vereinfacht in Abb. 10.1.3 gezeigt. Die fokussierende und damit abbildende Wirkung des Auges wird durch zwei Elemente, die *Hornhaut* (*Cornea*, $n=1,376$) und die *Linse* ($n=1,386$ bis $1,406$) erzielt. Die Hauptbrechkraft wird von der Hornhaut⁵ (starker Unterschied des Brechungsindizes zu Luft) erbracht.

Fische haben aufgrund des umgebenden Wassers keinen starken Brechungsindexunterschied zur Hornhaut. Dementsprechend wird dort die Brechkraft fast komplett durch die Linse aufgebracht. Um das Auge dann einigermaßen klein zu halten, müssen Fische Linsen mit starken Krümmungen einsetzen und benötigen also Kugellinsen. Die Aberrationen (sphärische Aberration) dieser Linsen wären bei den geringen Blendenzahlen (Lichtempfindlichkeit) der Fischaugen allerdings immens. Daher wird eine inhomogene Linse mit einem starken Brechungsindexgradient verwendet. Teilweise werden auch mehrere Linsen eingesetzt. Der *Pontella Mediterranea* verwendet ein Triplet (3-Linsen System). Die damit einhergehende hohe Zahl von Freiheitsgraden bei der Optimierung erlaubt so — analog zu technischen Systemen — ebenfalls eine ausreichend gute Bildqualität bei hohen Lichtstärken.

Fische nutzen eine Kugellinse

⁵Die Hornhaut ist der lichtdurchlässige Teil der sogenannten Lederhaut, die vergleichsweise fest und stabil ist und somit das Auge in Form hält.

Die Form der Linse beim Mensch ist über die sogenannten *Ziliarmuskeln*⁶ änderbar, um eine Fokussierung auf unterschiedlich weit entfernte Objekte zu ermöglichen. Hinter der Linse liegt der sogenannte Glaskörper, eine im wesentlichen aus Wasser bestehende Struktur, die die Hauptmasse des Auges ausmacht und dieselbe Brechzahl wie das Kammerwasser hat. Dementsprechend ergibt sich am Übergang des Kammerwassers zum Glaskörper keine Brechung.

Die Brennweite der Linse lässt sich bei jungen Erwachsenen zwischen ca. 53 und 32 mm variieren. Zusammen mit der Cornea ergibt sich beim Menschen für das entspannte Auge eine Gesamtbrennweite von 22,6 mm.

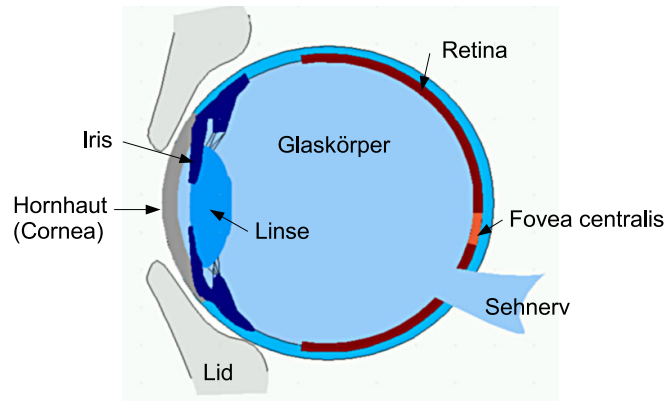


Abbildung 10.1.3: Anatomie des Auges

Das Linsengewebe wird über das *Kammerwasser* ($n=1,336$) des Auges mit Sauerstoff und Glukose versorgt. Die Versorgung innerer Teile der Linse ist deshalb – über die lange Lebensdauer des Auges betrachtet – problematisch. Im Laufe des Lebens sterben immer mehr Zellen im Innern der Linse ab und die Elastizität der Linse wird somit reduziert. Die Fähigkeit zur Fokussierung, die sogenannte *Akkommodation*, nimmt daher ab.⁷ Gegen Ende des vierten Lebensjahrzehnts benötigen daher beinahe alle Menschen eine Korrektur, um nahe Objekte noch korrekt fokussieren zu können. Eine mangelhafte Fokussierung wird in der Regel durch Brillen kompensiert. Konvexe Brillen (Weitsichtigkeit) sind seit Ende des 13. Jahrhunderts bekannt, konkave Brillen (Kurzichtigkeit) wurden erst im 15. Jahrhundert entdeckt.

Durchschnittlich haben Menschen ohne Fehlsichtigkeit einen sogenannten *Visus*, also eine Sehschärfe, von 100%. Kinder sehen in der Regel besser (Visus 125 %) und im Laufe des Lebens nimmt die Sehschärfe kontinuierlich ab. Tagsüber kann man von einer *Winkelauflösung des Auges* von ca. 1 Bogenminute ausgehen. Eine bequeme Beobachtung kann bei ca. 2 bis 4 Bogenminuten erfolgen. Bei schlechten Lichtverhältnissen schaltet das Sehsystem auf die lichtempfindlicheren *Stäbchen* um. Nachts reduziert sich die Auflösung um ca. den Faktor 10 (s.u.). Außergewöhnlich scharfsichtige Beobachter können dann noch ca. 4 Bogenminuten auflösen, während normale Beobachter eine Auflösung von 12 Bogenminuten erzielen.

Die *Netzhaut (Retina)* unterteilt sich beim Sehen in Bereiche unterschiedlicher

⁶Die Muskeln greifen nicht direkt an der Linse an. Der Kraftübertrag erfolgt über die Zonulafasern.

⁷Die Versorgung des Auges per Diffusion macht es im übrigen auch notwendig, dass ab und zu Augenbewegungen stattfinden, um eine ausreichende Vermischung sicherzustellen. Dementsprechend haben die Augenbewegungen im REM Schlaf unter Umständen (auch) den Nutzen einer verbesserten Versorgung vorderer Augabschnitte mit Sauerstoff.

Versorgung des Auges über das Kammerwasser

Kinder haben im Durchschnitt eine bessere Sehschärfe als Erwachsene

Sehzellendichte. Insbesondere gibt es einen Bereich mit erhöhter Sehschärfe, die Fovea centralis (das Zentrum des sogenannten *gelben Flecks*, *Makula lutea*).⁸ Zugunsten der Zapfen ist die Stäbchendichte in diesem Bereich allerdings sehr gering. Dort sind also sehr viele Zapfen, aber nur wenige Stäbchen vorhanden. Entsprechend ist dort die Lichtempfindlichkeit schlecht. Wenn Sie nachts daher auf einen sehr lichtschwachen Stern fokussieren wollen, dann verschwindet der Stern. Bereits 1° vom Zentrum der Fovea centralis entfernt sehen wir nur noch mit einer Sehschärfe von 50%. Bei 5° fällt die Sehschärfe auf unter 25%.⁹ Durch diese stark unterschiedliche Auflösung in der Peripherie und im Zentrum kann der Mensch oder Affe interessierende Objekte mit sehr hoher Auflösung betrachten und gleichzeitig einen sehr großen Winkelbereich mit geringer Auflösung erfassen. Letzteres ist für viele Aufgaben — sowohl vor einer Million Jahre wie auch heute — von zentraler Wichtigkeit für das Überleben. Eine gleichbleibend hohe Auflösung über das gesamte Sehfeld ist aus ökonomischen Gründen unmöglich. Allein die ableitenden Nervenstränge der Augen wären in diesem Fall so dick, dass eine schnelle Bewegung der Augen nicht realisierbar wäre.

Viele Säugetiere haben keine Fovea, sondern eine gleichmäßige Verteilung ihrer Sehzellen. Sie verzichten damit auf eine hohe Detailsicht, die allerdings auch nicht immer wichtig ist. Andere Tiere (vor allem einige Vögel) haben dagegen zwei Foveae, mit denen sie gleichzeitig eine detailreiche Szenenerfassung für einen seitlichen Bereich und einen Frontalbereich erzielen. Einige Tiere (z.B. Hasen) haben entlang einer horizontalen Achse eine erhöhte Sehzellendichte (um Tiere in der Horizontebene zu detektieren).

Die Sehzellenverteilung auf der Netzhaut variiert



Abbildung 10.1.4: Raubvögel erzielen die höchste Auflösung. Die Brennweite des Auges wird dabei durch einen Aufbau analog einem Teleobjektiv verlängert. Foto mit freundlicher Genehmigung von Stuart Richards.

Beim Menschen ist die Fovea noch weiter unterteilt. Ein kleiner (ca. 50×50 Sehzellen) Bereich, die Foveola (*fovea centralis*), hat eine besonders hohe Sehzellendichte. Der Abstand zwischen benachbarten Zapfen beträgt dort lediglich 2

⁸Die menschliche Fovea liegt genau auf der optischen Achse des Auges. Die Position (im Hinblick auf die optische Achse) variiert dabei zwischen unterschiedlichen Personen von einigen Grad bis zu ca. 10° .

⁹S. Ings: *The Eye: A natural history*, Bloomsbury Publishing (2007)

Greifvögel erzielen die höchste Auflösung

μm . Damit ergibt sich eine Auflösung von 70 Linienpaaren / $^\circ$ des Sehwinkels. Kein Säugetier hat eine bessere Auflösung. Der Adler, der die beste Sehschärfe im Tierreich hat, erzielt aufgrund seines langen Auges (36 mm) und vor allem einer Zweilinsen-Konstruktion¹⁰ analog einem Teleobjektiv eine maximale Auflösung von 135 Linienpaaren / $^\circ$. Er sieht also ungefähr „doppelt so scharf“ wie wir.¹¹ Die maximale Kontrastempfindlichkeit des Menschen ergibt sich für ca. 5 Linienpaaren / $^\circ$. Die Kontrastempfindlichkeit hängt aber stark von der Helligkeit ab. Für geringe Helligkeit wird ein vergleichsweise hoher Kontrast notwendig¹², während für große Helligkeiten Kontraste von 1 bis 2 % vom Mensch wahrgenommen werden.

Spezie ¹³	relative Sehschärfe
Mensch	100 %
Adler	200 %
menschl. Baby (6 Monate)	40 %
menschl. Baby (3 Monate)	20 %
Spinnweb	18 %
Katze	14 %
Ratte	1,4 %
Biene	0,7 %
Fruchtfliege	0,14 %
Strudelwurm	0,019 %

Die Ortsauflösung hängt — im Gegensatz zur Winkelauflösung — von Abstand ab

Die in der Tabelle dargestellten Werte beziehen sich auf die Sehwinkelauflösung. Die örtliche Auflösung hängt natürlich auch (linear) vom Abstand des zu betrachtenden Objekts vom Auge ab. Tiere, die hier einen sehr kurzen Abstand zulassen, erzielen so sehr hohe lokale Ortsauflösungen (z.B. 30 μm für Schmetterlinge).

Auch der Kontrast ist wichtig

Beachtet werden muss aber auch, dass diese Art der Auflösung nicht unbedingt das ist, was für ein Tier (oder den Menschen) entscheidend ist. Wichtig ist vielmehr z.B. für einen Adler, kleine Objekte aus großer Entfernung noch mit genügend Kontrast detektieren zu können. So ist dann die maximale Entfernung, bei der ein Adler z.B. eine Maus noch wahrnehmen kann um mehr als den Faktor zwei gegenüber der Mensch vergrößert (Beobachtungen ergeben einen Faktor zwischen drei und acht).

Gradientenindexlinsen sind in der Natur gebräuchlich

Bildfehler (Aberrationen) im Auge werden durch die asphärische Form der Cornea und die inhomogene Brechzahlverteilung in der Augenlinse (Gradienten-Index Linse) für die Fovea vermindert. Wenn Sie leicht fehsichtig sind, normalerweise also eine Sehhilfe benötigen, sollten Sie bei Dunkelheit eine weit entfernte, helle Lichtquelle (z.B. weit entfernte Straßenlaterne oder aber eine kleine LED) ohne die Sehhilfe betrachten. In der Regel wird das (natürlich) unscharfe Bild nicht gleichförmig unscharf sein, sondern eine Art Strahlenfigur bilden. Auch hier liegt die Ursache in (lokalen) Unebenheiten der Hornhaut.

Die Schärfe der Abbildung wird aber nicht nur durch die Fokussierung und die Aberrationen beeinflusst. Auch die Größe der *Pupille*, die den Lichteinfall ändert, ist maßgeblich für ein scharfes Bild verantwortlich. Ein Abblenden der Pupille führt so zu einer Verringerung von Aberrationen und damit zu einem schärferen Bild. Gleichzeitig wird die Tiefenschärfe vergrößert, was insbeson-

¹⁰Snyder und Miller, Telephoto lens system of falconiform eyes, Nature 275, 127 - 129 (1978)

¹¹Damit die Beugung nicht begrenzend wirkt ist der Pupillendurchmesser auch tagsüber bei solchen Raubvögeln größer als beim Mensch (z.B. 6 mm beim Falken).

¹²Rode-deVries Gesetz: Kontrast proportional zu $1/\sqrt{Intens.}$

dere bei nahen Objekten von Bedeutung ist. Die beugungsbedingte Auflösung verschlechtert sich zwar durch Zuziehen der Pupille, der Abstand der Zapfen in der menschlichen Fovea ist allerdings so groß (2 bis 3 μm), dass der Zapfenabstand auch bei viel Licht (kleine Pupille) gerade der beugungsbegrenzten Auflösung entspricht.



Abbildung 10.1.5: Die großen Augen von Springspinnen ermöglichen eine hohe Auflösung. Bild mit freundlicher Genehmigung von Opo Terser.

Bei Insekten mit Facettenaugen ergibt sich durch die Beugungsbegrenzung dagegen zwangsläufig eine deutliche Limitierung, der maximal erzielbaren Auflösung. Die 25 μm Facetten der Biene führen so bei $\lambda = 500 \text{ nm}$ zu einer maximalen Auflösung von 1.1° . Dies entspricht in etwa der Ausdehnung eines kleinen Fingernagels, wenn man den Finger bei ausgestrecktem Arm betrachtet.¹⁴ Große Augen haben also zwei Funktionen. Zum einen die Erzielung einer sinnvollen Auflösung (sehr schön sichtbar bei z.B. *Spingspinnen*, die immerhin eine bessere Auflösung als *Katzen* erreichen) und zum anderen natürlich die Erhöhung der Sensitivität (z.B. Koboldmaki). Insbesondere eine hohe Auflösung lässt sich mit *Facettenaugen* praktisch nicht verwirklichen, einfach weil die Beugungsbegrenzung sehr schnell zu sehr großen Einzelfacetten führt. Das größte Auge im Tierreich hat mit einem Durchmesser von bis zu 40 cm übrigens ein Tiefseekalmar. Das größte Auge eines Wirbeltiers hatte nach Stand der Dinge der Ichtyosaurus (30 cm Durchmesser).

Die Augen von (Tier-)Kindern sind im übrigen bekanntermaßen überproportional groß (z.B. hat ein menschlicher Säugling Augen, die bereits 3/4 der Größe im Erwachsenenalter einnehmen) und daher wirken übergroße Augen vermutlich auf uns „süß“. Grund hierfür ist natürlich die optische Funktion denn so wird sichergestellt, dass die Augen bereits in frühester Kindheit relativ sinnvoll einsatzbereit sind. Allerdings ist das Sehen in den ersten Lebensmonaten beim Menschen stark beschränkt. Die Sehschärfe (Visus ca. 20%) aber auch die Verarbeitung sind massiv beschränkt.¹⁵ Erst mit

¹⁴In Wirklichkeit ist die Auflösung der *Biene* aus rein geometrisch-optischen Gründen nochmals um ca. den Faktor 2 geringer, also ca. 2° .

¹⁵Die Verringerung der Auflösung liegt an einer verringerten Photorezeptordichte, dem verklein-

Facettenaugen können aufgrund der Beugungsbegrenzung keine hohe Winkelauflösung erzielen

Große Augen sind notwendig, wenn eine große Winkelauflösung erzielt werden soll

Große Augen bei Tierkindern um die optische Funktion sicherzustellen.

Die visuelle Wahrnehmung von Säuglingen ist beschränkt.

ca. 4 Jahren ist die Entwicklung des Sehsystems soweit abgeschlossen, dass die gleichen Leistungen, wie die eines (jungen) Erwachsenen erzielt werden. Dennoch können auch nur wenige Wochen alte Babies einfache Sehaufgaben bewältigen. Beispielsweise präferieren sie komplexe Muster gegenüber einfarbigen Flächen. Gesichter können aber z.B. erst mit ca. drei Monaten als solche erkannt werden und Farben werden ab ca. dem vierten Monat so wie bei Erwachsenen differenziert. Ab diesem Alter können die Säuglinge auch einfache Entfernungsbestimmungen mittels binokularem Sehen bewältigen.¹⁶



Abbildung 10.1.6: Schlitzförmige Pupillen treten bei vielen (vor allem nachtaktiven) Tieren auf. Die veränderte Biomechanik führt zur Möglichkeit, stärker abzublenden und hat Vorteile bei Multifokalen Linsen (siehe Text).

Der Pupillendurchmesser variiert beim Mensch zwischen ca. 2 und 8 mm. Dementsprechend kann der Lichteinfall um maximal den Faktor 16 geändert werden. Natürlich wird die Pupille dementsprechend bei schlechten Lichtverhältnissen (nachts) geöffnet, um den Lichteinfall zu vergrößern¹⁷. Dadurch wird ein größerer Bereich der Hornhaut und der Linse für die Abbildung verwendet. Genau wie beim Fotoapparat führt dies zu einer verminderten Abbildungsqualität. Dies kann soweit führen, dass die Nachtsicht extrem schlecht wird (*Nachtblindheit*). Bei älteren Menschen mit ihren zunehmend stärker werdenden Aberrationen ist dieser Effekt besonders stark. Teilweise ist die Hornhaut am Rand so verkrümmt, dass dadurch bei Nacht leichte Doppelbilder gesehen werden.¹⁸ Ein starkes Problem ist aber vor allem auch die Blendwirkung, die mit dem Alter zunimmt und oft so stark wird, dass z.B. ein nächtliches Autofahren zum Risiko wird. Durch die zunehmende Eintrübung der Augenlinse wird das einfallende Licht in der Linse gestreut und damit wird der Kontrast massiv vermindert

erten Augapfel und der noch nicht vollständig abgeschlossenen neuronalen Entwicklung.

¹⁶S. Ings, *The Eye*, Bloomsbury Publishing (2007).

¹⁷Interessanterweise ist die Pupille im Schlaf klein gestellt, obwohl es da ja üblicherweise dunkel ist.

¹⁸Ein Teil der Pupille wird praktisch von einem zusätzlichen Keil (Prisma) bedeckt und das darauf fallende Licht wird entsprechend abgelenkt.

Die Sehschärfe reduziert sich bei sehr schlechten Lichtverhältnissen (nämlich dann, wenn das Farbsehen ausfällt und wir nur noch Schwarz–Weiß sehen) aber vor allem auch dadurch, dass die Zapfen nicht mehr empfindlich genug sind und nur Stäbchen (geringe räumliche Auflösung, hohe Streulichtempfindlichkeit aufgrund eines breiten Empfangswinkelbereichs) zum Einsatz kommen. Bei *Neugeborenen* sind die Zapfen im übrigen praktisch kaum einsatzbereit, so dass kein Farbsehen existiert. Aber auch die Empfindlichkeit der Stäbchen ist im Vergleich zum Erwachsenen auf ca. 10% reduziert. Nach ca. 2 Monaten kann das *Baby* dann eine gewisse — aber noch nicht sonderlich ausgeprägte — Farbtrennung vornehmen. Und nach drei Monaten ist das Farbsehen komplett ausgeprägt.

Das menschliche Auge ist nicht chromatisch korrigiert. Wenn wir auf rote Objekte fokussieren, sind blaue Objekte immerhin um ca. 1 Dioptrin falsch fokussiert. In der Foveola finden sich daher auch kaum blaue Zapfen.¹⁹ Dies fällt uns natürlich nicht auf. Die Farbinformation hinsichtlich „Blau“ wird durch die leichte Augenbewegung, die dafür sorgt, dass der zu beobachtende Bereich eben auch teilweise auf blaue Sehzellen fällt, gewonnen. Trotzdem sehen wir im blauen Spektralbereich deutlich unschärfer als im Grünen. Das Verhältnis von roten zu grünen Zapfen variiert erheblich von Mensch zu Mensch (0,25:1 bis 9:1) ohne dass dies das Farbsehen beeinträchtigen würde. Das Auge ist dabei fähig, sich selbst zu kalibrieren. Wenn Sie mehrere Tage eine Rot–Grün Brille („Stereo–Brille“) verwenden, werden Sie feststellen, dass sich ihr Sehen an die neuen Verhältnisse angepasst hat und Sie mehr oder weniger wieder normal sehen.²⁰

Noch nachteilhafter wird die chromatische Aberration bei voll geöffneter Pupille, also beim Nachtsehen. Viele — vor allem nacht- oder dämmerungsaktive — Tiere haben auch schlitzförmige *Pupillen* (siehe Abb. 10.1.6). Verschiedene Vorteile werden für diese Schlitzpupillen angegeben. So ergibt sich aus rein biomechanischen Gründen wohl, dass eine Ringblende, wie sie beim Mensch vorkommt, nicht beliebig eng zugezogen werden kann während diese Beschränkung für Schlitzpupillen nicht gilt.²¹ Weiterhin haben diese Tiere (z.B. Katzen) eine multifokale Linse, die es erlauben soll, auch bei großer Lichtstärke die chromatischen Aberrationen effektiv zu reduzieren. Eine Schlitzpupille führt in diesem Fall auch beim Abblenden (Schlitz zu) zu einer Nutzung aller Pupillenzonen der Linse und damit zu einem sinnvollen Bild.²²

Die *Pupille* erfüllt eine weitere, wenn auch untergeordnete, Rolle. Sie ist in der Lage, Interesse zu signalisieren. Eine geweitete Pupille deuten wir bei einem *Blickkontakt* als besonderes Interesse. Aus diesem Grund haben vermutlich im Mittelalter spanische Frauen teilweise *Belladonna* (= „schöne Frau“) bzw. das darin enthaltene *Atropin* verwendet, um ihre Pupillen künstlich zu weiten und damit attraktiver zu wirken.

Der *Irismuskel*, der die Pupillenweite regelt (Geschwindigkeit ca. 1/5 s), wird

¹⁹Diese würden nur ein unscharfes Bild liefern und unnötig die Anzahl der roten und grünen Zapfen vermindern.

²⁰Noch schneller gelingt die Anpassung, wenn beide Augen dieselbe Färbung vorgesetzt bekommen (Sonnenbrille mit farbigen Gläsern).

²¹M.F. Land, D.E. Nilsson, „Animal Eyes“, Oxford University Press 2002

²²Natürlich ergibt sich nur eine teilweise Verbesserung, denn das scharfe Bild einer Farbe liegt vor einem defokussierten Hintergrund derselben Farbe und somit wird der Kontrast reduziert. Entsprechend müssen neuronale Hintergrundsubtraktionsmethoden verwendet werden, um dann ein befriedigendes Bild zu erzielen. siehe Journal of Experimental Biology 209, 18-25 (2006).

*Chromatische Aberrationen:
Nur wenige blaue Zapfen im
Bereich des schärfsten Sehens*

*Verhältnis unterschiedlicher
Zapfentypen variiert von
Mensch zu Mensch*

Schlitzpupillen haben biomechanische Vorteile und helfen bei chromatischer Aberration

von derselben Gehirnregion (Hypothalamus) gesteuert, die auch Herzschlag, Verdauung und Blutdruck kontrolliert. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Pupillengröße ebenfalls mit dem mentalen Zustand korreliert ist. Insbesondere ergibt sich bei einer mentalen Belastung eine *Pupillenweitung*.

Neben der chromatischen Längsaberration, die dazu führt, dass ein weißes Punktobjekt bei einer 6 mm großen Pupille immerhin ca. 100 Zapfen auf der Netzhaut anregt, ist auch die sogenannte chromatische Vergrößerungsdifferenz von Belang. Diese führt dazu, dass das blaue Bild eines weißen Objekts auf der Netzhaut leicht kleiner ist als das entsprechende rote Abbild. Auch dieser Effekt wird durch die nachfolgende neuronale Verarbeitung ausgeglichen.

Eine erstaunliche Adaptionsfähigkeit des neuronalen Systems ergibt sich beim Ausgleich von Defokussierungen. Wenn Sie eine Brille benötigen, dann können Sie folgenden Versuch unternehmen: Setzen Sie die Brille ab und achten Sie auf Ihre Sehschärfe. Zunächst ist diese vergleichsweise schlecht. Aber nach kurzer Zeit (Minuten) passt sich die Verarbeitung an und scheinbar wird das Bild besser. Auch dies ist ein rein neuronaler Effekt. Die Qualität der optischen Abbildung ist unverändert.

Die Umrandung der Pupille ist die farbige *Iris* bzw. *Regenbogenhaut* (siehe auch Abschnitt 4.1). Die eigentliche Farbe spielt dabei keine Rolle, wesentlich ist lediglich die lichtundurchlässige Wirkung.²³ Die *Augenlider* schließen sich auch ohne äußere Reizung in regelmäßigen Abständen (normaler Lidschlag, ca. alle 6 Sekunden). Dies ist notwendig, um die Augen immer ausreichend feucht zu halten. Bei Stress und der Erwartung von anstrengenden Arbeiten nimmt die Häufigkeit zu. Bei erhöhter geistiger Anspannung nimmt der *Lidschlag* ab. Entsprechend besteht die Gefahr der Augenaustrocknung.²⁴ Dies ist für Arbeiten wie z.B. technisches Zeichnen oder der Arbeit am Computermonitor²⁵ von Bedeutung. Natürlich dienen die Lider auch zum Schutz gegen eventuell eindringende Fremdkörper.

Entsprechend helfen die *Wimpern*, Staub und kleine Insekten vom Auge fernzuhalten und die *Augenbrauen* leiten Schweiß und Regen vom Auge weg. Die *Tränenflüssigkeit*, die beim Lidschlag über das Auge verteilt wird, hilft trotzdem ins Auge gelangte Fremdkörper auszuspülen, enthält aber auch keimtötende Substanzen und dient damit als Infektionsschutz. Über Sie wird auch die Hornhaut mit Nährstoffen und Sauerstoff versorgt und die Oberfläche der Hornhaut wird glatt und geschmeidig gehalten. Tiere, die konstanter Verschmutzung ausgesetzt sind (z.B. Schlangen im Sand, Fische auf Meeresboden) haben Augenlider, die sich verbunden haben und transparent geworden sind. Viele Tiere nutzen auch sogenannte *Nickhäute*, die praktisch als drittes Lid das Auge vor Verschmutzung schützen können. Sie kommen bei den unterschiedlichsten Tieren zum Einsatz. Oft gefunden werden sie bei Amphibien, Fischen, Reptilien und Vögeln, einige Säugetiere nutzen sie aber genauso. Teilweise sind diese Häute komplett transparent (z.B. Biber) und in anderen Fällen sind sie transluzent oder mehr oder weniger lichtundurchlässig (angeblich beim Eisbär, um diesen vor Schneeblindheit zu schützen).

Wenn Sie bei Dunkelheit eine Lichtquelle betrachten und die Augen zusammenkneifen, sehen Sie zwei helle Linien, die nahezu senkrecht ausgehend von der

²³Bei Albinos fehlt die Pigmentierung komplett, so dass der Lichteinfall ins Auge zu stark ist und daher in der Regel Sonnenbrillen verwendet werden müssen.

²⁴Der Effekt wird zusätzlich aufgrund der verringerten Luftfeuchtigkeit durch Klimaanlage und Heizungen verstärkt

²⁵Eine Untersuchung ergab hier eine Verringerung des Lidschlaghäufigkeit um den Faktor 2.

Farbe der Iris: egal

Lidschlag verhindert Augenaustrocknung

Wimpern und Augenbrauen schützen vor Schweiß, Regen und Fremdkörpern

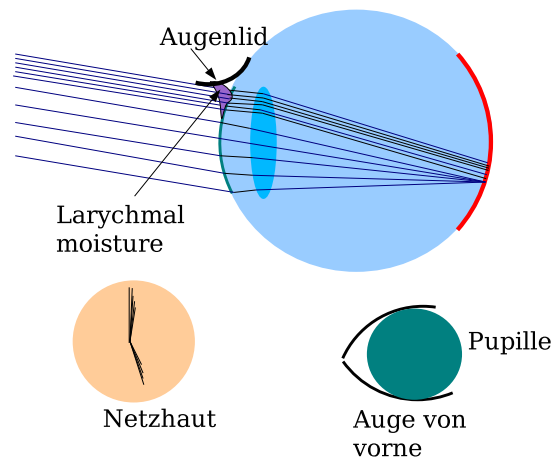


Abbildung 10.1.7: Bei zusammengekniffenen Augen führen punktförmige Lichter (z.B. Straßenlaterne) zu zwei nahezu (aber eben nicht ganz) senkrecht verlaufenden Linien. Die Ursache liegt in der Brechung des Lichts an kleinen Fettbereichen zwischen Auge und Lid.

Lichtquelle nach oben und unten laufen. Zwischen beiden gibt es eine kleine Winkeldifferenz. Die Ursache liegt nicht etwa in der Beugung (Spaltbildung durch die zusammengekniffenen Augen), sondern in der Brechung des Lichts an einer kleinen Fettschicht zwischen Augenlidern und Hornhaut am Rand des Auges (siehe Abb. 10.1.7). Da die Augen nicht perfekt symmetrisch sind, kommt es zu der kleinen Winkeldifferenz zwischen der nach oben und der nach unten laufenden Linie.

Zusammengekniffene Augen

Die Augen lassen sich natürlich willentlich bewegen. Die Ausrichtung sorgt dafür, dass der jeweils interessierende Bereich auf die Fovea, den Bereich der Netzhaut mit der höchsten Sehzellendichte, abgebildet wird. Darüberhinaus bewegen sich unsere Augen, wenn wir uns bewegen, um die Bewegung auszugleichen (*Purkinje Reflex*). Zusätzlich führen die Augen aber auch fortwährend mit bis zu 5 Hz ruckartige Bewegungen (ca. 5 bis 10 Bogenminuten), sogenannte Mikro-*Sakkaden* durch. Und diesen beiden Bewegungen überlagert ist dann noch ein hochfrequentes Zittern. Während der Bewegung der Augen werden die Signale der Netzhaut gehemmt. Wir merken davon allerdings nichts. Unser Gehirn schließt die Lücken durch ein konsistentes Modell (siehe Kapitel 11).

Die Mikro-Bewegung der Augen an sich ist für die Bildgewinnung wesentlich. Wenn man dem Auge eine künstlich nachgeführte Szene vorführt und somit dafür sorgt, dass – trotz Augbewegung – immer dasselbe Bild auf der Netzhaut zum liegen kommt, dann verschwindet die Wahrnehmung der Szene komplett. Wir sehen dann nur noch eine homogene, graue Lichtverteilung. Diverse Tiere (z.B. Tauben und viele Insekten) nutzen für die konstante Bewegung der Szene auf der Retina nicht eine Augenbewegung sondern eine Bewegung des Kopfes bzw. gesamten Körper.²⁶

Die Bewegung der Augen ist wesentlich für den Sehvorgang

Laufend treten abgelöste Retinazellen in das Kammerwasser über. Dies führt zu sogenannten *Floater* (*Muscae Volitantes*), die man bei passender Beleuchtung (homogene helle Fläche betrachten und die Augen bewegen (Blick wandern lassen)) als kleine, sich bewegende Objekte im Bild sehen kann²⁷. Floaters können aber auch durch andere Effekte zustande kommen. Insbesondere

Floaters können das Sehen beeinträchtigen

²⁶Je größer der Körper eines Tieres ist, desto aufwändiger ist diese Strategie natürlich.

²⁷Sollte die Anzahl dieser Störungen plötzlich stark zunehmen (oder von „Blitzen“ begleitet sein), kann dies auf einer Blutung beruhen.

schrumpft mit zunehmendem Alter der *Glaskörper*. Bei der im Glaskörper stattfindenden Depolymerisierung bilden sich kleine, meist längliche dünne Fasern.

10.2 Helligkeitswahrnehmung und Fotometrie

Menschen sind nur in der Lage, einen begrenzten Bereich des elektromagnetischen Spektrums wahrzunehmen. Eine nennenswerte Empfindlichkeit besitzt das menschliche Sehsystem lediglich im Bereich von ca. 400 bis 700 nm. Röntgenlicht, ultraviolettes oder Infrarotlicht wird von uns ebensowenig wahrgenommen wie Radiowellen. Hochfrequente, also kurzwellige Strahlung wird von der Hornhaut und der Linse des Auges absorbiert. Menschen, die infolge einer *Grauen-Star* Operation eine künstliche Linse eingesetzt bekommen haben, sind in der Lage auch ultraviolettes Licht bis ca. 300 nm wahrzunehmen.²⁸

Nur jedes 10. auf das Auge fallende Photon wird letztlich von den Sehzellen im Sinne einer Abbildung absorbiert. Die eigentliche Detektion der Photonen in den Sehzellen ist dabei ein sehr komplexer elektrochemischer Prozess.²⁹

In Abbildung 10.2.8 ist die mittlere Empfindlichkeit eines menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei Tageslicht (photopisches Sehen) aufgetragen. Die maximale Empfindlichkeit liegt bei ca. 550 nm. Bei 470 nm und 650 nm sinkt die Empfindlichkeit auf ca. 10%. Die *spektrale Empfindlichkeit* $V(\lambda)$ ist bei wenig Licht (skoptisches Sehen) deutlich verändert. In diesem Fall werden wir für blaues Licht empfindlicher (*Purkinje-Effekt*), weil dann das Sehen im wesentlichen durch die Stäbchen, die eine andere spektrale Empfindlichkeit als die Zapfen haben, dominiert wird (siehe auch Abschnitt 10.3).

Aus diesem Grund (und der geringen Sehschärfe im blauen Spektralbereich) sollte man für Anzeigeelemente, die bei Dunkelheit gut abgelesen werden sollen (Cockpit), idealerweise den roten Spektralbereich wählen. In diesem Fall wird die Adaption der eher blauempfindlichen Zapfen nicht gestört, d.h. trotz dem bequemen Ablesen der Information, kann die umgebende dunklen Szene noch gut wahrgenommen werden.

Die Helligkeitsanpassung durch die Pupillengröße ist im Vergleich zur Gesamtdynamik des Auges (ca. 1: 100.000.000) von untergeordneter Wirkung. Wichtiger sind die Adaptionsprozesse der Sehzellen selbst. Bei schlechten Lichtverhältnissen kommen praktisch nur noch die Stäbchen zum Einsatz. Weiterhin werden sowohl Stäbchen als auch Zapfen in weiten Grenzen in ihrer Empfindlichkeit geregelt. Dieser Regelvorgang dauert eine gewisse Zeit. Nach 5 bis 10 Minuten in Dunkelheit ergibt sich bei kontinuierlicher Anpassung nochmals eine deutliche Verbesserung und nach 30 Minuten erzielt man die maximale Adaption an die schlechten Lichtverhältnisse. Sowohl der zeitliche, als auch die räumliche Adaption ist ein ausgesprochen komplexer Prozess, der

²⁸Aufgrund der damit verbundenen Bestrahlung der Retina mit ultraviolettem Licht und der damit verbundenen Langzeitfolgen (Degeneration) werden heute künstliche Linsen verwendet, die kein UV-Licht mehr transmittieren. Tiere, mit kurzer Lebenserwartung (z.B. Ratten) nutzen teilweise den ultravioletten Spektralbereich. Die verringerte Lebensdauer der Retina spielt hier keine Rolle.

²⁹Letztlich wird der Sehfärbstoff *Rhodopsin*, eine Kombination eines Vitamin A-Derivats und dem Protein Opsin, durch Lichtabsorption zerlegt. Dabei ergibt sich ein elektrisches Signal. Nach einer gewissen Zeit führen Enzyme zu einer Regeneration des Rhodopsin. Ein Vitamin-A Mangel (nicht genug Karotten) führt so unter Umständen zur Nachtblindheit.

*Empfindlichkeit des Auges:
400 nm bis 700 nm*

Purkinje-Effekt: Nachts sind wir für blaues Licht empfindlicher

Die Empfindlichkeit der Sehzellen kann gesteuert werden

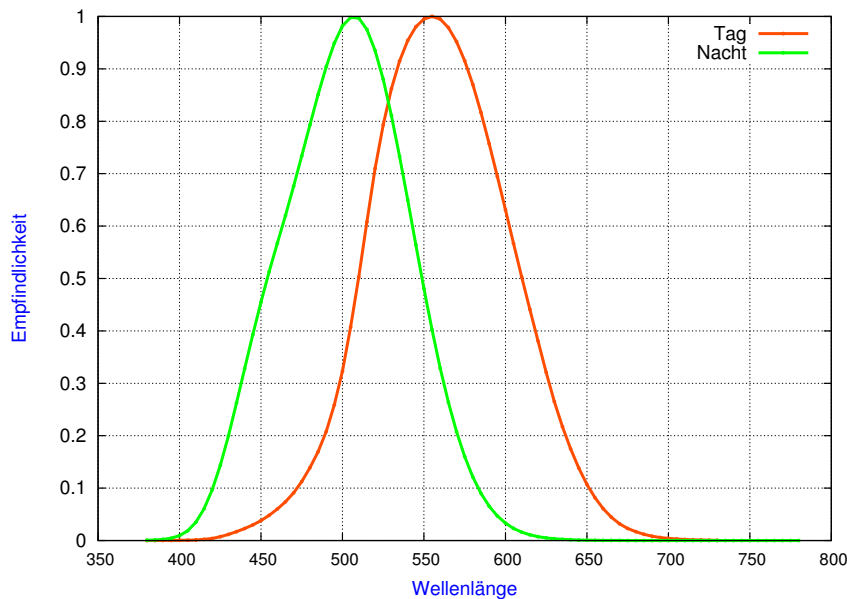


Abbildung 10.2.8: Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Tagsüber liegt die maximale Empfindlichkeit bei ca. 550 nm (gelbgrün), nachts verschiebt sie sich in den blaugrünen Bereich (Purkinje-Effekt). Die Kurven sind jeweils normiert. Nachts ist die Empfindlichkeit natürlich erhöht.

über direkt nachfolgende Zellschichten (Horizontalvernetzung) auch umgebungsabhängig ist. Letztlich sind die Details dieser Verarbeitung noch nicht vollständig geklärt, Modelle bestehen aber.³⁰ Viele tagaktive Tiere (z.B. Tauben) haben nur die wenig lichtempfindlichen Zapfen, während nachtaktive Tiere vor allem Stäbchen nutzen.

Bei vollständiger Dunkelheit ist die Verstärkung der Sehzellen so hoch, dass Rauschen ebenfalls zu Sinneseindrücken führen kann. Wenn Sie also in absoluter Dunkelheit und mit geschlossenen Augen auf Ihre Wahrnehmung achten, können Sie unter Umständen Helligkeitsmuster „sehen“. Man spricht von *Prisoner's cinema*. Helligkeits- oder Farbeffekte (Punkte, Linien, Muster) lassen sich auch bei Druck (bitte nicht zu lang und nicht zu stark) auf die Augen induzieren. In diesem Fall führt die Behinderung der Durchblutung in komplexer Weise zu visuellen Wahrnehmungen.

Neben der erhöhten Grundempfindlichkeit der Stäbchen hilft auch die Integrationszeit (ca. 200 ms) und die Zusammenfassung mehrerer Stäbchen zu einem Gesamtsignal³¹, eine hohe Empfindlichkeit zu erreichen.

Letztlich folgt die absolute Begrenzung der Empfindlichkeit aus der statistischen Natur der Lichtstrahlung und ist stark vom Kontrast der Szene abhängig. Um einen geringen Kontrast, z.B. 1%, wahrnehmen zu können, muss 1% der absorbierten Photonen größer als die statistische Streuung der absorbierten Photonen sein. Die Standardabweichung s_P der Photonenzahl steigt mit der Wurzel der Photonenzahl N . Also $s_P = \sqrt{N}$. Wenn wir eine Integrationszeit von 0,1 Sekunden annehmen, folgt daraus bereits, dass ein Photonenfluss von 100.000 Photonen pro Sekunde vorhanden sein muss, wenn wir als Detektionsschwelle 100 Photonen annehmen. Da nur jedes 10. Photon, das durch die Pupille des menschlichen Auges fällt überhaupt absorbiert wird, muss dieser

Prisoner's cinema: Helligkeitswahrnehmung bei totaler Dunkelheit

Weitere Methode zur Empfindlichkeitssteigerung: Binning

Kontrastempfindlichkeit des Menschen: 1..2 %

Photonenstatistik begrenzt die Empfindlichkeit

³⁰z.B. van Hateren, Journal of Vision 7, 1-19 (2007).

³¹In der Technik wird dies bei Kameras ebenfalls genutzt („Binning“).

Wert noch mit 10 multipliziert werden. Wir benötigen dann also 10^6 Photonen pro Sekunde.

Teilweise wird berichtet, dass unsere Augen so empfindlich sind, dass sie einzelne Photonen detekieren. In gewissem Sinn ist dies korrekt, es darf daraus aber nicht gefolgert werden, dass wir ein einzelnes Photon sehen können. Ein einzelnes Photon kann (muss aber nicht) zwar zu einem Signal eines Stäbchens führen, die Anregung eines einzelnen Stäbchens führt aber nicht zu einer wahrgenommenen Helligkeit. Hierzu müssen mehrere Stäbchen gleichzeitig angeregt werden. Letztlich sind also einige Photonen notwendig, um einen Sinnesindruck auszulösen. Die minimale Beleuchtungsstärke, die auf das Auge fällt, muss bei weit geöffneter Pupille (8 mm) ca. $3,5 \cdot 10^{-9}$ lux betragen. Für eine gelbgrüne LED entspricht dies einer einfallenden Leistung von $7,3 \cdot 10^{-17}$ W bzw. 200 Photonen pro Sekunde. Es soll aber darauf hingewiesen werden, dass die Angaben zur Empfindlichkeit des Auges massiv streuen.

Hinsichtlich der Lichtempfindlichkeit gibt es im Tierreich natürlich deutliche leistungsfähigere Arten als den Mensch. Die Eule hat aufgrund ihrer riesigen Augen eine extreme Empfindlichkeit und kann damit aus 2 km Entfernung noch ein brennendes Streichholz wahrnehmen.³² Die höchste Lichtempfindlichkeit (200-mal besser als der Mensch bei Nacht) wird von einer Tiefseeassel erreicht. Motten haben eine um ca. den Faktor 2 höhere Lichtempfindlichkeit.³³

Die Reaktion auf die einfallende Lichtintensität beim Mensch ist nichtlinear. Der geringste noch wahrnehmbare Helligkeitsunterschied ΔI ist proportional zur Gesamthelligkeit I . Das heißt

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{konstant} \quad (10.1)$$

Dieser Zusammenhang wird *Fechner Gesetz* oder auch *Weber Gesetz* genannt.³⁴ Für das Auge liegt die Konstante im übrigen im Bereich weniger Prozent. Das heißt Kontrastvariationen von z.B. 1 Prozent werden von Ihnen nicht wahrgenommen.

Wenn Sie eine Kerze (ΔI klein) in einem hellen Raum (I groß) anzünden, dann ergibt sich nur ein geringer Effekt, während die Kerze in einem dunklen Raum (I klein) deutliche Wirkung zeigt. Letztlich ist diese logarithmische Kennlinie³⁵ auch der Grund für die Abstufung der Leistung von *Glühbirnen* (25 W, 40 W, 60 W, 100 W, 150 W).

Sehr schön lässt sich das konstante $\Delta I/I$ auch mit einer Sonnenbrille testen: Wenn Sie einen geringen Kontrast (z.B. Wolke am Himmel) betrachten, dann wird sich der scheinbare Kontrast mit Benutzung der Sonnenbrille nicht ändern. Sowohl I als auch ΔI nehmen um den gleichen Faktor ab.

Das Fechner Gesetz ist genauso die Ursache, dass Sie tagsüber keine Sterne (am taghellen Himmel) sehen obwohl die Sterne natürlich weiter da sind und strahlen³⁶ oder auch verantwortlich für den sogenannten *Gardineneffekt*: Bei normaler Beleuchtung tagsüber (außen ist es recht hell — ohne zusätzliche Innenbeleuchtung in jedem Fall heller als innen) sehen Sie kaum bis gar nicht in

Das Sehsystem ist sehr empfindlich.

Weber-Fechner Gesetz: Die Helligkeitsempfindung ist nichtlinear

$$\frac{\Delta I}{I} = \text{konstant}$$

Warum die Kerze im dunklen Raum sehr hell wirkt

Der Kontrast von Wolken ändert sich durch die Sonnenbrille nicht

Tagsüber helfen Gardinen, sich vor störenden Blicken zu schützen. Nachts nicht.

³²Bild der Wissenschaft 6/2002

³³M.F. Land, D.E. Nilsson, „Animal Eyes“, Oxford University Press 2002

³⁴In seiner ursprünglichen Form wurde der Zusammenhang aber bereits 1760 von Bouguer gefunden. Er gilt allgemein für Sinneswahrnehmungen.

³⁵Der Logarithmus ergibt sich durch Integration der Gleichung.

³⁶Verhältnis von Himmel + Stern zu Himmel ist bei Tag gering. Bei Nacht sehen wir dagegen unter günstigen Bedingung 2000 bis 6000 Sterne.

ein mit Gardinen behangenes Zimmer. Das von außen auf die Gardinen fallende Licht wird in ihr Auge gestreut. Dieser Streuanteil ist deutlich größer als das wenige Licht, das an den Gegenständen im Zimmer gestreut den Weg zu ihren Augen findet (vgl. auch Abb. 6.3.21 und Abschnitt 6.3).³⁷

Das Fechner Gesetz gilt dabei nur in Grenzen. Sobald die Helligkeit sehr gering wird, versagt es. Wäre dies nicht der Fall, dann könnten wir auch bei sehr schlechter Beleuchtung noch die bei Tageslicht sichtbaren Details in dunklen Bereichen einer Szene sehen. Dies ist aber offensichtlich nicht der Fall.

Ein weiterer Parameter des Auges hängt im übrigen von der Helligkeit des angebotenen Reizes ab, nämlich unsere Reaktion auf gepulste Strahlung, wie wir sie z.B. bei Betrachtung eines Films oder Displays dargeboten bekommen. Für geringe oder typische Helligkeiten nehmen wir Änderungen mit ca. 50 Hz kaum wahr, während bei sehr hoher Bestrahlungsstärke der Retina durchaus auch Frequenzen nahe 100 Hz von uns detektierbar sind.

Die Reaktion eines lichtempfindlichen Sensors auf ein beliebiges Eingangsspektrum $\Phi_e(\lambda)$ lässt sich einfach als *Überlappintegral* zwischen der normierten spektralen Empfindlichkeit $V(\lambda)$ und dem Eingangsspektrum $\Phi_e(\lambda)$ berechnen:

$$\Phi(\lambda) = K_M \int_0^\infty V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (10.2)$$

Wenn wir als Einheit für das Eingangsspektrum Watt verwenden, dann ergibt sich für das Ergebnis Φ ebenfalls die Einheit Watt, wenn die Empfindlichkeit V als einheitsloser Gewichtungsfaktor betrachtet wird.

Da nun aber die Größe Φ auf das menschliche Sehen bezogen ist, wäre eine solche physikalische Einheit ungünstig. Stattdessen wird eine weitere Einheit eingeführt. Um die Konversion von dieser Einheit *Lumen* (lm) auf Watt durchzuführen benötigt man den *Konversionsfaktor* K_M . Die Einheit dieses Faktors muss dann lm/W sein. Aus historischen Gründen ist der numerische Wert nicht 1 lm/W sondern 683 lm/W.

Auf diese Weise kann sehr einfach zwischen beliebigen *radiometrischen Größen*, die in physikalischen Einheiten gegeben sind, auf *fotometrische Größen* umgerechnet werden. Man unterscheidet also zwischen *Fotometrie*, mit auf das menschliche Sehsystem bezogenen Größen und der *Radiometrie*, in der rein energetische Größen Verwendung finden. Jeweils vier unterschiedliche Größen sind dabei von Belang und finden sich in den technischen Daten von Beleuchtungsquellen (siehe Abb. 10.2.9).

Der *Lichtfluss* entspricht – auf das Auge bezogen – der gesamten Strahlungsleistung. Die *Beleuchtungsstärke* ist der Lichtfluss pro Flächeneinheit. Die *Leuchtdichte* ist der Lichtfluss pro Raumwinkel und Fläche. Er gibt letztlich die subjektiv wahrgenommene Helligkeit einer Licht emittierenden Fläche an. Bei zunehmender Entfernung des Auges von dieser Fläche nimmt der das Auge erreichende Lichtfluss zwar aufgrund der *Energieerhaltung* (*quadratisches Abstandsgesetz*) ab, die Fläche des Bildes auf der Netzhaut nimmt aber ebenfalls quadratisch ab, so dass letztlich die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut konstant bleibt.

Bei geringer Helligkeit versagt das Weber/Fechner Gesetz

von der Fotometrie zur Radiometrie

³⁷Zweimal Streuverluste an der Gardine und zusätzliche Streuung an der Oberfläche der jeweiligen Gegenstände im Zimmer.

Radiometrie	Photometrie	Formel	Einheit Radiom.	Einheit Fotom.
Strahlungsfluss	Lichtfluss	Φ	W	lm
Strahlstärke	Lichtstärke	$I = \Phi / \Omega$	W / sr	lm / sr = cd
Strahldichte	Leuchtdichte	$L = I / A_n$	W / (sr m ²)	cd / m ²
Bestrahlungsstärke	Beleuchtungsstärke	$E = \Phi / A$	W / m ²	lm / m ² = lx

Abbildung 10.2.9: Grundgrößen der Fotometrie

Pulfrich Effekt: Ver-ringerte Helligkeit führt zu Wahrnehmungsverzug

Die Signalstärke eines Lichtreizes hat eine zeitliche Auswirkung. Wenn Sinneszellen mit wenig Licht gereizt werden, dann führt das dazu, dass sie den entsprechenden Reiz etwas verzögert weitergeben. Eine interessante Folge dieses Phänomens ist der *Pulfrich Effekt*: Sorgt man dafür (z.B. mittels eines Sonnenbrillenglasses), dass das eine Auge eine Szene mit geringerer Intensität als das andere Auge sieht, dann ergibt sich bei der Betrachtung bewegter Objekte in (zweidimensionalen) Bildern ein scheinbar dreidimensionaler Effekt.

Anwendung: 3D Fernsehen ...

Ein Objekt, das sich bewegt, wird von einem Auge später detektiert als vom anderen Auge. Dies hat zu Folge, dass zu einem Zeitpunkt t die beiden Augen das Objekt an unterschiedlichen Positionen sehen. Aufgrund der sich damit ergebenden Parallaxe errechnet das Gehirn hieraus eine Tiefeninformation. Das Objekt scheint also entweder näher oder weiter entfernt (je nach Bewegungsrichtung und abgedecktem Auge) zu sein als ein unbewegtes Objekt.

und MS Diagnose

Der Effekt wurde im übrigen nicht von Pulfrich (einäugig!) sondern von F. Fertsch an einem von Pulfrich konstruierten Instrument gefunden. Pulfrich selbst konnte den Effekt also nie sehen. Heute wird der Effekt zur Diagnostik der optischen Neuritis bei Multipler Sklerose genutzt. Bei entsprechenden Patienten ist der 3D-Effekt auch ohne Abdunklung eines Auges vorhanden.

10.3 Farbwahrnehmung

Wenn Sie bei sehr geringem Licht eine Szene betrachten, dann erscheint diese schwarz-weiß („Nachts sind alle Katzen grau.“). Es ist zunächst sehr erstaunlich (obwohl wir uns natürlich daran gewöhnt haben und uns daher nicht mehr wundern), dass ein wenig mehr Licht ausreicht, um aus der Schwarz-Weiß Szene eine farbige Szene zu generieren.

Wenn Sie umgekehrt von viel Licht zu wenig Licht wechseln (also z.B. das Licht ausmachen), dann dauert es vergleichsweise lange (ca. 5 Minuten), bis das Sehsystem die fast volle *Dunkeladaption* durchführt³⁸. Dabei wird nicht nur auf die Stäbchen umgeschaltet, sondern es erfolgt auch eine räumliche Mittelung (Zusammenschaltung von Stäbchen) und eine zeitliche Integration.

Während bei wenig Licht das Sehen durch die Stäbchen erfolgt, können bei einer erhöhten Lichtmenge auch die Zapfen arbeiten. Die Zapfen sind

³⁸Die komplette Anpassung der Stäbchen dauert sogar bis zu einer Stunde.

im wesentlichen in drei unterschiedlichen Ausprägungen vorhanden und reagieren auf unterschiedliche Spektralbereiche unterschiedlich stark (siehe Abb. 3.1.5 und Abschnitt 3.1).

Eine Farbtäuschung, die nicht tief im Sehzentrum (siehe Kapitel 11), sondern im ersten Teil der Lichtwahrnehmung, den Sehzellen, ihre Ursache findet, ist die *Benham Illusion*. Versetzt man die sogenannte *Benham Scheibe* (Abb. 10.3.10) in schnelle Rotation, dann erscheinen scheinbar farbige Ringe. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der unterschiedlichen Reaktion der drei Zapfentypen auf zeitlich modulierte Bestrahlung. Je nach Frequenz und Rhythmus³⁹ der Anregung reagieren die roten, grünen und blauen Zapfen unterschiedlich stark auf die Helligkeit (*Fechner-Farben*).

Unterschiedliche Zapfen zeigen unterschiedliche Reaktion auf gepulste Beleuchtung

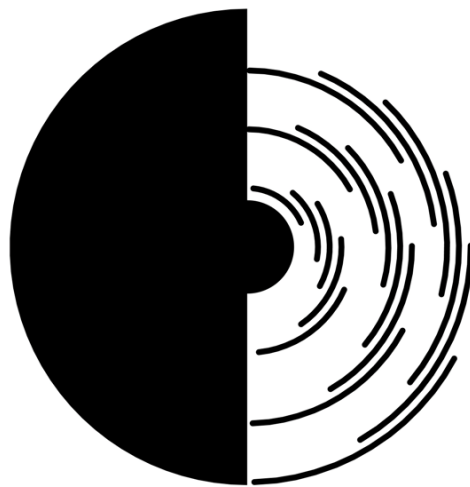


Abbildung 10.3.10: Benham Scheibe: Wird die Scheibe in schnelle Rotation versetzt, so erscheinen farbige Ringe. Grundlage ist die unterschiedliche Reaktion der Zapfentypen auf schnelle Helligkeitswechsel.

Die Frequenz des Helligkeitswechsels hängt aber auf der Benham Scheibe von der radialen Position auf der Scheibe ab. Dementsprechend ergeben sich je nach radialer Position unterschiedlich starke Anregungen der verschiedenen Zapfentypen und daher farbige Ringe.⁴⁰

Der wirklich subjektiv empfundene Farbeindruck wird nicht nur durch die Empfindlichkeit der Zapfen sowie das einfallende Licht festgelegt, sondern hängt aufgrund des sehr komplexen Sehvorgangs (Prozessierung durch Netzhaut und Gehirn) von vielen Faktoren ab.

Farbeindruck hängt von vielen Faktoren ab

Unter anderem hängt unser Farbempfinden auch von unserer *Sprache* ab. In älteren Sprachen gibt es nicht die Vielfalt der Farbbezeichnungen wie wir sie heute gewohnt sind. Aus einer Analyse von 110 antiken Sprachen ergab sich,

Sprache und Farbe

³⁹Insbesondere die Totzeiten zwischen den Einzelreizen variieren mit dem Radius auf der Scheibe.

⁴⁰Es handelt sich hierbei um ein (wie oft bei optischen Täuschungen) stark vereinfachtes Modell der Wahrnehmung. Zum Beispiel ist es für das Phänomen ebenfalls wichtig, dass die Streifen (Abb. 10.3.10) eben dünne Streifen sind und nicht etwa komplette Blöcke darstellen.

dass die menschliche Sprache zunächst nur Worte für „hell“ und „dunkel“ kannte. Als nächste Verfeinerung kam dann ein „warm“ hinzu. Darauf wurde das „warm“ weiter aufgespalten in „Rot“ und „Gelb“ und erst dann gab es eine Aufspaltung von „dunkel“ nach „Blau“ und „Grün“. Wir finden diese Art der Aufspaltung auch in unserer eigenen Farbanschauung. Es ist einfach eine türkis-farbene Farbmischung zu finden, die einige Menschen als eher Blau und andere als eher Grün bezeichnen würden. Andererseits ist eine Rot-Gelb Mischung (Orange) eine eigenständige Farbe und in der Regel wird die Farbe wirklich als Rot, Gelb oder eben Orange wahrgenommen.

Wenn Sie eine helle Lichtquelle betrachten (bitte passen Sie auf, dass die Lichtquelle nicht „zu hell“ ist !) und danach die Augen schließen, werden Sie ein *Nachbild* der Lichtquelle sehen. Die Farben der Nachbilder werden sich dabei im Zeitverlauf ändern.

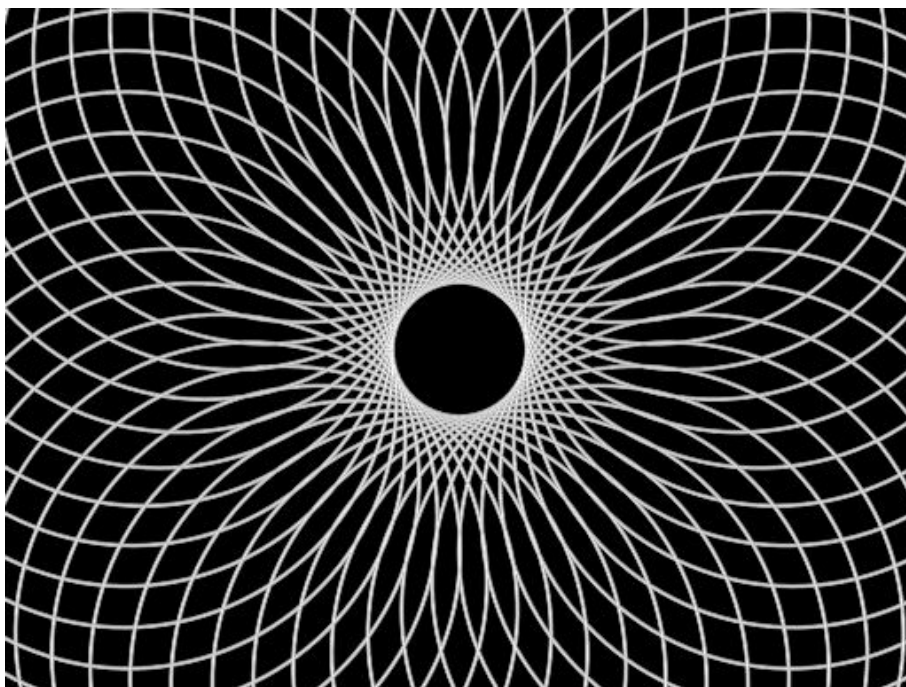
Nachbilder ändern sich im zeitlichen Verlauf

Entsprechend können Sie auch danach eine helle Wand betrachten. Je nach Entfernung der Wand erscheint das Bild der Lichtquelle unterschiedlich groß. Dieser Größeneffekt ist allerdings nur ein sekundärer Effekt. Die eigentliche Größe auf der Netzhaut bleibt konstant, aber ein Objekt ist umso größer, je weiter das Objekt entfernt ist (bei gleichbleibender Bildgröße auf der Netzhaut, vgl. Abschnitt 2.5).

Zunächst gibt es für eine kurze Zeitdauer ein positives Nachbild. Es erfolgt eine Übererregung der Sinneszellen. Die Zellen feuern noch eine gewisse Zeitdauer auch ohne Lichtreiz nach. Dann kehrt sich das Nachbild um. Ursache ist eine Ausbleichung der angeregten Sinneszellen. Dieses negative Nachbild erfolgt in der Komplementärfarbe der Beleuchtungsfarbe da ja nur die entsprechenden Zapfen ausgebleicht sind. Z.B. führt so eine orange-farbene Beleuchtung zu einem blauen Nachbild und eine grüne Beleuchtung zu einem purpurnen Nachbild. Durch die unterschiedliche Regenerationszeit der verschiedenen Zapfen ergibt sich dann eine Änderung der Farbeindrucks mit der Zeit.

Kapitel 11

Visuelle Wahrnehmung



*„Optische Täuschung ist optische Wahrheit“
(Goethe)*

Der Sehvorgang, mit dem wir die Welt wahrnehmen, besteht nicht nur aus der rein optischen Abbildung einer Szene auf die Netzhaut, sondern auch aus der darauf folgenden Detektion durch die Sehzellen und insbesondere die weitere Verarbeitung durch Teile der Netzhaut und natürlich das Gehirn.

Was wir „sehen“ ist also ein komplexes Ergebnis aus physikalischer Welt, Abbildung, Bildaufnahme und (ganz vorrangig) Bildverarbeitung. Optische Täuschungen führen zu (scheinbaren) Fehleinschätzungen der Beurteilung einer Szene. Oftmals sind diese Täuschungen oder Illusionen allerdings keine

Fehlleistungen unseres Sehsystems, sondern eine eigentlich sinnvolle Deutung der uns umgebenden dreidimensionalen Realität. In diesem Sinne ist der Begriff „optische Täuschung“ aus zweierlei Sicht nicht unbedingt sinnvoll, denn zum einen hat das ganze meist wenig mit Optik im herkömmlichen Sinn zu tun und zum anderen liefert das Gehirn meist eine eigentlich korrekte Deutung und nur scheinbar macht das Gehirn einen Fehler.

Eine Unzahl von *optischen Täuschungen* sind bekannt und eine noch viel größere Anzahl von (sich oft widersprechenden) Erklärungen für die einzelnen Phänomene wurden entwickelt. Andererseits gibt es durchaus ungeklärte Phänomene, für die keine wirklich befriedigenden Erklärungen vorhanden sind. In den anderen Fällen werden wir uns im Folgenden auf eine (aus meiner Sicht) einigermaßen überzeugende Erklärung des jeweiligen Phänomens beschränken.

Eine Hinweis zur Betrachtung: Bei einigen hier dargestellten Täuschungen (z.B. Ouchi Illusion) hängt die Stärke des Eindrucks massiv von der genauen Farb/Helligkeitswahl ab. Daher können unterschiedliche Ausdrücke ganz unterschiedlich wirken.

11.1 Wie kommt die Welt in den Kopf?

Um zu verstehen, wie es zu den meisten der sogenannten „optischen Täuschungen“ kommt, muss man verstehen, wie wir die Welt wahrnehmen. Das naive Modell, dass wir die Realität mit der Netzhaut unserer Augen detektieren und dieses Bild dann das Bild ist, das wir „wahrnehmen“, greift viel zu kurz.

Ein Blick auf die Anatomie zeigt uns in diesem Modell bereits ein unlösbares Paradox. Angenommen Sie betrachten die in Abb. 11.1.1 (a) dargestellte Szene. Vernachlässigen wir zunächst, dass die Abbildungsqualität Ihrer Augen nur vergleichsweise mangelhaft ist. Entscheidend ist, dass selbst bei perfekter Optik das in Abb. 11.1.1 (b) dargestellte Bild detektiert wird.

Die lichtempfindlichen Zellen liegen hinter der Ebene der Blutversorgung in der Netzhaut. Daher wird das detektierte Bild an vielen Stellen – nämlich dort, wo Blutgefäße verlaufen – abgeschattet. Zusätzlich ist ein Teil der Netzhaut, der sogenannte *blinde Fleck*, überhaupt nicht lichtempfindlich, da dort die Zuleitung und Ableitung von Blut und Information für die gesamte Netzhaut erfolgt. Normalerweise merken wir von diesem blinden Fleck nichts. Die fehlende Information wird durch das Sehen mit zwei Augen und die Augenbewegungen ergänzt, ohne dass wir dies bemerken.

Das Licht passiert also bevor es die lichtempfindlichen Zellen der Netzhaut trifft die sie versorgenden Blutgefäße. Der Schatten dieser Gefäße fällt immer auf dieselben Stellen der lichtempfindlichen Netzhautschicht. Daher wird dieser Bereich – genau wie der blinde Fleck – beim Sehen ausgeblendet bzw. ersetzt.¹

Wie kommt es, dass Sie nicht ein Bild entsprechend 11.1.1 (b) „sehen“? Das

¹Wenn man nun aber vom Rand des Auges (egal ob rechts, links, oben oder unten) das Auge beleuchtet, dann fällt der Schatten auf einen anderen Bereich der Netzhaut. Damit sieht man dann für kurze Zeit (danach hat sich das Sehsystem wieder an die „Störung“ adaptiert) die Störung als *Purkinje-Baum*.

das detektierte Bild ist stark gestört und unvollständig



(a) Originalszene

(b) Bild auf der Netzhaut

Abbildung 11.1.1: Wie sieht das Auge eine Szene? Viele Bereiche auf der Netzhaut liefern aufgrund von Blutgefäßen kein Signal. Entsprechend ist ein großer Bereich, der blinde Fleck, nicht lichtempfindlich und am Bildrand wird sowohl die Auflösung der optischen Abbildung als auch die Sehzellendichte schlecht. Obwohl das Sensorsignal der Augen also deutlich Lücken aufweist, ist uns dies nicht bewusst.

innere Bild, dass sich in ihrem Gehirn bildet, hängt natürlich von dem ab, was auf Ihre Netzhaut fällt. Es ist aber keine 1:1 Kopie von diesem Bild.

Stattdessen generiert unser Gehirn basierend auf aller ihm zur Verfügung stehenden Information, also auch z.B. dem Gehör, Vorwissen und anderen Sinnen fortlaufend ein Modell der Realität. Dieses Modell der Realität ist für uns die Realität und diese Realität nehmen wir (bewusst) wahr, wenn wir „sehen“. Oder um mit Einstein zu spechen: „Reality is only an illusion, albeit a very persistent one.“

Dieses Modell des Sehprozesses ist in Abb. 11.1.2 dargestellt. Im Laufe dieses Kapitels wird dieses Modell durch eine Vielzahl von Phänomenen erhärtet. Am Endes des Kapitels werden Sie (hoffentlich) davon überzeugt sein, dass das, was Sie (im Sinne von „wahrnehmen“) sehen eben kein objektives Bild der Realität ist, sondern in komplexer Weise aus einem Modell entspringt, das Sie sich von der Wirklichkeit machen.

Natürlich ist dieses Bild nicht völlig willkürlich, sondern steht in enger Korrelation mit der objektiven Realität. Aus dem Modell folgt also nicht, dass wir unseren Augen nicht mehr trauen sollten. Manchmal wird aber ein „falsches“ Modell erstellt und genau dann treten „optische Täuschungen“ auf. Dies ist in der Regel nur dann der Fal, wenn wir dem Sehsystem ein pathologisches oder zumindest sehr unwahrscheinliches Bild liefern.

Betrachten Sie eine beliebige Szene. Schauen Sie also zum Beispiel jetzt einfach von diesem Buch auf und betrachten Sie, was vor Ihnen liegt. Vermeiden Sie dabei, den Blick wandern zu lassen. Nur der Bereich der Szene, der auf die Foveola, das ca. 50 x 50 Bildpunkte große Gebiet der Netzhaut mit hoher Auflösung, abgebildet wird, liefert wirklich ein hochaufgelöstes Abbild der Szene (siehe auch Abb. 2.2.9). Dieser Bereich ist im übrigen (aufgrund der hohen Sehzellendichte) weniger stark von Blutgefäßen durchzogen und erscheint daher bei der Betrachtung z.B. durch den Augenarzt etwas dunkler (vgl. Abb. 2.2.9).

Wir „sehen“ ein Modell der Wirklichkeit

Optische Täuschungen sind falsche Modellbildungen

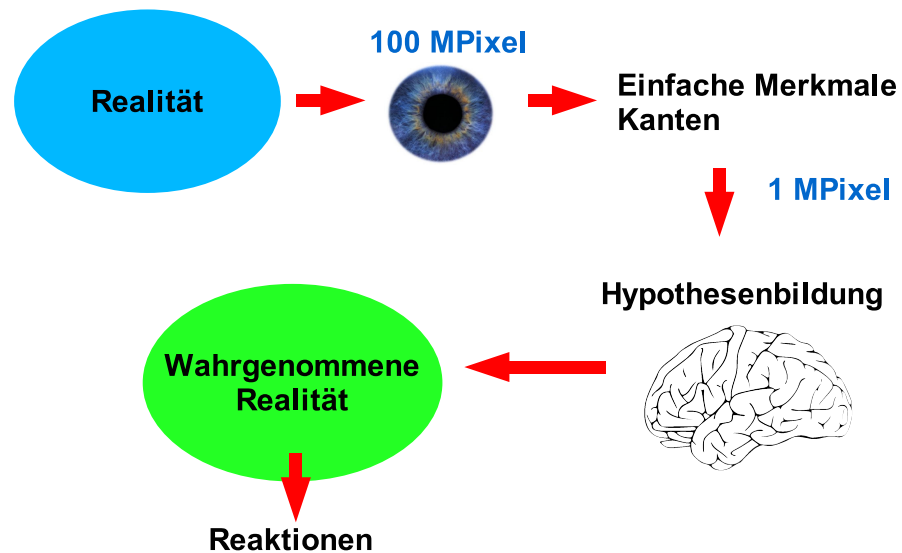


Abbildung 11.1.2: Modell zur optischen Wahrnehmung beim Mensch. „Gesehen“ wird nicht die Szene direkt, sondern ein basierend auf dem optischen Bild generiertes Modell der Szene.

Randbereiche Ihres Gesichtsfelds werden aus verschiedenen Gründen nur sehr mangelhaft abgebildet. Sowohl die optische Qualität der Abbildung in Randbereichen als auch die Sehzellendichte im Randbereich der Netzhaut sind mangelhaft. Außerdem fehlen ja wie bereits besprochen Teile der Szene aufgrund der Abschattung durch Blutgefäße und des blinden Flecks komplett.

Trotzdem haben Sie den Eindruck, die komplette Szene extrem hochaufgelöst zu sehen. Erst wenn Sie sich dazu zwingen, Details am Bildrand zu benennen (z.B. „welcher Typ Auto fährt durch Ihr peripheres Gesichtsfeld“ oder „wieviele Flaschen befinden sich auf dem Tisch am Rand des Gesichtsfeld“), stellen Sie fest, dass Sie solche Details eigentlich nicht wirklich sehen. Sie haben zwar ein Modell des gesamten Raumes erstellt, dieses Modell ist aber unvollständig bzw. ungenau solange Sie mit ihrer fovea centralis nicht wirklich den ganzen Raum abgetastet haben.

Bevor wir viele weitere Beispiele für diese Modellbildung besprechen (ich werde dabei nicht laufend auf die Modellbildung hinweisen), soll noch etwas auf die Repräsentation im Gehirn eingegangen werden: Wenn Sie einen Tisch sehen, werden letztlich Gruppen von Neuronen so angeregt, dass Sie den Tisch wahrnehmen. Sie können sich das Ganze so vorstellen, dass die Gruppe von Neuronen, die für den Begriff „Tisch“ steht, aktiv wird.² Die große Frage ist natürlich, wie von der Detektion auf tiefer Ebene letztlich bis zur hohen Ebene die Information im Gehirn prozessiert wird. Die Details sind leider nicht bekannt. Wenn sie es wären, dann wäre man in der glücklichen Lage ein entsprechendes technisches System zu konstruieren, das genauso gut wie ein Mensch Tische detektieren kann. Hiervon sind wir allerdings noch weit entfernt.

Klar ist, dass sehr frühzeitig in der Verarbeitungskette *Kanten* detektiert werden. Basierend auf diesen Kanten werden u.a. die Orientierungen von Objekten detektiert. Entsprechend sind auf höherer Ebene auch Detektoren für andere elementare Merkmale vorhanden. Beim Menschen wird besonders viel Kapazität

Wie sieht ein Tisch aus?

Details des Sehprozesses sind noch nicht aufgeklärt

Kantendetektion ist wichtig

Erkennung von Gesichtern ist wichtig

²Obwohl es sehr fraglich/umstritten ist, ob diese Repräsentation so simpel ist

auf das Erkennen von (menschlichen) *Gesichtern* verwendet. Wir sind in der Lage, Gesichter ohne Probleme zu erkennen bzw. zu unterscheiden. Andererseits können wir Katzen z.B. nur unzureichend anhand ihrer Gesichter unterscheiden. Offensichtlich werden ganz spezielle Merkmale des menschlichen Gesichts sehr exakt ausgewertet. Dies ist keine einfache Aufgabe, denn das Gesicht ist natürlich hochgradig variabel (Emotionen, Bartwuchs, Grimassen, nur teilweise sichtbar, Brillen usw.) und es wird unter variabler Orientierung und in variabler Größe (je nach Entfernung) gesehen.³ Für die Detektion von Gesichtern sind inzwischen spezialisierte Gebiete im Gehirn identifiziert.⁴ Patienten, bei denen diese Gebiete geschädigt sind, sind nicht mehr in der Lage, Gesichter zu erkennen.



(a) Mund und Augen sind korrekt orientiert, der Rest vom Gesicht ist gespiegelt.

(b) Mund und Augenpartie sind gespiegelt.

Abbildung 11.1.3: Thompson Effekt: Wenn bei einem Porträt Augen und Mund vertikal gespiegelt werden, ergibt sich ein sehr unmenschlicher Anblick (Abb. b). Wenn dagegen dieses Bild als ganzes noch „auf den Kopf gestellt“, also vertikal gespiegelt wird, fällt diese Unmenschlichkeit kaum noch auf (Abb. a). In diesem Fall sind Augen und Mund – als die mit Abstand für die Erkennung wichtigsten Elemente des Gesichts – wieder korrekt orientiert.

Ein Beispiel ist der *Thomson Effekt*. Dreht man das Bild eines Gesichts um 180° und rotiert Augen und Mund wieder in die ursprüngliche Position, so sieht das Bild für uns nach wie vor wie ein gewöhnliches menschliches Gesicht aus. Betrachtet man dieses Bild aber auf dem Kopf stehend, so ist der Eindruck ein ganz anderer. In diesem Fall scheint das Gesicht stark entstellt und wirkt unnatürlich und unattraktiv.

Bei der Betrachtung von Augen ist für den Menschen auch die Analyse der Blickrichtung seines Gegenübers von besonderer Bedeutung.⁵ Hierzu sind Menschen ausgesprochen gut in der Lage. Im Gegensatz zu den meisten Tieren ist die Blickrichtung deutlich aufgrund der weißen Umgebung der Iris, der *Sklera*, sichtbar. *Pupille* und Iris zeichnen sich deutlich ab. Sind sie symmetrisch von weiß umgeben, dann ist der Blick nach vorne gerichtet. Bei unsymmetrischer Form wird in die entsprechende Richtung geschaut. Auch hierfür stehen uns

Thompson Effekt: Augen und Mund sind wichtig

Die Pupillen werden ebenfalls analysiert.

³ Auch hier zeigt sich die extreme Überlegenheit des menschlichen Sehens gegenüber dem Sehen technischer Systeme (beim aktuellen Stand der Technik).

⁴ Neuron 44, S. 889

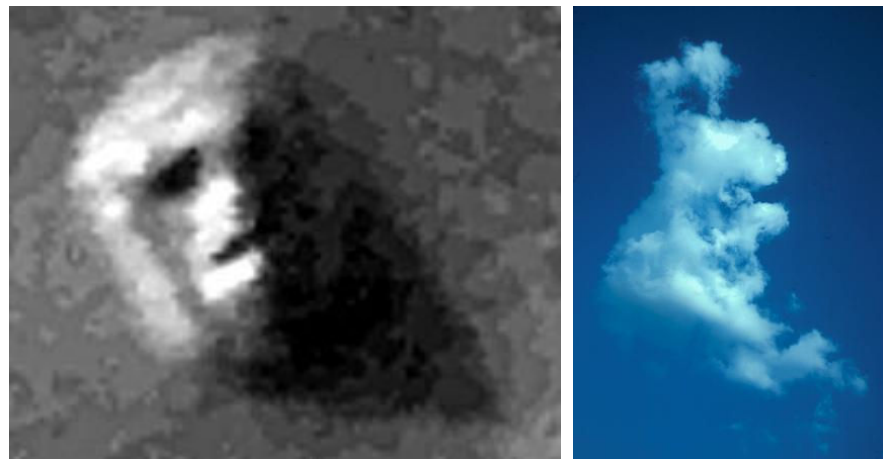
⁵ z.B. M. Mason et al., Psychological Science, 3/2005

spezielle Merkmalsdetektoren zu Verfügung und Tests an *Neugeborenen* legen nahe, dass diese Merkmalsdetektion bereits bei der Geburt fest verdrahtet zur Verfügung steht und damit wohl genetisch bedingt ist⁶. Invertiert man die Augenhelligkeit, ergibt sich ein sehr „unmenschlicher“ Anblick (Abb. 11.1.4). Eine (flächenmäßig) sehr geringe Bildänderung führt also zu einem extremen Effekt in der Deutung des Bildes. Im übrigen ist bei den meisten Tieren die Sklera *nicht* weiß und dementsprechend wirken Augen ohne weiße Sklera vermutlich ebenfalls sehr unmenschlich. Dadurch schaffen es diese Tiere, dass ein Feind nicht Ihre Blickrichtung detektieren kann. Für soziale Wesen, wie den Mensch ist die Blickrichtung aber ein wichtiger Kommunikationsparameter. Die Pupillen sind nicht nur zur Detektion der Blickrichtung wichtig, aus ihrer Größe und Position lassen sich auch direkt Emotionen ableiten.



Abbildung 11.1.4: Eine Pupilleninvertierung ergibt einen „unmenschlichen“ Anblick

Weil wir besonders viele Detektoren für die Erkennung von Menschen und insbesondere von Gesichtern bzw. Gesichtsteilen entwickelt haben, sehen wir teilweise auch Menschen oder Gesichter, wo objektiv betrachtet keine vorhanden sind. Ein vergleichsweise geringer Reiz reicht aus, um die entsprechenden Detektoren anzusprechen.



(a) Marsgesicht, Foto: NASA (1976)

(b) Wolkenhase, Foto mit freundlicher Genehmigung von Richard Carlson, <http://www.pals.iastate.edu/carlson/>

Abbildung 11.1.5: Wir erkennen überall Muster

⁶siehe Teresa Farroni, <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.7073/pnas.152159999>

Ein besonders beeindruckendes Beispiel dieses Effekts ist in Abb. 11.1.5 gezeigt. Diese Höhenformation auf dem Mars wurde 1976 von der Viking-sonde aufgenommen und zeigt bei geeigneter Beleuchtung wirklich sehr viel Ähnlichkeit mit einem menschlichen Gesicht. Ein anderes Lebewesen, das nicht auf menschliche Gesichter geeicht ist, würde die Ähnlichkeit deutlicher weniger stark beurteilen.

Wir sehen aber nicht nur Gesichter in scheinbar zufälligen (gesprenkelte Kachelböden) oder geordneten Strukturen, sondern auch andere Objekte. Es genügt, sich Wolkenformationen anzusehen, um allerlei Objekte zu sehen. Auch hier werden Musterdetektoren, die wir im Laufe unseres Lebens entwickelt haben⁷, angesprochen. Das Gehirn sucht bei der Betrachtung einer Szene nach sinnvollem Inhalt. Dabei werden Detektoren für unterschiedliche Objekte (z.B. „Hase“, Abb. 11.1.5) angesprochen und führen dann zu einer entsprechenden Wahrnehmung. Wenn die Phantasie allzu extreme Ausmaße annimmt und Personen praktisch überall solche Muster sehen, spricht man von *Pareidolia*. Viele „mysteriöse“ Erscheinungen oder „Zeichen Gottes“ lassen sich auf diese Weise ganz zwanglos erklären.⁸



Abbildung 11.1.6: Eine Hohlmaske erscheint wie ein übliches Gesicht, also nach außen gewölbt. Die Erfahrung, dass Gesichter konvexe Gebilde sind überwiegt der binokularen „Messung“. Foto mit freundlicher Genehmigung von Dr. Klaus Wiebel, <http://www.ph-freiburg.de/miniphaenomena/>

Am Beispiel der *Hohlmaske* sieht man, was passiert, wenn unterschiedliche Informationskanäle eine unterschiedliche Beurteilung der Szene liefern. Das binokulare 3D-Sehen sagt uns bei der Betrachtung der Hohlmaske, dass es sich um ein konkaves Objekt, eben um eine Hohlmaske, handelt. Gleichzeitig sagt uns unsere Erfahrung – und auch diese kann als Informationskanal aufgefasst werden – dass Gesichter konvexe dreidimensionale Objekte sind. Dieser Erfahrungswert ist so stark, dass die binokulare 3D-Messung überstimmt wird und wir die Hohlmaske als konvex, also nicht konkav, wahrnehmen.

Dies macht Sinn. Grundlage der Modellbildung in unserem Kopf ist es, jeweils das *wahrscheinlichste* Modell der Wirklichkeit zu generieren. Da wir

Nicht nur das binokulare Sehen führt zur dreidimensionalen Beurteilung

⁷bzw. Detektoren, die fest verdrahtet bereits in unseren Erbanlagen vorhanden sind

⁸z.B. <http://www.ibiblio.org/pub/electronic-publications/stay-free/5/jesus.html>

täglich Hunderte von konvexen Gesichtern sehen und die Betrachtung einer Hohlmaske ein extrem seltenes Ereignis darstellt, ist in der Tat die Deutung als konvexes Objekt sinnvoll.

Entfernungen werden im wesentlichen nicht nur über die Binokularität, also das Stereosehen, bestimmt. Insbesondere für weit entfernte Objekte nimmt die Genauigkeit dieses Verfahrens stark ab, so dass hier andere Erfahrungswerte zum Tragen kommen. Der wichtigste Anhaltspunkt für die Entfernung ist sicher die Bildgröße. (Dazu muss selbstverständlich die Größe des Originalobjekts bekannt sein.) Grundlage ist die Perspektive, respektive der Bahngleisefekt (siehe Abschnitt 2.5). Wenn ein Objekt weit entfernt ist, dann erscheint es klein.

Dies ist die Grundlage der *Größentäuschung* im sogenannten *Ames Raum*. Der Raum wird so gestaltet, dass man bei Betrachtung des Raumes aus einer Richtung mit *einem* Auge zu dem Schluss kommt, dass zwei Objekte in derselben Entfernung stehen, obwohl beide Objekte in unterschiedlicher Tiefe stehen (siehe Abb. 11.1.7). In Wirklichkeit differieren die Entfernungen der beiden Objekte zum Beobachter aber deutlich und dementsprechend werden die beiden an sich gleich großen Objekte als deutlich unterschiedlich groß wahrgenommen. Das scheinbar weit entfernte Objekt ist scheinbar deutlich größer als das scheinbar nahe Objekt. Wieder wird die Erfahrung des menschlichen Betrachters genutzt. Wir sind mit typischen Räumen (fast alle sind rechtwinklig) sehr gut vertraut. Entsprechend ist es einfach, einen sehr ungewöhnlichen Raum zu generieren, der aus einer ganz speziellen Richtung (im zweidimensionalen Bild) wie ein gewöhnlicher Raum wirkt, aber eine gänzlich andere Geometrie aufweist.

Mondillusion: Mond scheint nahe des Horizonts stark vergrößert

Die Größenillusion ist ebenfalls für die berühmte *Mondillusion* verantwortlich: Der Mond erscheint uns, wenn er am Horizont steht, deutlich (in etwa um den Faktor zwei) größer als wenn er am Zenit steht. Beidesmal ist die Entfernung zum Mond aber nahezu gleich.⁹

Die *scheinbare* Entfernung zum Mond ist dann besonders groß, wenn der Mond am Horizont steht. Viele Erklärungen wurden für die bereits seit dem 7. Jahrhundert vor Christus bekannte Illusion im Laufe der Zeit gegeben.

Eine sinnvolle Erklärung ist die scheinbare Form der Himmelskuppel, auf der der Mond läuft. Sie ist scheinbar eine Schale (Abb. 11.1.8), d.h. der Horizont ist deutlich weiter entfernt als der Zenit. Dies ist nicht weiter verwunderlich, denn immer wenn Wolken vorhanden sind, dann ist das wirklich so. Die Höhe der Wolken wird als Höhe der Himmelskuppel gedeutet.

Weitere Mondillusionen

Es gibt noch weitere Mondillusionen, die die Bewegung des Mondes betreffen. Zum einen scheint der Mond sich manchmal zu bewegen, wenn sich die Wolken deutlich bewegen. Es entspricht unserer Erfahrung, dass sich große Objekte weniger bewegen als kleine Objekte. Der Mond ist (scheinbar) klein gegenüber den Wolken. Die Relativbewegung zwischen Mond und Wolken wird also als eine Bewegung des kleineren Objekts (Mond) gedeutet.

Eine scheinbare Mondbewegung kann aber auch durch eine Eigenbewegung des Beobachters erreicht werden. In diesem Fall bewegt sich die Position des Mondes anders als die Position naher Objekte. Der Mond ist zwar sehr weit

⁹Die Entfernung zum Mond wird sogar noch etwas größer (um einen halben Erdradius), wenn der Mond am Horizont steht. Der Effekt müsste, wenn er mit der objektiven Entfernung zusammenhängen würde, also gerade in die entgegengesetzte Richtung verlaufen.



(a) Position 1



(b) Position 2

Abbildung 11.1.7: Ames Raum, Fotos mit freundlicher Genehmigung von Lars Seifert

entfernt, aber scheinbar befindet er sich in einer Entfernung von wenigen hundert Metern oder einigen Kilometern.

11.2 Mehrdeutigkeit

Auf der Netzhaut unserer Augen ergibt sich ein zweidimensionales Abbild der dreidimensionalen Realität. Für das Gehirn stellt sich nun die schwierige Aufgabe, aus dieser zweidimensionalen Projektion auf die dreidimensionale Realität rückzuschließen. Da prinzipiell viele (eigentlich unendlich viele) dreidimensionale Realitäten dieselbe zweidimensionale Projektion ergeben (siehe z.B. Abb. 11.2.9), handelt es sich um ein prinzipiell nicht ideal lösbares inverses Problem.

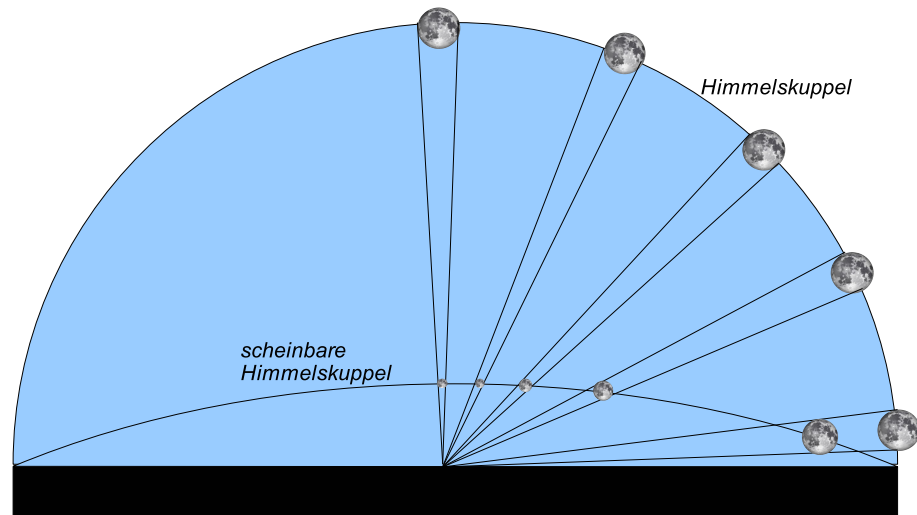


Abbildung 11.1.8: Mondillusion: Der Mond erscheint deutlich größer, wenn er am Horizont steht. Die Ursache für diese Täuschung liegt (vermutlich) in der scheinbar abgeplatteten Form der „Himmelskuppel“, an der der Mond scheinbar befestigt ist. In Verbindung mit der Perspektive wird dadurch der Mond am Horizont scheinbar größer.

Natürlich hilft es, dass wir zwei Augen haben, die die Szene aus unterschiedlichen Richtungen betrachten. Die Binokularität ist Grundlage des Stereosehens. Aber auch wenn zwei Ansichten zur Verfügung stehen, ist die Rekonstruktion der dreidimensionalen Szene aus diesen Ansichten ein sehr schwieriges Problem, das technisch nur mäßig gelöst ist.

Die beeindruckende Leistung des Gehirns besteht darin, trotz dieser Schwierigkeit in praktisch allen Situationen die dreidimensionale Realität aus den zweidimensionalen Realitäten, die wir sehen, korrekt zu rekonstruieren. Dies funktioniert auch dann sehr gut, wenn uns nur ein zweidimensionales Bild zur Verfügung steht. Dabei wählt das Gehirn letztlich die wahrscheinlichste aller möglichen Realitäten. Hierzu werden direkt sensorische Daten (insbesondere natürlich die beiden Bilder der Augen) als auch in großem Maße Erfahrungen genutzt. Man kann aber Bilder konstruieren, bei denen die *Mehrdeutigkeit* dahingehend stark ist, dass verschiedene (meistens zwei) Realitäten vorhanden sind, die gleich wahrscheinlich sind.

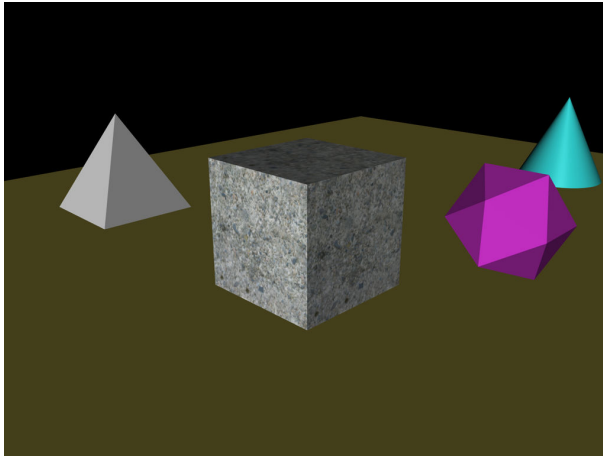
Ein berühmtes Beispiel ist der *Necker Würfel* (siehe Abb. 11.2.10). Die meisten Menschen werden direkt einen Würfel vor sich sehen. Allerdings gibt es zwei Möglichkeiten, diesen (Gitter-)Würfel zu sehen. Entweder die rechte Seite oder die linke Seite¹⁰ ist uns zugewandt. Beide Varianten sind gleich wahrscheinlich. Bei der Betrachtung entscheiden wir uns für eine. Wir können ohne Probleme durch Willenskraft auf die jeweils andere Variante umschalten. Gleichzeitig sehen wir aber niemals beide Varianten. In jedem Moment entscheidet sich unser Gehirn für eine ganz bestimmte Realität. Ganz entsprechend gibt es vergleichsweise viele andere Mehrdeutigkeitsfiguren (siehe z.B. Abb. 11.2.11). So sind neben der Mehrdeutigkeit in der Perspektive auch Mehrdeutigkeiten zwischen Vorder- und Hintergrund möglich.

Warum sehen wir im Necker Würfel direkt einen Würfel, während Abb. 11.2.10 (b), die ebenfalls eine mögliche Projektion eines Würfels auf eine Bildebene zeigt, von uns deutlich schwieriger als Würfel wahrgenommen wird und Abb.

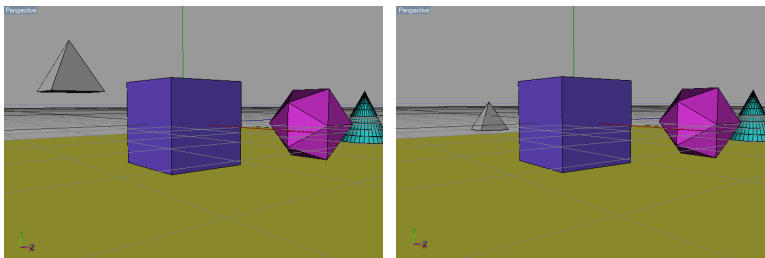
Das Gehirn ist in der Lage, bei mehrdeutigen Bildern die wahrscheinlichste Realität zu erkennen

Das Gehirn entscheidet sich für eine Realität

¹⁰bzw. oben und unten



(a) Szene 1



(b) Szene 2 2

(c) Ansicht 2 für Szene 2

Abbildung 11.2.9: Zwei unterschiedliche dreidimensionale Szenen können – je nach Standort des Beobachters – zum selben zweidimensionalen Bild führen

11.2.10 c.) schließlich jegliche Ähnlichkeit mit einem Würfel vermissen lässt (stattdessen sehen wir eher ein zweidimensionales Muster)? Auch hier ist entscheidend, welche Realität die wahrscheinlichere ist.

Dass wir in einer dreidimensionalen Szene einen Würfel wie in Abb. 11.2.10 c.) gezeigt sehen, ist sehr unwahrscheinlich. Nur aus wenigen (bzw. aus acht) Richtungen sieht der Würfel so aus. Alle (unendlich vielen) anderen Richtungen ergeben ein deutlich anderes Bild. Natürlich ist das Bild auch für den Original Necker Würfel (Abb. 11.2.10 (a)) leicht anders, wenn wir unsere Beobachterposition ändern. Die grundsätzliche Figur, also die Anzahl und relative Lage von Kreuzungen und die Nachbarschaftbeziehungen, bleiben aber erhalten. Eine leichte Änderung des Standpunkt ergibt für die Figur aus Abb. 11.2.10 (b) allerdings ein komplett anderes Bild.

Bei der Auswahl der passenden Deutung für eine Figur verwendet unser Gehirn daher folgende Regel:

Wähle die Deutung einer Szene, die zur selben Struktur der Szene führen würde, wenn der Standpunkt des Beobachters leicht geändert werden würde.

Diese Regel darf nicht dahingehend verstanden werden, dass in unserem Gehirn eine Art if-then Abfrage abläuft, die diese Regel beachtet. Die Regel ist ein reiner Erfahrungswert, d.h. unsere Erfahrung bei der Betrachtung von Szenen hat uns dazu geführt, dass ein entsprechendes Bild eben so gedeutet wird als ob diese Regel fest kodiert vorliegen würde.

„Regeln“ beim Sehen

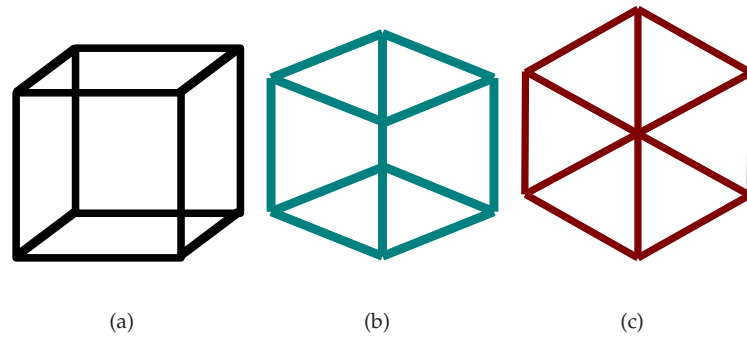
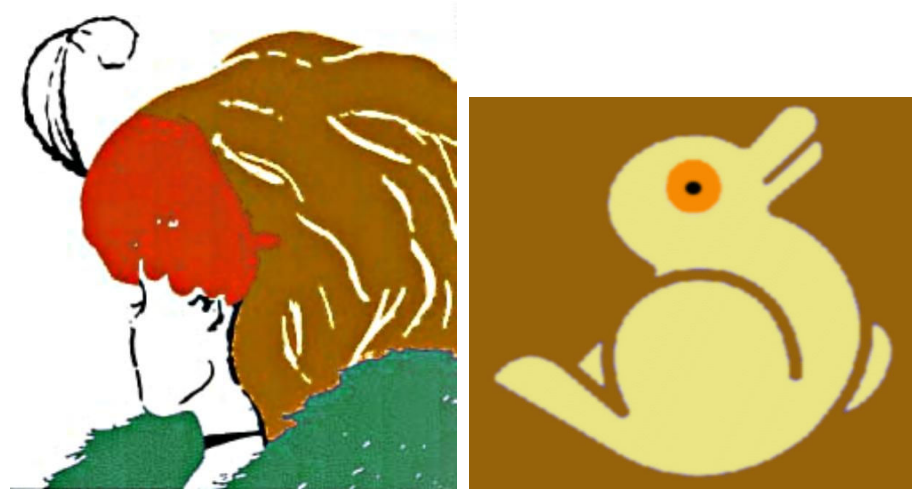


Abbildung 11.2.10: Necker Würfel



(a) Alte und junge Frau

(b) Ente und Kannaichen

Abbildung 11.2.11: Zwei bekannte Beispiele für Mehrdeutigkeiten

Eine weitere Erfahrungsregel betrifft Schnittpunkte von Geraden im Bild. Wir deuten solche Schnitte als Projektion von Schnitten im Dreidimensionalen. Das heißt, wenn sich etwas im Bild schneidet, dann schneiden sich die entsprechenden Elemente auch im Raum (siehe Abb. 11.2.12). Umgekehrt ist diese Regel natürlich in jedem Fall richtig (Schnitt im Raum \rightarrow Schnitt im Bild). Der Rückschluss vom Bild auf den Raum ist aber nicht zwangsläufig korrekt, er ist eben nur in den allermeisten Fällen richtig. Trotzdem lassen sich leicht Ausnahmen konstruieren. Ein berühmtes Beispiel ist das Kaniza Dreieck (siehe Abb. 11.7.46).

Solche „unmöglichen Konstruktionen“ sind also meist nicht wirklich unmöglich. Für das Gehirn macht die Annahme Sinn, dass es sich um ein geschlossenes Dreieck handelt. Nur aus einer ganz speziellen Richtung (\rightarrow unwahrscheinlich) ergibt sich das Bild des Dreiecks obwohl im Raum eben kein Dreieck vorliegt. Unmögliche Konstruktionen sind in diesem Sinn nicht unmöglich, sondern nur extrem unwahrscheinlich.

Abb. 11.2.14 verdeutlicht eine weitere Regel. Fast alle Menschen kommen bei der Frage nach der *Nachbarschaft* der Kreise zu den Linien zu demselben Ergebnis. Kreis A liegt am nächsten bei Linie 1, Kreis B ist nahe bei Linie 2.

Schnitt im Bild heißt Schnitt im Raum

Nachbarschaften im Bild entsprechen Nachbarschaften im Raum

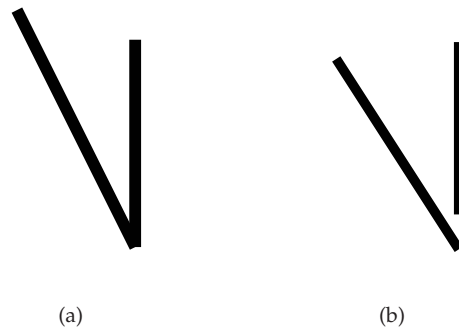


Abbildung 11.2.12: Regel: Geraden, die sich im Bild schneiden, schneiden sich auch im Raum

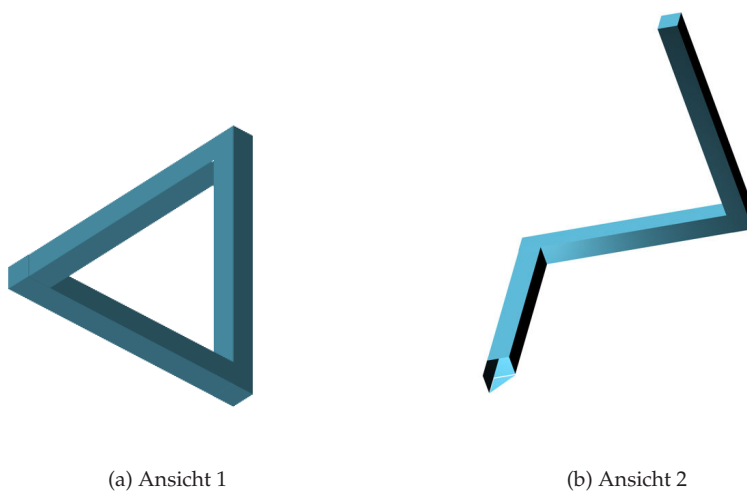


Abbildung 11.2.13: Kaniza Dreieck: Aus der richtigen Richtung ergibt sich ein scheinbar unmögliches Dreieck. Wenn man die Beobachtungsrichtung ändert zeigt sich, dass in Wirklichkeit kein Dreieck, sondern ein komplizierteres Objekt betrachtet wird.

Letzlich wird Nachbarschaft im Bild als Nachbarschaft im Raum gesehen. Nachbarschaft im zweidimensionalen Bild legt also Nachbarschaft im dreidimensionalen Raum nahe.

Die Form von Körpern wird anhand des Bildes dadurch bestimmt, dass wir konvexe und konkave Bildelemente unterscheiden. Ein konvexer Abschnitt im Bild entspricht einem konvexen Abschnitt (Ausbeulung) im Raum. Ein konkaver Bildbereich wird dagegen von einem sattelförmigen Objektteil im Raum hervorgerufen (siehe Abb. 11.2.16).

konvex und konkav

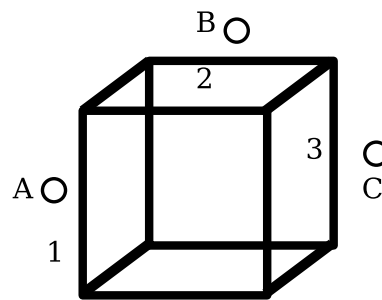


Abbildung 11.2.14: Nachbarschaft im Raum und im Bild



Abbildung 11.2.15: Unmögliche Konstruktionen, M.C. Escher's „Waterfall“ (c) 2006 The M.C. Escher Company - The Netherlands. All rights reserved. Used by permission. www.mcescher.com



Abbildung 11.2.16: Konkav und Konkav: Konvexe zweidimensionale Bildanteile entsprechen im dreidimensionalen Raum ebenfalls konvexen Gebilden. Konkave Bildanteile entsprechen Sattelflächen.

11.3 Caféhaus Illusion

Die sogenannte *Caféhaus Illusion* erhielt ihren Namen dadurch, dass sie unter anderem an der Wand eines Caféhauses in Bristol entdeckt wurde.¹¹

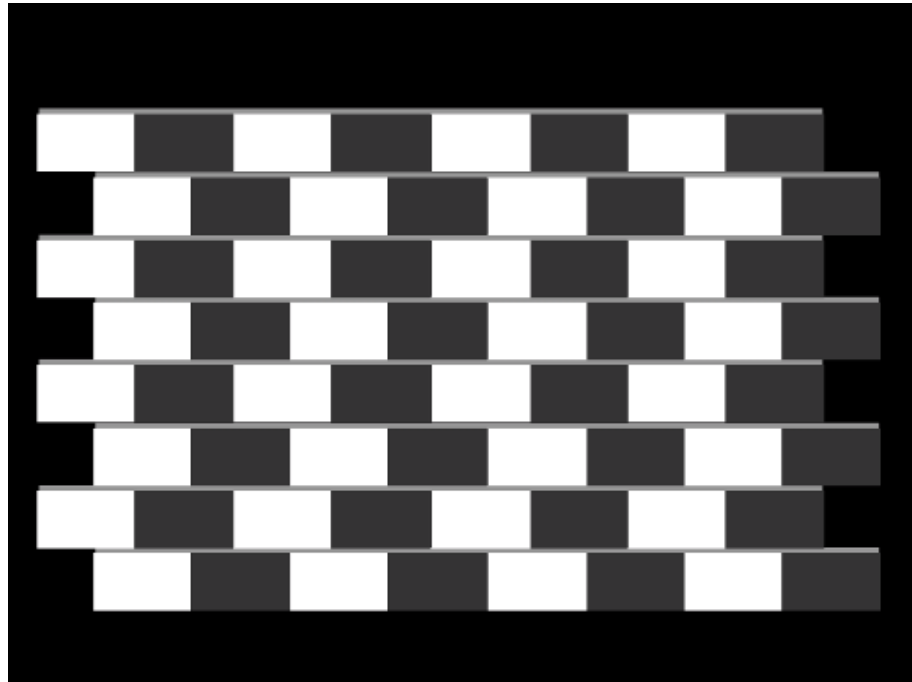


Abbildung 11.3.17: *Caféhaus Illusion*: Die horizontalen Linien scheinen gekippt zu sein

Obwohl die horizontalen Linien in Abb. 11.3.17 exakt horizontal sind und damit zueinander parallel verlaufen, ist der Eindruck beim Betrachter ein anderer. Die Linien scheinen zueinander geneigt. Noch mysteriöser ist, dass der Effekt verschwindet, sobald man die Farbe des Mörtels ändert (siehe Abb. 11.3.18). Nur wenn die Helligkeit des Mörtels zwischen den Farben der Kacheln liegt, ergibt sich die Illusion.

Für den Effekt wurden – wie für die meisten optischen Täuschungen – verschiedene Erklärungen gegeben. Die momentan vorherrschende Theorie geht von einer Kantendetektion im menschlichen Sehsystem aus. Dies wird sowohl durch experimentelle neurologische Ergebnisse als auch die besondere Bedeutung der Kantendetektion generell für Szenenanalysen gestützt.

Eine *Kantenvestärkung* von Abb. 11.3.17 ergibt das in Abb. 11.3.19 dargestellte Bild¹². Offensichtlich ist der Effekt verstärkt. Eine Detailbetrachtung zeigt, dass lokal in der Tat geneigte Kanten auftreten. Auffällig ist, dass ein großer Bereich eine zwar schwache, aber konstante positive Steigung aufweist. Die Merkmalsdetektoren im Sehsystem, die auf eine lokale Kante dieser Steigung ausgelegt sind, werden stark gereizt und führen so zu dem Eindruck, dass die gesamte Zeile entsprechend geneigt ist.

Die Kippung hat ihren Ursprung in der starken Anregung der lokalen Orientierungsdetektoren für eine kleine Verkippung. Das Sehsystem bildet

¹¹Eigentlich wurde sie auch schon vorher entdeckt, ihr „Durchbruch“ gelang aber mit der Entdeckung an besagter Caféhauswand.

¹²Hierzu wurde ein Laplace-of-Gaussian Filter, also ein Tiefpass gefolgt von einer Kantendetektion, eingesetzt.

Kantendetektoren führen zu den scheinbar geneigten Linien

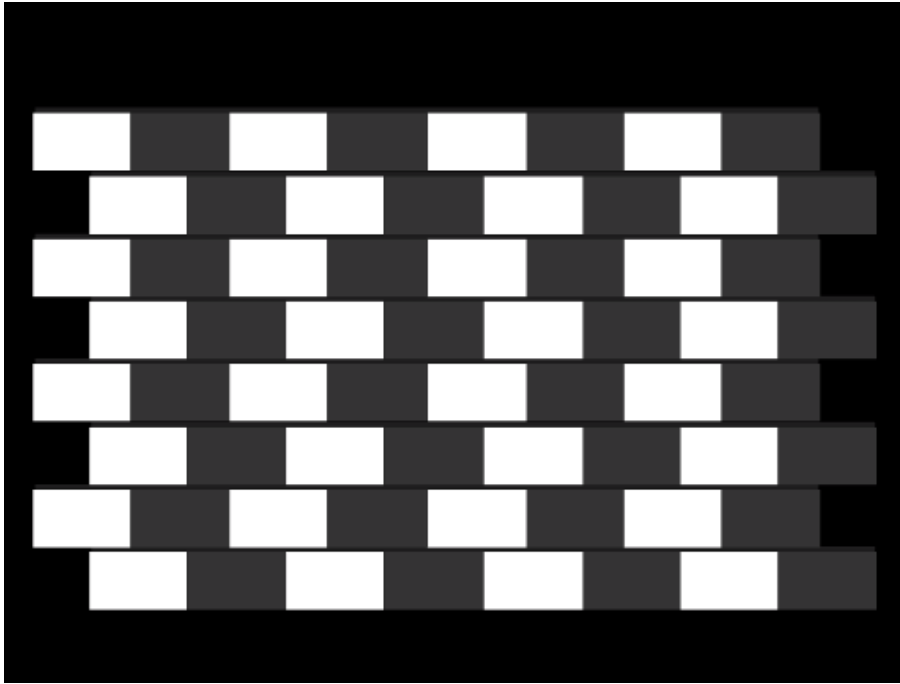


Abbildung 11.3.18: *Caféhaus Illusion: Wenn der Mörtel nicht grau ist, dann verschwindet die Illusion*

dadurch anschaulich gesprochen folgende Schlussfolgerung: „Wenn meine Orientierungsdetektoren in der gesamten Zeile eine Verkippung von 3° Grad detektieren, dann wird wohl logischerweise die ganze Zeile um 3° gekippt sein“. Natürlich ist diese Schlussfolgerung falsch und natürlich kommt das Gehirn nicht durch eine logische Schlussfolgerung, sondern durch das Erlernen dieses Zusammenhanges zu dem entsprechenden Ergebnis. Aber das Ergebnis macht eben wieder in der überwiegenden Zahl von Bildern, die wir täglich sehen, Sinn und führt zur korrekten Deutung der allermeisten Szenen.

Abbildung 11.3.20 zeigt eine weitere Täuschung, bei der die lokalen Orientierungsdetektoren angeregt werden. Die horizontalen Linien scheinen zueinander gekippt zu sein.

Sofern die Linien zu stark gekippt sind, funktioniert der Effekt nicht mehr bzw. schlecht (siehe Abb. 11.3.21). Dies macht auch Sinn, denn in diesem Fall ist der Ausgang der lokalen Orientierungsdetektoren zu stark verschieden von der Grundorientierung der Linie. Ein Zusammenhang zwischen beiden wird nicht hergestellt.

Die Farbquadrate der *Pyramiden Illusion* in Abb. 11.3.22 zeigen das eigentümliche Verhalten, dass die Ecken der Quadrate scheinbar aufgeheilt sind.¹³ Man hat den Eindruck einer diagonalen, die Ecken verbindenden hellen Linie. Ein sehr schönes Online Demo kann auf der Internetseite des Martinez-Conde Laboratoriums betrachtet werden¹⁴. Dort findet sich auch eine nähere Erläuterung. Letztlich liegt auch hier der Grund in der Kantenverstärkung bzw. die lokale Inhibition gemäß dem Mach Effekt (s.u.).

¹³Bekannt wurden diese Täuschungen insbesondere durch die Arbeiten von Vasarely, z.B. „Arc-turus II“.

¹⁴http://www.neuralcorrelate.com/smc_lab

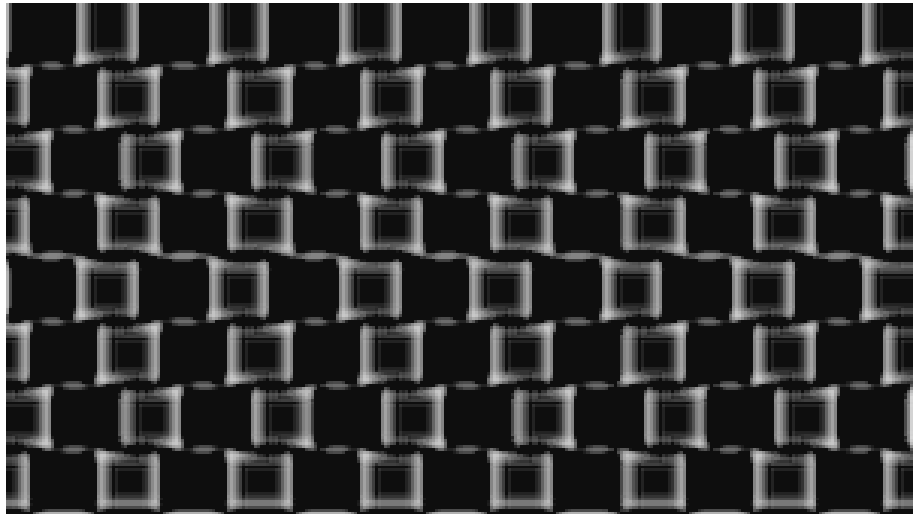


Abbildung 11.3.19: Caféhaus Illusion: Kanterverstärkung

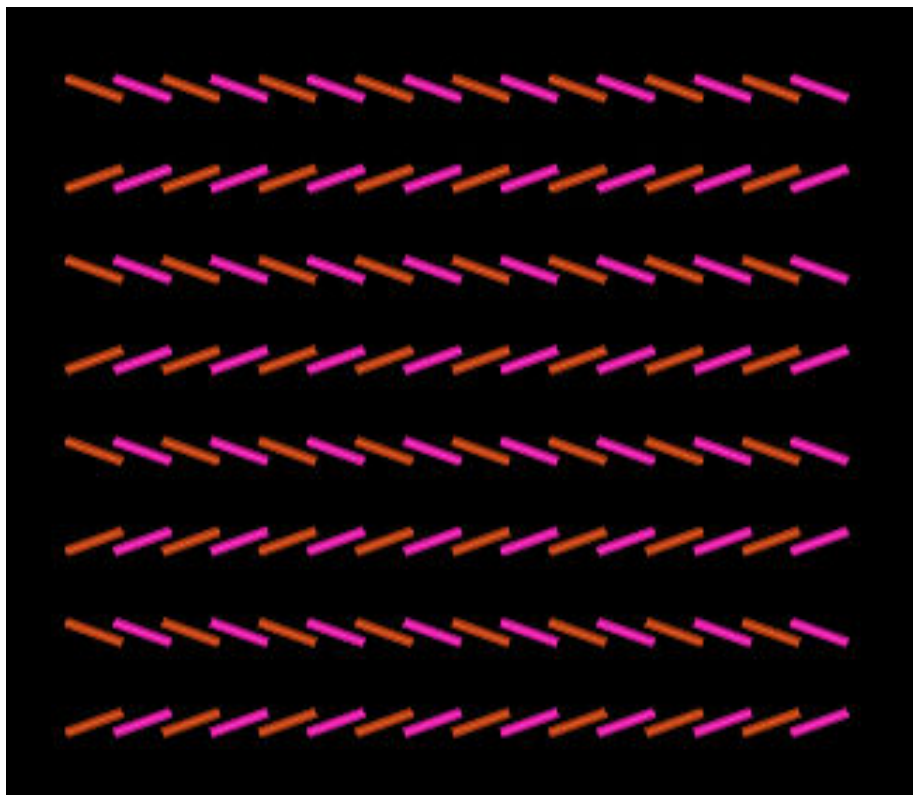


Abbildung 11.3.20: Die horizontalen Linien erscheinen gekippt

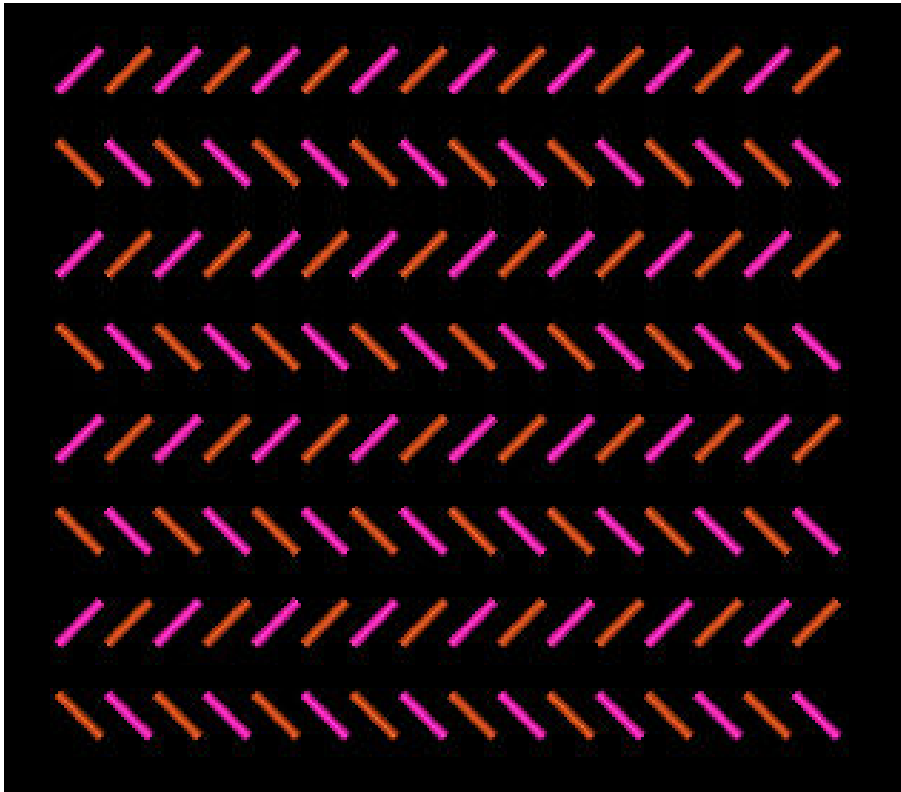


Abbildung 11.3.21: Wenn der lokale Winkel nahe bei 45° liegt, dann verschwindet die Illusion

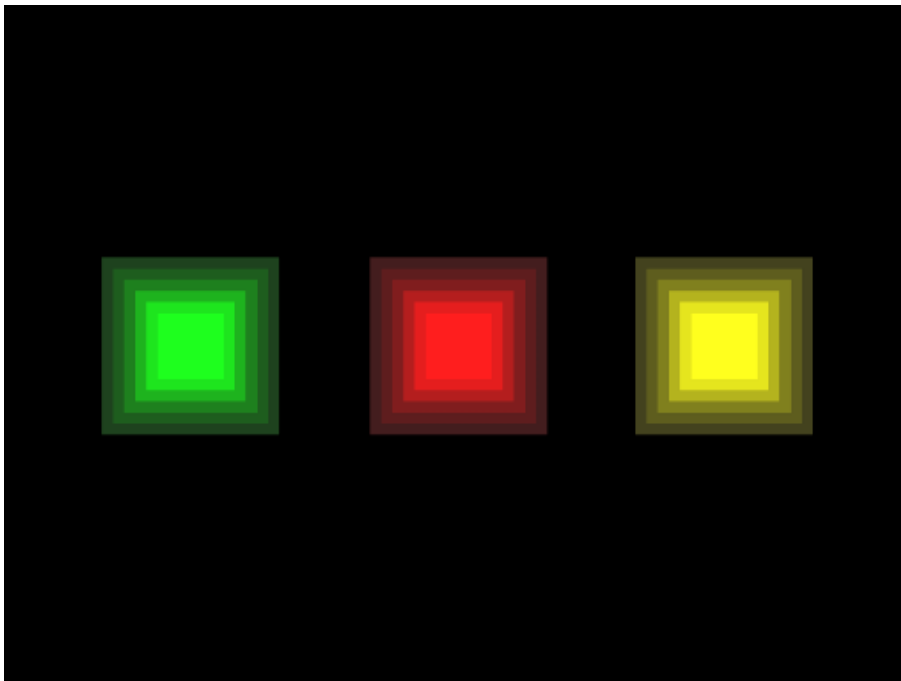


Abbildung 11.3.22: Pyramiden Illusion: Die Diagonalen sind nicht wirklich heller als der Rest. Bild nach Vasarely, „Arcturus II“. Farbtafel: 12.0.47

11.4 Laterale Inhibition

Flimmereffekte können aufgrund unterschiedlicher Gründe bei der Betrachtung statischer Bilder auftreten. Abb. 11.4.23 zeigt eine Abwandlung des berühmten *Hermann Gitters* oder *Hering-Gitter* (die Abwandlung wird auch als *szintillierendes Gitter* bezeichnet). An den Kreuzungsstellen sollten Sie dunkle Punkte sehen. Diese Punkte verschwinden aber sobald Sie Ihren Blick (bzw. Ihre Aufmerksamkeit bzw. Ihren gelben Fleck) auf den jeweiligen dunklen Punkt richten.

Springende dunkle Punkte an Kreuzungspunkten

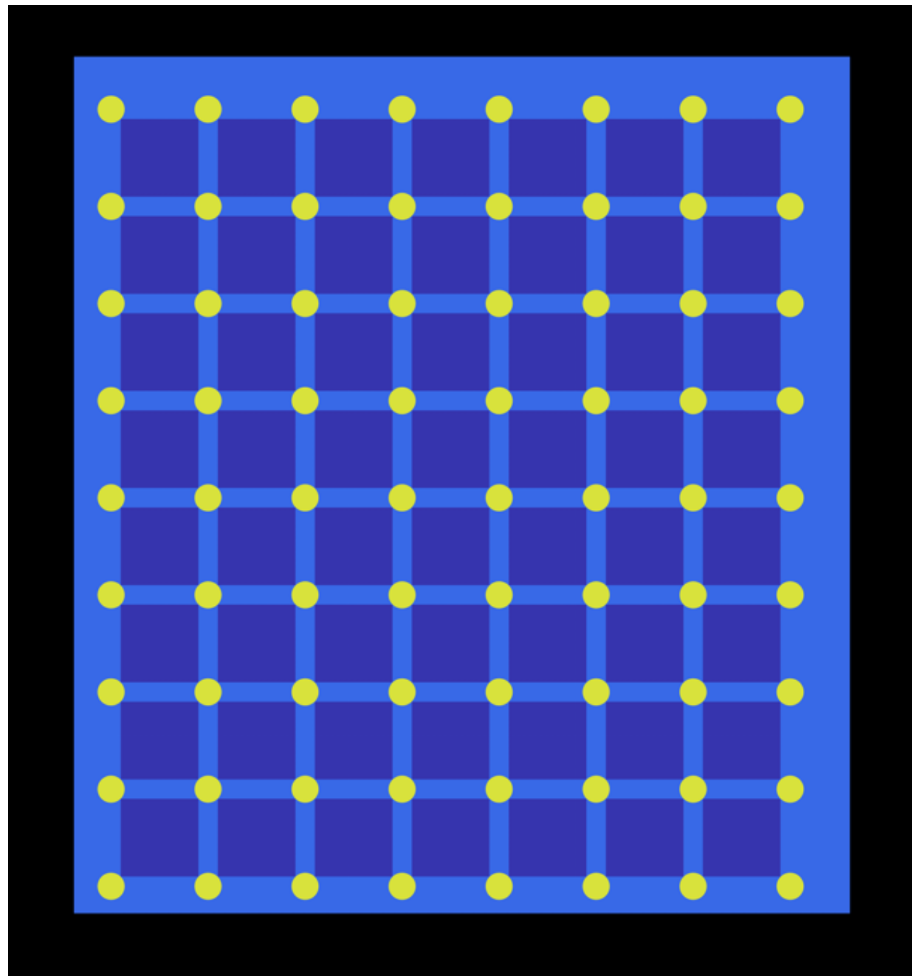


Abbildung 11.4.23: Szintillierendes Gitter: Die im Schatten liegenden hellen Flächen erscheinen heller als die im Lichtbereich liegenden dunklen Flächen. Im Bild sind die Flächen aber gleich hell. Farbtafel: 12.0.48

Die Punkte erscheinen springenderweise immer in ihrem peripheren Sehfeld. Wesentlich ist dabei die Helligkeitsverteilung im Bild. Die Kreuzungspunkte müssen heller als die Grundfläche sein. Ludimar *Hermann*, ein Schweizer Physiologe, hat den Effekt 1870 erstmals wissenschaftlich beschrieben, nachdem er ihn durch Zufall bei der Betrachtung einer Abbildung von Schwingungsfiguren entdeckt hatte.

Wieder ist (vielleicht) die *Kantendetektion* unseres Sehsystems für den Effekt verantwortlich. Wir wollen im Folgenden diesen Effekt exemplarisch etwas näher betrachten. Er zeigt, wie oft optische Täuschungen erklärbar sind, aber auch, dass bei entsprechenden Erklärungen äußerste Vorsicht notwendig ist.

Benachbarte Sehzellen der Netzhaut sind gemäß Abbildung 11.4.24 miteinander verschaltet. Eine Erregung benachbarter Sehzellen führt zu einer Dämpfung der zentralen Zelle. Man spricht von *lateralen Inhibition*. Im peripheren Gesichtsfeld ergibt sich an den Kreuzungsstellen eine relativ starke Dämpfung (Licht fällt auf die hemmenden Bereiche, siehe Abb. 11.4.24). Dadurch wirkt der Kreuzungspunkt dunkel. Im Bereich der Linien ist der Effekt nicht so stark denn hier werden nicht so viele hemmende Zellen beleuchtet.

Ursache: Kantendetektion

Entscheidend ist die Tatsache – so die Theorie –, dass die Größe der Bereiche („rezeptive Felder“) im Bereich der Fovea, also des gelben Flecks, aufgrund der deutlich höheren Auflösung sehr klein sind (Abb. 11.4.25). Daher tritt die Abdunklung in diesem Bereich auch an Kreuzungspunkten nicht auf.

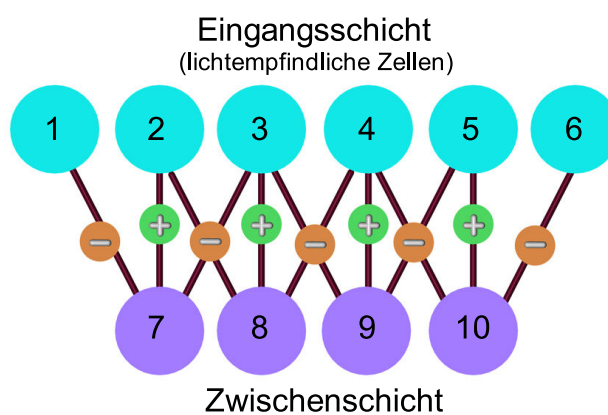


Abbildung 11.4.24: Prinzip der lateralen Inhibition

Eine komplette Invertierung des Musters ändert am Auftreten (entsprechend auch mit invertierten Punkten) nichts. Dies würde bedeuten, dass entsprechend invertierte rezeptive Felder zum Einsatz kommen.

Dies ist die Standarderklärung für das Hermann Gitter. Gegen diese recht einfache Erklärung spricht allerdings, dass der Effekt in einem relativ weiten Größenbereich des Gitters funktioniert. Wenn man den Effekt auf die Netzhaut mit einer festen Größe der rezeptiven Felder bezieht, dann ist nicht einzusehen, dass – unabhängig von der Gittergröße – die Kreuzungspunkte dunkel erscheinen sollen.¹⁵

Warum es nicht ganz so einfach ist

Es ist also anzunehmen, dass nicht nur in der Netzhaut sondern auch in höheren Verarbeitungsarealen eine laterale Inhibition stattfindet. Dabei muss die Größe der rezeptiven Felder eben variabel, je nach Szene, wählbar sein. Entsprechende Felder sind in höheren Hirnregionen (V1) vorhanden. Diese Felder sind im Vergleich zu denen der Netzhaut auch vergleichsweise groß.

Kantendetektion in höheren Verarbeitungsregionen

Ein weiteres Indiz für die Bedeutung der höheren Regionen ist die Orientierungsabhängigkeit des Musters. Retinale Zellen haben keine Orientierungsabhängigkeit während viele Zellen in höheren Hirnregionen (z.B. V1)

¹⁵Interessant ist auch, dass bei einer nicht regelmäßig rechtwinkligen Gitteranordnung der Effekt nicht auftritt bzw. deutlich vermindert ist. Dies sollte nach der einfachen Erklärung mittels lateraler Inhibition eigentlich nicht der Fall sein (siehe Lingelbach und Ehrenstein in „Optikum“ Dezember 2004).

eine Orientierungsabhängigkeit zeigen. Unklar ist aber nach wie vor, warum die zusätzlichen Kreise, also der Übergang vom Binärbild zum dreifarbigem Bild, eine deutliche Verstärkung der Illusion bewirken und warum z.B. eine Betrachtung mit nur einem Auge zu einer Verminderung der flackernden Punkte führt.¹⁶ Ebenso unklar ist, warum ein leicht welliges Gittermuster die Illusion zum Verschwinden bringt.¹⁷ Eine mögliche Erklärung, die den wesentlichen Effekt durch orientierungsabhängige *rezeptive Felder* im Kortex sieht, kann diesen Effekt zwar erklären, ist aber letztlich beim bisherigen Stand der Dinge auch eine Hypothese.

Weitere Einschränkungen können durch zusätzliche Experimente gemacht werden. So zeigt sich z.B., dass auch bei einer sehr kurzen Betrachtung des Gitters der Effekt vorhanden ist. Dies bedeutet, dass Augenbewegungen oder Blinzeln nicht relevant für die Bewegung sind (bei vielen anderen Täuschungen mit Bewegung sind solche Augenbewegungen von ausschlaggebender Bedeutung).

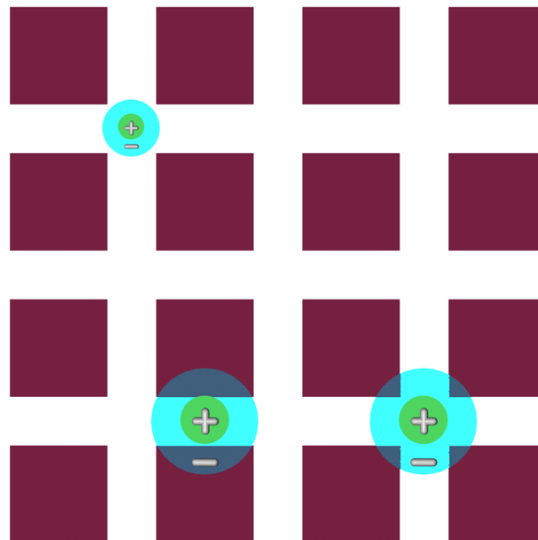


Abbildung 11.4.25: Laterale Inhibition und Hermann Illusion

Wir wollen die *laterale Hemmung* aufgrund ihrer Wichtigkeit noch etwas genauer betrachten. Sie wirkt wie eine zweite Ableitung. Dies sieht man, wenn eine einzelne Zeile betrachtet wird. Nehmen wir vereinfachend an, mathematisch seien die Gewichtungsfaktoren der benachbarten Sehzellen gemäß

$$g = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11.1)$$

gegeben.

¹⁶Lingelbach, Ehrenstein, Das Hermann-Gitter und die Folgen, Optikum, Oktober 2005

¹⁷Lingelbach, Ehrenstein, www.optikum.at/319.htm

Dies bedeutet, dass ein Bild mit den diskreten Bildpunkten $b(x, y)$ in ein neues Bild

$$b'(x, y) = \sum_{i=-1..1} \sum_{j=-1..1} b(x+i, y+j)g(i, j) \quad (11.2)$$

transformiert wird.

Betrachten wir weiter vereinfachend den eindimensionalen Fall, also die Gewichtungsfaktoren

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (11.3)$$

Damit ergibt sich für das Bild

$$b'(x) = 2b(x) - b(x-1) - b(x+1) \quad (11.4)$$

Die einfache Ableitung wäre der Differenzenquotient

$$b'(x) = b(x+1) - b(x-1) \quad (11.5)$$

Die zweite Ableitung ergibt

$$b''(x) = b'(x+1) - b'(x-1) \quad (11.6)$$

$$= b(x+2) - b(x+1-1) - (b(x-1+1) - b(x-1-1)) \quad (11.7)$$

$$= -2b(x) + b(x-2) + b(x+2) \quad (11.8)$$

Bis auf das Vorzeichen und die Skalierung (2 statt 1 für die lokale Nachbarschaft) entspricht dies dem Ergebnis aus Gleichung 11.4. Diese Art der Filterung ist auch in der Bildverarbeitung sehr gebräuchlich (*Laplace Filter*¹⁸). Abb. 11.4.26 zeigt ein Beispielbild).



(a) Originalbild

(b) Kantengefiltertes Bild

Abbildung 11.4.26: Beispiel eines Laplacefilters

Der Effekt ist beim menschlichen Sehsystem nicht so einfach und auch nicht so stark ausgeprägt. In der Tat ist aber eine entsprechende Verschaltung in der Netzhaut, also noch bevor die Sehzellensignale in das visuelle Zentrum des Gehirns gelangen, nachgewiesen.

¹⁸Wobei beim Laplacefilter normalerweise eine 8er Nachbarschaft verwendet wird.

*Mach-Effekt: Überschwinger
an Kanten*

Diese Kantendetektion ist außer für die bereits besprochenen Täuschungen für die Analyse von Szenen von großer Bedeutung. Sie ist auch für den sogenannten *Mach-Effekt* verantwortlich (siehe Abb. 11.4.27): Die dargestellten Grautöne sind jeweils homogen. Bei der Betrachtung hat man allerdings den Eindruck, dass an den Kanten ein leichter heller bzw. dunkler Rand auftritt und im Innern eines Grautonfeldes nicht etwa ein konstanter Grauton, sondern ein Grautonverlauf vorliegt. Die laterale Inhibition erklärt diesen Effekt. Bei Anwendung des Laplace Filters auf das Grautonbild ergibt sich in der Tat ein Überschwingen an den Kanten.

Der Mach Effekt tritt natürlich nicht nur an künstlichen Übergängen, sondern auch an Szenen unserer Umgebung auf. Besonders an unterschiedlich weit entfernten Gebirgsketten und den sich ergebenden (verminderter Kontrast mit Entfernung) Helligkeitsunterschieden der Berge ist er gut beobachtbar (siehe Abb. 11.4.28).

Bei der Betrachtung von Kantenstrukturen bei hoher Vergrößerung mittels eines Mikroskops kann aufgrund des Macheffekts eine Art Überschwingung beobachtet werden. Der Macheffekt verstärkt so Überschwinger aufgrund der (teilweise) kohärenten Abbildung bzw. gaukelt eine verstärkte Kohärenz vor¹⁹.



Abbildung 11.4.27: Mach Effekt: An den Übergangsstellen der Grautonbereiche ergeben sich scheinbare helle und dunkle Streifen.



Abbildung 11.4.28: Mach Effekt am Beispiel von unterschiedlich weit entfernten Bergen: Zu betrachten sind weit entfernten Hügel.

¹⁹W.T. Welford, Physics Education 3, S. 83 (1968)

11.5 Scheinbare Bewegung

Scheinbare Bewegungen treten aber nicht nur beim Hermann Gitter, sondern auch bei anderen Bildern auf. Bei sehr feinen Strukturen, wie sie in Abb. 11.5.30 auftreten, werden Bewegungsdetektoren angesprochen. Minimalste Augenbewegungen führen zu einer unterschiedlichen Anregung von elementaren Bewegungsdetektoren²⁰ und damit zu einer scheinbaren Bewegung. Ein ganzer Kunststil („Op Art“) wurde in den sechziger Jahren auf diesen Effekt gegründet.

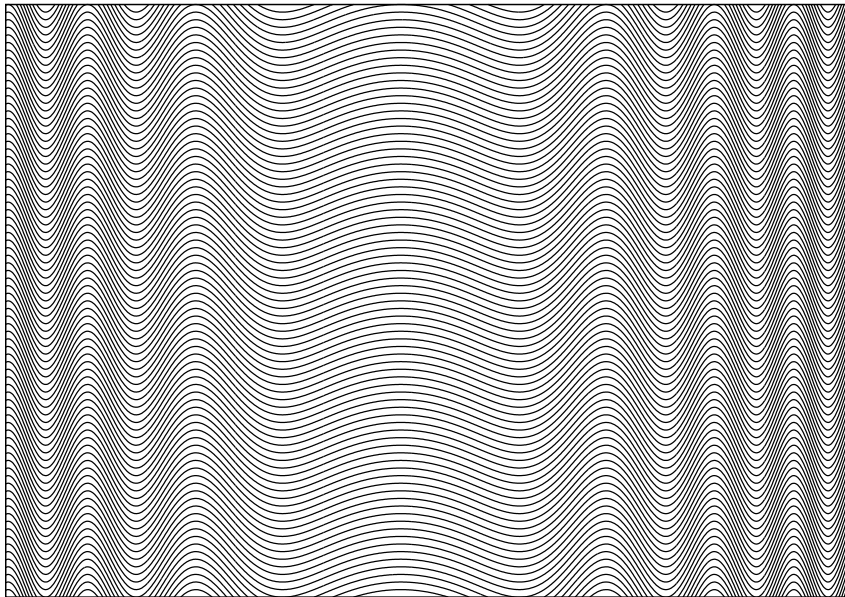


Abbildung 11.5.29: Op–Art: Variieren Sie den Abstand zum Bild und bewegen Sie das Blatt um verschiedene Flimmereffekte zu sehen.

Dass die scheinbaren Bewegungen auf die Augenbewegungen zurückführbar sind können Sie durch folgendes Experiment verifizieren: Warten Sie im Dunkeln, bis Ihr Auge komplett dunkeladaptiert ist. Dann schauen Sie ein Op–Art Bild (z.B. Abb 11.5.29) mittels einer Blitzlicht Beleuchtung (z.B. Fotoapparat) kurz an. Durch die starke Belichtung ergibt sich auf Ihrer Netzhaut ein deutliches Nachbild, das Sie dann in aller Ruhe „betrachten“ können. Sie werden kein Flimmern wahrnehmen.

Zusätzlich sind auch in Abb. 11.5.30 wieder die hüpfenden Punkte der Hermann Illusion an den Kreuzungspunkten sichtbar. Besonders beeindruckend sind allerdings die schwarzen Geisterringe, die sich im Bild befinden. Auch sie stellen eine Illusion, die sogenannte *Enigma–Illusion* dar.²¹ Insbesondere sieht man aber auch noch eine Rotation der Ringe, ein Effekt, für den mir keine plausible Erklärung bekannt ist.²² Bei einem dunklen Muster auf einem hellen Untergrund ergeben sich entsprechend helle Geisterringe.

Auch Abb. 11.5.32 zeigt Rotationen in den Ringbereichen. Bei einer Fixierung des Zentrums der Figur (vorzugsweise lediglich mit einem Auge) ergeben sich auch Bewegungen im Bereich der Speichen in der Peripherie.

*Enigma Illusion: scheinbare
Rotation im Bild*

²⁰Zanker und Walker, Naturwissenschaften 91, S. 149-156, 2004.

²¹Der Name geht auf eine Grafik von I. Leviant mit dem Titel „Enigma“ zurück.

²²Für eine Erklärung siehe Zaker et al., Naturwissenschaft 91, S.149, 2004.

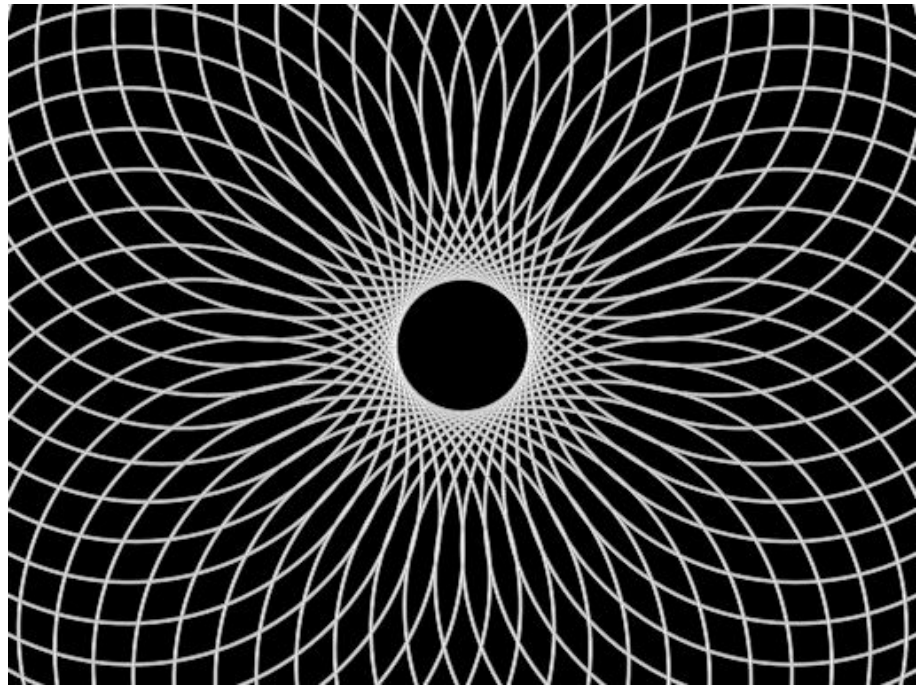


Abbildung 11.5.30: Es sind scheinbare schwarze Kreise sichtbar. Zusätzlich (Blinzeln, Blatt bewegen) ergeben sich scheinbare Rotationen in diesen Kreisen.

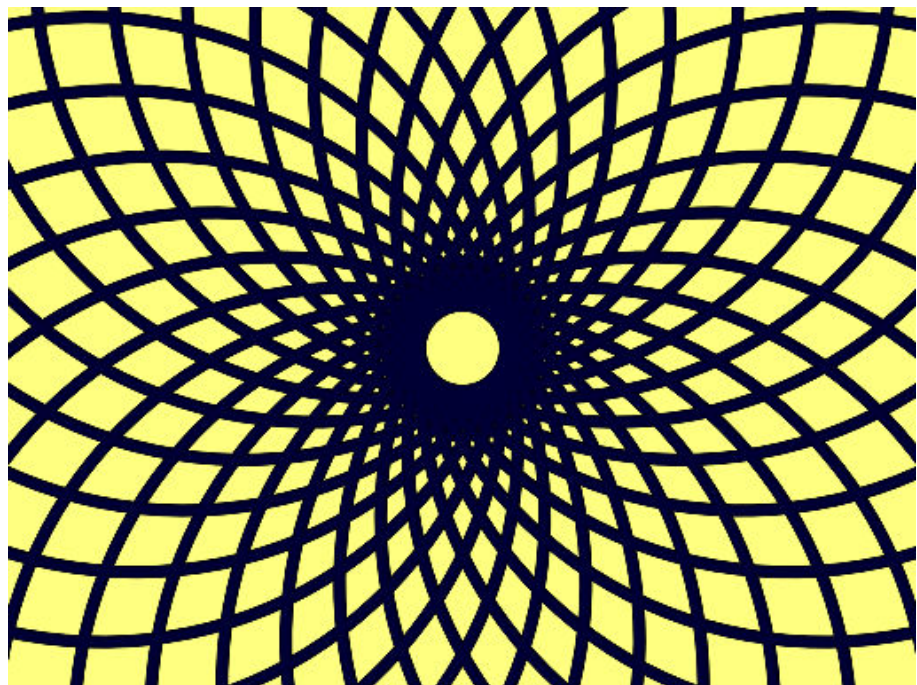


Abbildung 11.5.31: Variation von Abb. 11.5.30. Hierbei sind weiße Scheinkreise sichtbar und an den Kreuzungsstellen ergeben sich wieder Abdunklungen gemäß dem Hermanngitter.

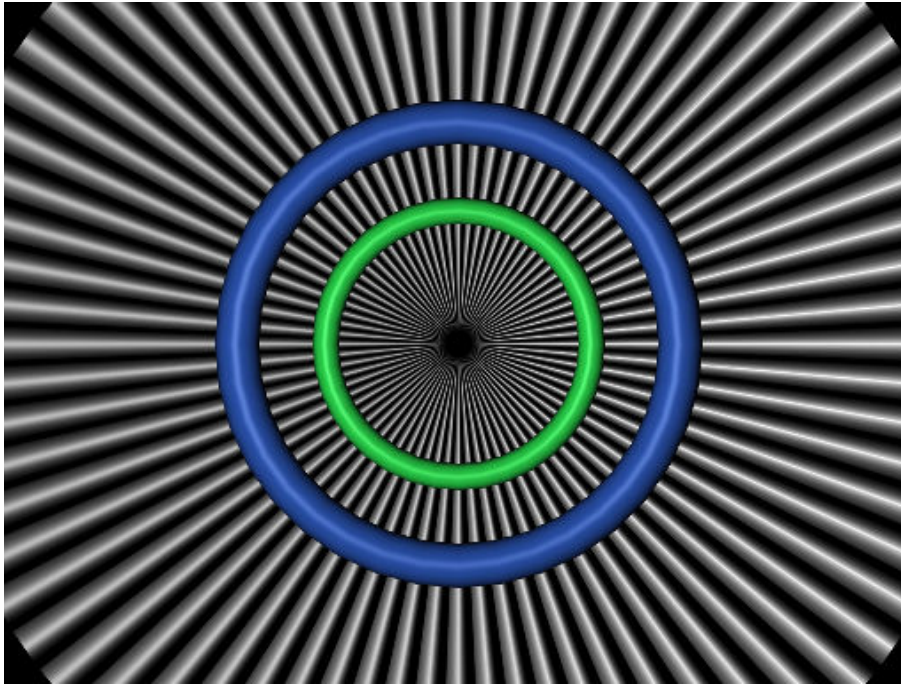


Abbildung 11.5.32: Rotation innerhalb der Ringe

Eine dritte Art von Bewegung sieht man bei der *Ouchi Illusion* (siehe Abb. 11.5.33), die teilweise auch als die beeindruckendste Illusion überhaupt bezeichnet wird. Das zentrale Quadrat bewegt sich scheinbar gegenüber dem Rand. Falls Sie den Effekt nicht sofort sehen kann eine leichte Kopfbewegung oder ein Blinzeln helfen. Dabei sollten Sie das Zentrum des Bildes nicht fixieren sondern dafür sorgen, dass dieses Zentrum in ihr peripheres Gesichtsfeld fällt.

Wieder ist die Wahl der Helligkeiten für die unterschiedlichen Flächen in der Abbildung von ausschlaggebender Bedeutung. Abb. 11.5.34 zeigt, dass bei einer leicht anderen Farbgebung (Hintergrund heller) die Illusion stark verringert oder komplett zerstört wird.

Als Erklärung für den Ouchi Effekt wurde vorgeschlagen (und teilweise verifiziert), dass das menschliche Sehsystem auf Bewegungen senkrecht zur Grundausrichtung eines Körpers besonders stark reagiert. Bei einer Bewegung des Körpers in Abb. 11.5.35 in horizontaler Richtung wird also die Bewegung weniger stark wahrgenommen als bei einer Bewegung in senkrechter Richtung. Dieses Phänomen ist zunächst vergleichsweise naheliegend, da sich Objekte (z.B. Menschen) eben meist in dieser Richtung bewegen.

Wenn nun zufällige Bewegungen des Auges oder ein Wackeln mit dem Kopf zu einer Bewegung führen, dann wird der innere Teil der Ouchi Illusion mit einer anderen effektiven Geschwindigkeit wahrgenommen als der restliche Teil, weil die Grundorientierung (durch die hellen Balken festgelegt) im inneren Teil senkrecht zur Orientierung im äußeren Gebiet ist.

Leider beschreibt diese Erklärung wohl auch nur einen Teil der Wirklichkeit unseres komplexen Sehsystems. Inzwischen²³ wurden auch Variationen der Ouchi Illusion gefunden, die nach der einfachen Erklärung genauso starke Illusionen hervorrufen sollten, aber im Versuch deutlich reduzierte Effekte ergeben.

Ouchi Illusion: Die beeindruckendste Täuschung überhaupt?

eine einfache Erklärung

leider nur bedingt korrekt

²³Ashida et al, Perception 34, S. 381-390 (2005)

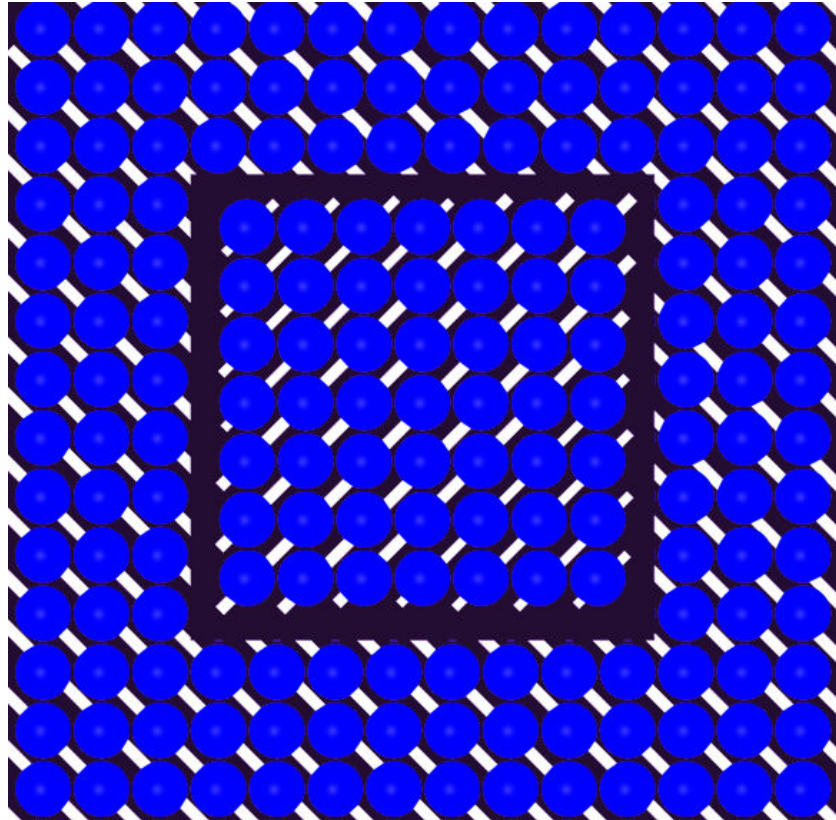


Abbildung 11.5.33: Eine Variation der Ouchi Illusion. Farbtafel: 12.0.49

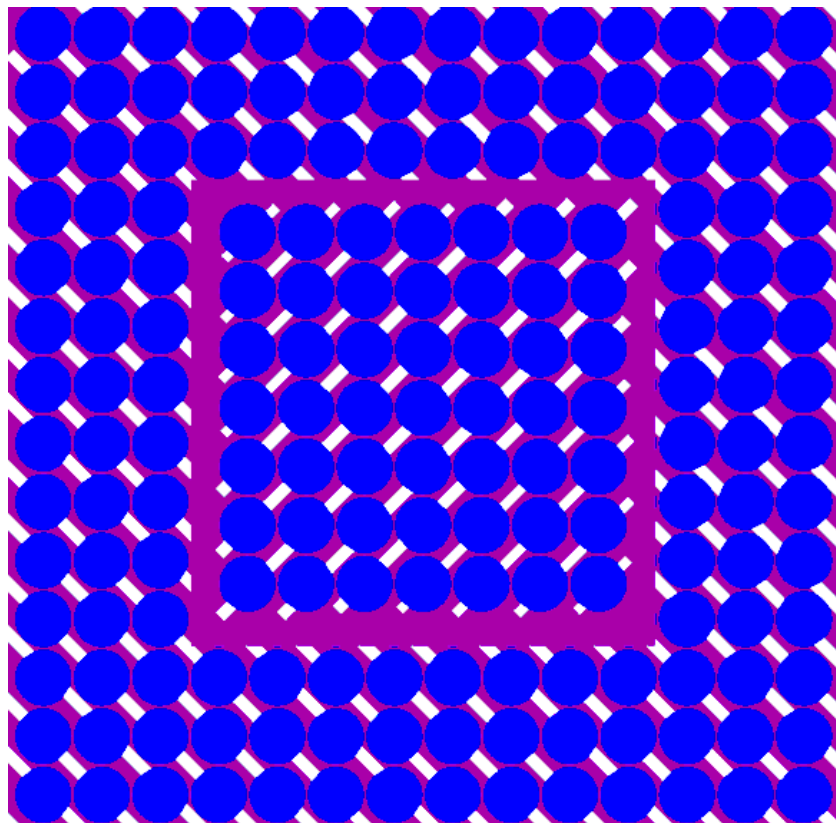


Abbildung 11.5.34: Die Ouchi Illusion verschwindet, wenn der Hintergrund nicht dunkel ist. Farbtafel: 12.0.50

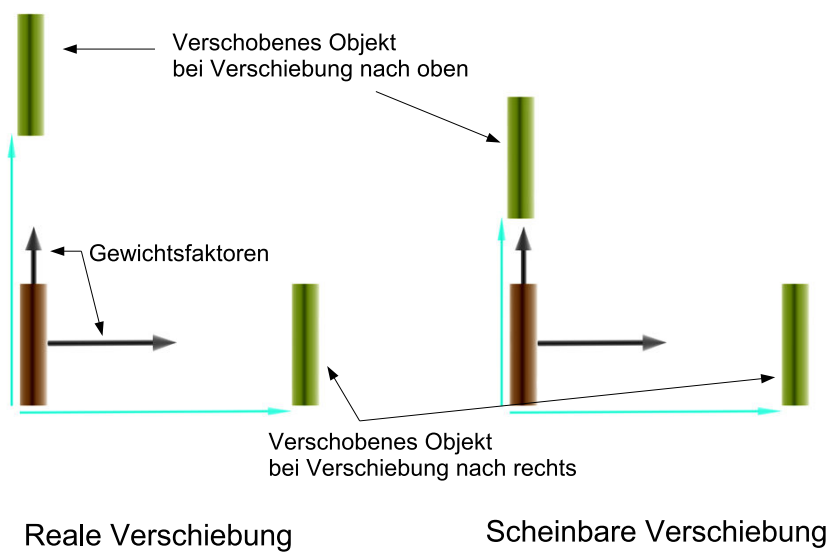


Abbildung 11.5.35: Zur Erklärung der Ouchi Illusion: Bewegungen werden in Richtung senkrecht zur der Objektausrichtung (senkrecht zu einem länglichen Objekt) stärker gewichtet. Zufällige Augenbewegungen werden daher dann verstärkt, wenn Sie in Richtung senkrecht der Ausrichtung eines Elements erfolgen. Wenn in unterschiedlichen Bildbereichen die Grundausrichtungen der Elemente unterschiedlich sind (idealerweise senkrecht aufeinander), dann ergibt sich eine unterschiedlich starke scheinbare Bewegungen in den verschiedenen Bereichen.

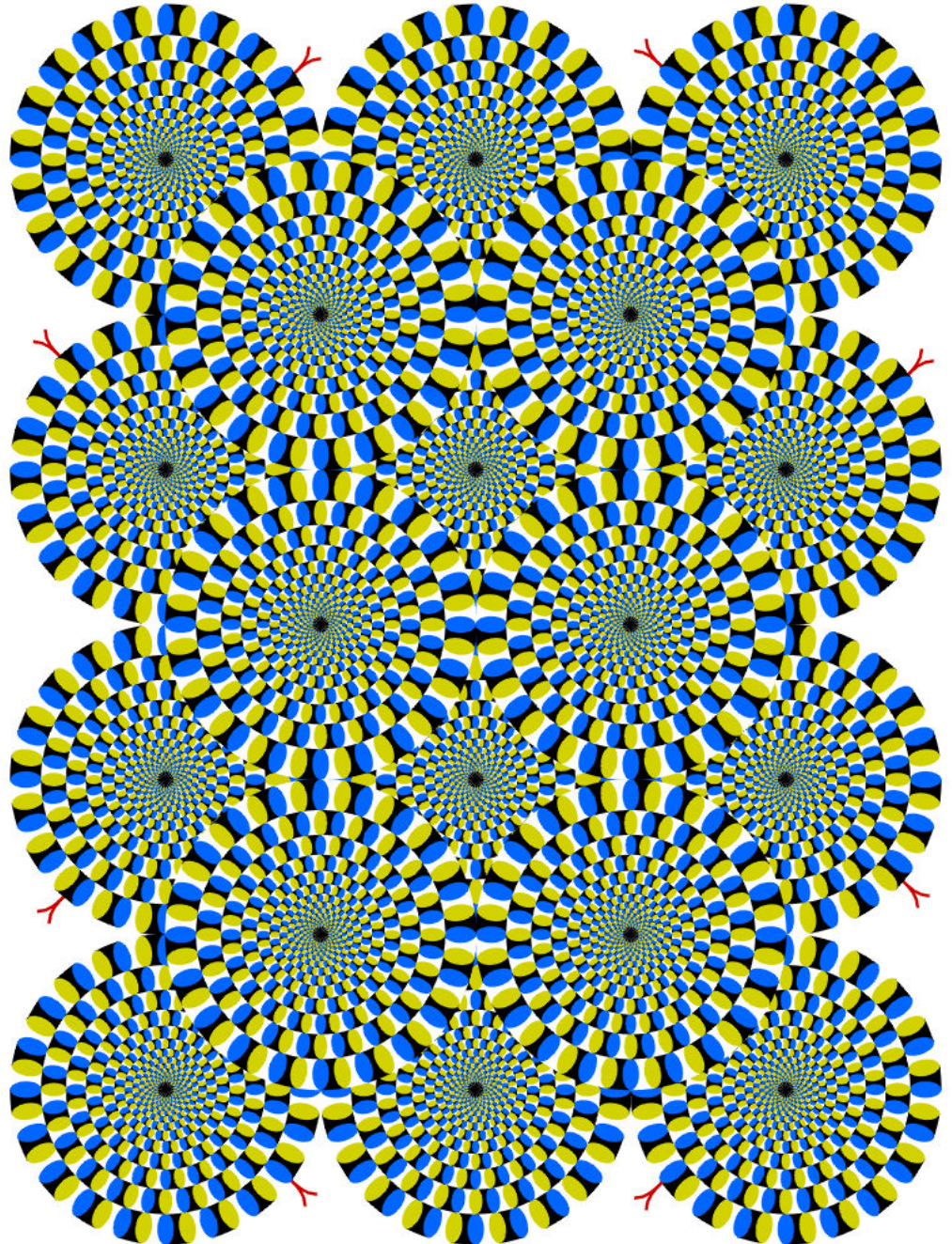


Abbildung 11.5.36: Periphere Drift Illusion: Beim Blinzeln oder anderen Augenbewegungen ergibt sich im peripheren Gesichtsfeld eine scheinbare Rotation der Kreise. Bild mit freundlicher Genehmigung von A.Kitaoka (Copyright September 2, 2003).

Ebenfalls sehr beeindruckend sind *Periphere Drift Illusionen* (siehe Abb. 11.5.36). Auch hier ist die korrekte Wahl der Helligkeiten von entscheidender Bedeutung für die Illusion. Bisher liegt keine wirklich überzeugende Erklärung vor. Einige empirische Ergebnisse können trotzdem angegeben werden. So ist die Bewegungsrichtung immer von schwarz über grau nach weiß gegeben. Helligkeitsschritte sind dabei günstiger als kontinuierliche Grauwertübergänge (vermutlich aufgrund der starken Kantenbetonung des menschlichen Sehens)²⁴ und fragmentierte Kurven führen im Vergleich zu ausgedehnten Flächen ebenfalls zu stärkeren scheinbaren Rotationen.

Periphere Drift Illusion: Induzierte Bewegung durch Helligkeitsschritte

Eine Erklärung geht von einer Kombination der Generierung transien-ter Signale durch Augenbewegungen und unterschiedlichen Prozessierungsgeschwindigkeiten unterschiedlich heller Signale aus.²⁵ Damit ergibt sich für dunklere Bereiche scheinbar eine andere Bewegung als für helle Bereiche.

Wir werden deshalb so leicht von Bewegungsillusionen getäuscht, weil unser Sehsystem insgesamt darauf ausgelegt ist, sehr empfindlich auf Bewegungen zu reagieren, denn bewegte Objekte sind zunächst potentielle Gefahrenquellen, Futter oder Paarungspartner. Diese Einstellung unseres Sehens hat natürlich ihren Grund in dem Überlebensvorteil, den sie uns (bzw. unseren Vorfahren) bietet. Nicht nur der Mensch, sondern auch die meisten Tiere reagieren sehr stark auf Bewegung. Sobald im peripheren Gesichtsfeld eine Bewegung stattfindet, wird diese registriert und wir richten unsere Aufmerksamkeit (und den Blick) auf das entsprechende, sich bewegende Objekt. Die dabei einsetzende Augenbewegung ist ballistischer Natur, d.h. einmal angeregt, muss die Bewegung zuende geführt werden. Ein Umentscheiden (z.B. weil nun in einem anderen Bereich des Sehfeld ein noch interessanteres Objekt entdeckt wurde) ist nicht möglich. Die Bewegung ist dabei so stark, dass es zu einem gewissen Überschießen kommt und dann noch nachfolgend mit einigen kleineren Sakkaden nachgeregelt wird. Die Zeitdauer für die Augenbewegung beträgt etwa $100 \text{ ms} + 5 \text{ ms} \cdot \phi$, wenn wir mit ϕ den zu überfahrenden Sehwinkel bezeichnen. Dadurch kommen erhebliche Zeiten zustande, während derer effektiv kein Bildsignal erfasst werden kann.²⁶

Bewegungsillusionen treten leicht auf, weil wir besonders stark auf Bewegungen reagieren

Bewegungen werden von unserem Sehsystem auch sinnvoll ergänzt. Dies ist natürlich bei der Betrachtung sich zeitlich ändernder Szenen schon deshalb notwendig, weil aufgrund der laufenden Augenbewegung nur ein lückenhafter Zeitverlauf von uns erfasst werden kann. Während der Augenbewegungen (sowohl während der unwillkürlichen feinen Muskelzuckungen als auch während der willkürlichen Änderung der Blickrichtung) fällt auf die Netzhaut zwangsläufig ein verschwommenes Bild, das nicht sinnvoll ausgewertet werden kann.

Sinnvolle Ergänzung von Bewegungen bzw. Modellbildung für Wirklichkeit

Natürlich haben wir nicht den Eindruck einer zeitlich diskreten, spunghaften Wahrnehmung. Die Welt um uns scheint sich kontinuierlich zu ändern wie ein Film, obwohl er aus diskreten Bildern besteht und scheinbar kontinuierlich abläuft.

Unser Gehirn generiert basierend auf der diskreten Wahrnehmung ein kontinuierliches Modell der Welt (vgl. Abschnitt 11.1). Erst dieses Modell „sehen“ wir vor unserem inneren Auge. Wenn beispielsweise ein Hund von rechts nach links läuft und kurz von einem Baum verdeckt wird, dann nehmen wir den-

²⁴A. Kitaoka et al., Vision 15, S. 261 (2003)

²⁵Perception 28, S. 617-612 (1999)

²⁶Ein Beispiel ist der Blick beim Autofahren hin zur Mittelkonsole und zurück. Hier ergeben sich Verzögerungen von mehreren hundert Millisekunden bis die Straße wieder „gesehen“ wird.

noch seine Bewegung als mit konstanter Geschwindigkeit wahr. Der Baum fällt uns gar nicht weiter auf. Der sichtbare Sprung der Bewegung (Hund wird am Punkt A unsichtbar und taucht nach einer gewissen Zeit am Punkt B wieder auf) wird als das gedeutet, was am wahrscheinlichsten ist, nämlich dass eben die gleichförmige Bewegung des Hundes kurzzeitig vom Baum verdeckt wurde.

Bewegungsillusionen lassen sich entsprechend auch so generieren, dass mehrere Wirklichkeiten gleich wahrscheinlich sind. Bei einem laufenden Wechsel der beiden Bilder in Abb. 11.5.37 wird scheinbar eine Rotation wahrgenommen. Die Richtung der Rotation ist allerdings nicht festgelegt und kann sowohl im Uhrzeigersinn als auch gegen den Uhrzeigersinn erfolgen (Sie können zwischen beiden willkürlich wechseln, genau wie sie auch bei statischen Mehrdeutigkeiten zwischen den verschiedenen Bildern wechseln können).

Mehrdeutige Bewegungen

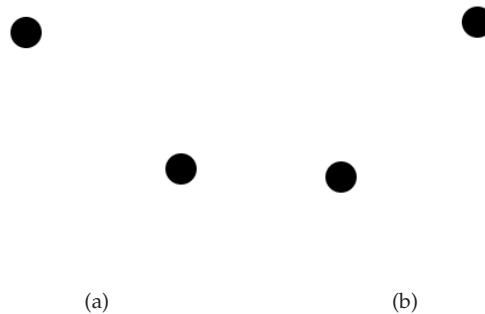


Abbildung 11.5.37: Mehrdeutigkeit bei Bewegung: Wenn diese Bilder in schneller Folge fortlaufend dargestellt werden scheint das Muster zu rotieren. Die Rotationsrichtung ist variabel.

Chronostasis: die erste Sekunde beim Blick auf die Uhr scheint verlängert zu sein

Die Zeitwahrnehmung unterliegt genau wie die Wahrnehmung statischer Szenen also einer Modellbildung des Gehirns. Erst das so entstandene Weltmodell wird von uns subjektiv wahrgenommen. Am Beispiel der *ruhenden Uhr* kann man ein weiteres Beispiel für diesen Zusammenhang sehen: Beim Blick auf eine Uhr mit Sekundenzeiger kommt es oft vor, dass die erste Sekunde, also bis der Zeiger zur nächsten Position (von Stellung 1 nach Stellung 2) springt, deutlich länger als eine Sekunde zu dauern scheint. Dieser Effekt wird *Chronostasis* genannt. Statistisch betrachtet dauert die erste Sekunde scheinbar ca. 1,2 Sekunden.²⁷

Wieder ist die Modellbildung des Gehirns für den Effekt verantwortlich. Während der Blick zur Uhr wandert wird die Netzhaut nicht ausgewertet bzw. die Nervensignale werden unterdrückt, da während des Bewegungsvorgangs ja – wie bereits erwähnt – lediglich ein unscharfes Bild auf die Netzhaut abgebildet wird.

Unser Gehirn muss aber auch für die Zeit während der kein optisches Sensorsignal zur Verfügung steht, ein konsistentes Weltmodell entwerfen. Es liegt nahe, dass die Lücke mit dem Bild gefüllt wird, das direkt nach der Lücke vorhanden ist. Konkret heißt das, dass für Sie der Uhrzeiger auch schon in der Stellung 1 war, *bevor* Sie ihn gesehen haben.

²⁷Natürlich scheint die Dauer bis zum Weiterspringen des Zeigers nicht länger zu dauern als eine Sekunde, wenn man kurz vor dem Umspringen des Zeigers auf die Uhr schaut. Siehe Yarrow et al. Nature 414, S. 302 (2001)

Ähnlich verhält es sich mit dem *Blinzeln*. Auch während des Blinzeln können Sie natürlich nichts sehen. Wenn Sie sich nicht auf das Blinzeln konzentrieren, werden Sie aber vom Blinzeln nichts bemerken.²⁸ Sie haben keine Wahrnehmungslücken.²⁹

Die Zeitwahrnehmung kann schon beim Menschen recht unterschiedlich sein. So kann uns in Extremsituationen der Zeitablauf extrem (subjektiv z.B. Faktor 10) verlangsamt erscheinen, um die Situation sinnvoll zu meistern (Beispiel Ausweichreaktion bei Autounfall). Das Gehirn schaltet hier also für kurze Zeit auf eine andere Zeitwahrnehmung um. Tiere, die auf sehr schnelle Reaktionen angewiesen sind können dementsprechend auch andere Zeitwahrnehmungen haben. Das Sehsystem der Fliege arbeitet z.B. mit 200 Hz und der evolutionäre Vorteil für die Fliege hierbei ist direkt klar.³⁰

Eine ganz andere Art von Bewegungstäuschung ist der *Wasserfall-Effekt*. Schon *Aristoteles* war bekannt, dass ein mehrere Minuten andauerndes Starren auf einen Wasserfall dazu führt, dass man danach bei Betrachtung einer unbewegten Szene eine scheinbare Bewegung in entgegengesetzter Richtung des Wasserflusses wahrnimmt. Die an sich statische Szene scheint also nach oben zu laufen.

Bereits im 19. Jahrhundert wurde von S. *Exner* die Hypothese vertreten, die Ursache für den Effekt liege in einer Erschöpfung der Nervenzellen, die die abwärtsige Bewegung der Szene repräsentieren. Die Auf- und Abwärtsbewegung wird im Gehirn durch unterschiedliche Neuronen repräsentiert. Eine ständige Erregung der Abwärts-Neuronen (Starren auf den Wasserfall) führt dazu, dass diese Zellen ermüden und daher weniger empfindlich werden. Dies ist analog zu *Nachbildern* (Abschnitt 10.3) zu sehen.

Fällt die Erregung der Abwärtszellen plötzlich aus, weil man nicht mehr den bewegten Wasserfall, sondern eine statische Szene betrachtet, dann führt die verringerte Erregung der Abwärts-Neuronen zu einer effektiven Aufwärtsbewegung. Die Abwärts- und Aufwärts-Neuronen werden zwar bei der statischen Szene zunächst gleich stark gereizt, aber aufgrund der unterschiedlichen Gewichtung beider durch die Ermüdung der Abwärts-Neuronen ergibt sich das Übergewicht für die Aufwärtszellen.³¹

Wenn das für das Bewegungssehen verantwortliche Areal MT/V5 ausfällt, kann die zeitliche Bildwahrnehmung empfindlich gestört sein. So wurde 1983 von J. Zihl, einem Münchner Neurologen, der Fall einer Patientin berichtet, bei der diese Region als Folge eines Aneurysmas ausgefallen war. Die Patientin konnte Bewegungen nicht sehen und sah z.B. beim Einschenken einer Tasse Tee einen eingefrorenen Strahl, der aus der Kanne kommt. Eine Abschätzung wann die Tasse voll war, war der Patientin dementsprechend ebenfalls nicht möglich.

Was passiert beim Blinzeln?

Wasserfall-Effekt: Laufende Bewegung auf der Netzhaut führt beim Ausbleiben zu einer Scheinbewegung

Die Zellen zur Detektion der Abwärtsbewegung ermüden

Eingefrorene Wahrnehmung bei Ausfall von MT/V5

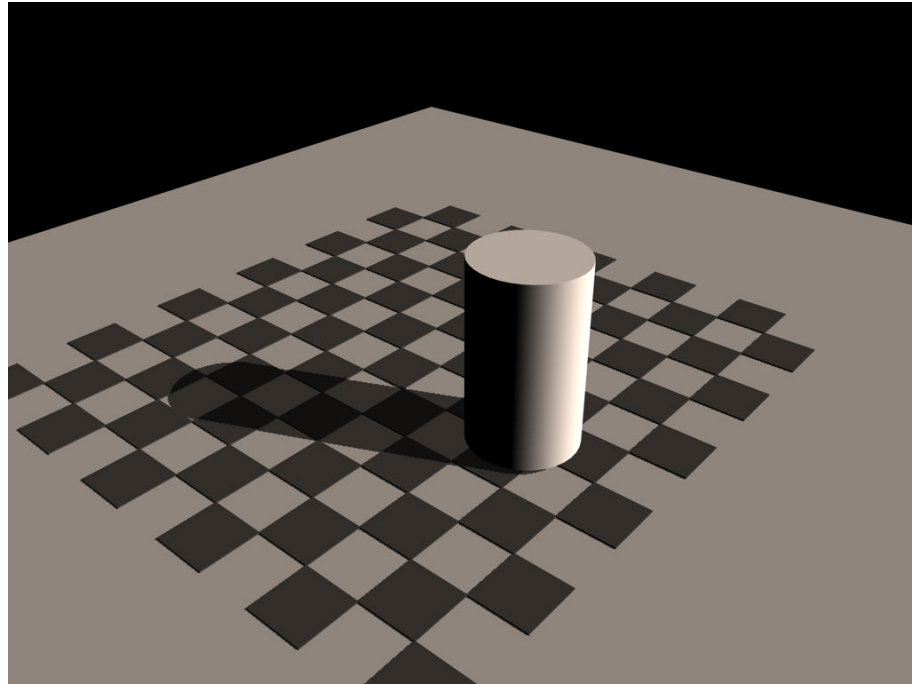


Abbildung 11.6.38: Die im Schatten liegenden hellen Flächen erscheinen heller als die im Lichtbereich liegenden dunklen Flächen. Im Bild sind die Flächen aber gleich hell.

11.6 Helligkeitswahrnehmung

Abb. 11.6.38 zeigt eine typische „Helligkeitstäuschung“. Sie werden wahrscheinlich den Eindruck haben, dass die hellen Flächen im Schattenbereich heller als die dunklen Flächen im beleuchteten Bereich sind. In Wirklichkeit sind beide Flächen gleich hell. Auch hier liegt das Sehsystem zwar rein auf das zweidimensionale Bild bezogen falsch, auf die dreidimensionale Szene bezogen, die dem Bild zugrunde liegt, ist die Deutung aber korrekt. Denn natürlich ist eben der Boden im hellen Bereich heller als im dunklen Bereich. Lediglich die (unwichtige) Beleuchtungsvariation durch den Schatten führt zu den geänderten Helligkeitsdetektionen. Das Modell, das unser Gehirn rekonstruiert, ist also wieder das korrekte Modell und eine Täuschung liegt eigentlich gar nicht vor.

Auch Nachbarschaften verändern die Helligkeitswahrnehmung (und auch die Farbwahrnehmung). Abb. 11.6.39 zeigt ein eindrucksvolles Beispiel. Hier werden die roten Kacheln im unteren Teil des Bildes aufgrund ihrer Nachbarschaft mit den dunklen blauen Kacheln als deutlich dunkler wahrgenommen als die Kacheln mit hellen Nachbarn. Der Effekt lässt sich ebenfalls bei Nachbildern beobachten. Nach dem Blick in eine starke Lichtquelle sehen Sie Nachbilder. Die Farbe dieser Nachbilder ändert sich massiv, wenn Sie eine weiße Fläche betrachten oder die Augen schließen (schwarzer Hintergrund). Beim Blinzeln ist der Effekt besonders deutlich zu sehen. Hier ist wieder wesentlich, dass Helligkeiten und Farben nicht rein lokal, sondern immer in Bezug zur Umgebung

Das Gehirn rekonstruiert ein Modell der Wirklichkeit und schätzt die Helligkeiten der Objekte korrekt

Nachbarschaften verändern die Helligkeitswahrnehmung

²⁸Current Biology 15, S. 1296

²⁹Wir blinzeln ca. 10 bis 15 mal pro Minute und das einzelne Blinzeln dauert ca. eine Zehntel Sekunde. Vögel lösen das Problem, dass beim Blinzeln die Welt plötzlich nicht mehr sichtbar ist, dadurch, dass sie nicht gleichzeitig mit beiden Augen blinzeln.

³⁰Insofern muss man vielleicht auch die geringe Lebenserwartung der Fliege anders bewerten.

³¹New Scientist Online, 30. August 2003

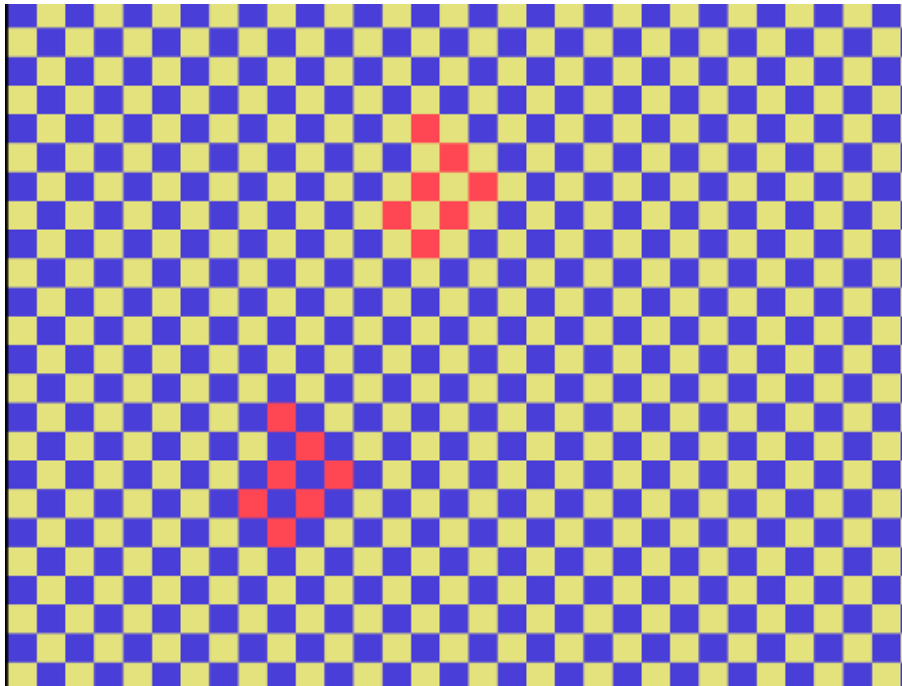


Abbildung 11.6.39: Die Umgebung beeinflusst die Helligkeitswahrnehmung: Alle roten Kacheln sind gleich hell. Farbtafel: 12.0.51

beurteilt werden (Farb- und Helligkeitsabgleich).



(a) Der vom bedeckten Himmel bestrahlte Schnee erscheint heller als der Himmel. Eine Überprüfung der Grauwerte im Bild zeigt, dass dies objektiv falsch ist.

(b) Ein im Schnee liegender Spiegel zeigt, dass der Himmel deutlich heller als der am Boden liegende Schnee ist.

Abbildung 11.6.40: Falsche Helligkeitseinschätzung

Schnee ist weiß

Besonders beeindruckend ist die „falsche“ Helligkeitswahrnehmung bei der Betrachtung von weißen Objekten bei bedecktem Himmel. In Abb. 11.6.40 ist eine typische Szene dargestellt. Selbst bei Betrachtung des Bildes gewinnt man den Eindruck, dass der Schnee heller als der Himmel ist. In natura ist der Effekt noch wesentlich stärker. Eine genaue Begutachtung der Grauwerte zeigt, dass dies nicht der Fall ist. Dies ist nicht verwunderlich. Bei einem maximal bedeckten Himmel kann aus Gründen der Energieerhaltung kein Objekt heller erscheinen als der Himmel. Optisch gesprochen: Die Leuchtdichte des Schnees muss kleiner als die Leuchtdichte des Himmels sein.

Man kann auch leicht (Abb. 3.7.31 b.) zeigen, dass in der Tat der Himmel heller ist. Hierzu legt man einfach einen Spiegel in den Schnee und kann so direkt benachbart den Schnee und den Himmel betrachten. In diesem Fall ist dann auch unserem Sehsystem klar, dass der Himmel heller als der vom Himmel bestrahlte Schnee ist.³² Dass wir uns so täuschen, hat unter anderem damit zu tun, dass wir „wissen“, dass Schnee extrem weiß ist („schneeweiß“). Genauso nehmen wir eine beleuchtete schwarze Scheibe vor einem tiefen schwarzen Hintergrund als weiß wahr (sogenannter „Gelb-Effekt“). Das Sehsystem führt also – genau wie bei der Farbkonstanz – eine Normierung durch.

Bekannt ist auch die in Abb. 11.6.41 dargestellte Illusion. Beide kleinen Kreisscheiben haben dieselbe Helligkeit. Trotzdem wirkt die Kreisscheibe links deutlich heller als die Kreisscheibe rechts. Man spricht von *simultane Helligkeitskontrast*.

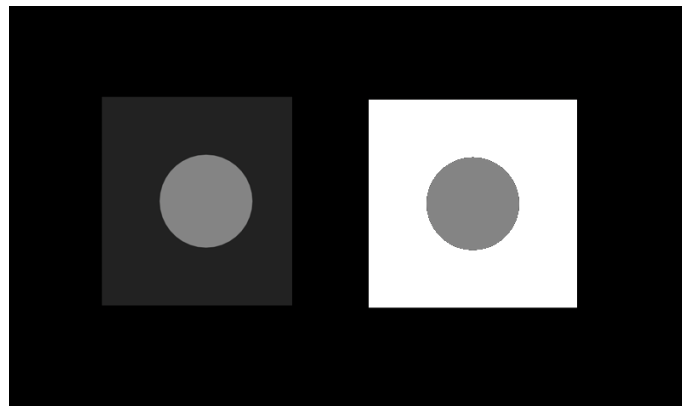


Abbildung 11.6.41: Simultane Helligkeitskontrast: Beide Kreise sind gleich hell, aber der linke Kreis erscheint heller.

Das Gehirn sucht wieder eine passende dreidimensionale Wirklichkeit für das Bild. Zwei unterschiedliche Modelle konkurrieren hierbei. Modell A geht von einer konstanten Beleuchtung aus. In diesem Modell sollten beide Kreisscheiben für uns dieselbe Helligkeit aufweisen. Unser Gehirn favorisiert aber stattdessen Modell B, das von einer inhomogenen Beleuchtung ausgeht. Die große Hintergrundfläche dominiert und daher gehen wir davon aus, dass die linke Fläche weniger stark beleuchtet wird (sonst wäre sie ja nicht so dunkel). Entsprechend wäre dann die linke Kreisfläche heller, wenn sie gleich stark wie die rechte Kreisfläche beleuchtet werden würde.

³²So ganz einfach ist die Sache in Wirklichkeit nicht, denn auch bei vollständig bedecktem Himmel ist der Zenith in der Regel heller als der Horizont (man neige den im Schnee liegenden Spiegel, um verschiedene Positionen des Himmels zu betrachten). Damit ist der Vergleich mit dem Himmelslicht nur eine Näherung. Der psychologische Grundeffekt bleibt allerdings bestehen (siehe auch Abb. 11.6.40).

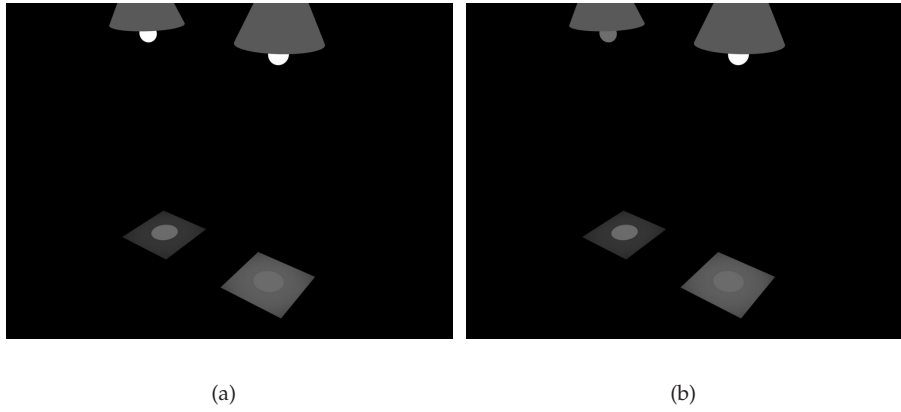


Abbildung 11.6.42: Zur Erklärung des simultanen Helligkeitskontrasts

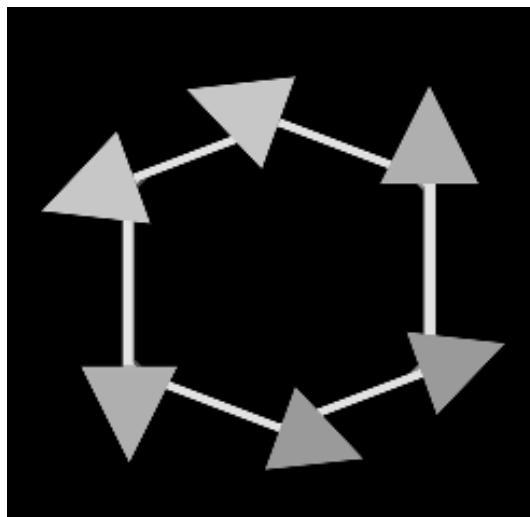


Abbildung 11.6.43: Achteck Illusion

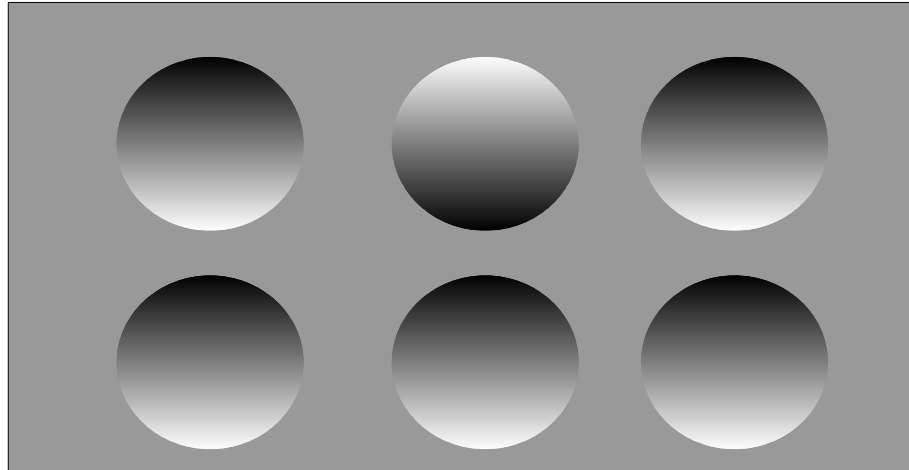


Abbildung 11.6.44: „Muffin Blech“: Das obere, mittlere Element scheint konvex zu sein.

Das *Muffin Blech* (Abb. 11.6.44) zeigt wieder, wie stark unser Sehen von der erlernten Erfahrung abhängt. Bei der Betrachtung der Figur werden Sie mit ziemlicher Sicherheit das mittlere, obere Objekt als konvex, also nach außen gebeult, und die restlichen Objekte als konkav sehen. Natürlich könnte es auch umgekehrt sein. Wenn die Beleuchtung aber von oben kommt, dann ist die erste der beiden Deutungen korrekt. In aller Regel kommt für uns Menschen die Lichtquelle in der Tat von oben (sowohl bei der Beleuchtung durch die Sonne als auch bei fast allen künstlichen Beleuchtungen), so dass auch hier unser Gehirn eine sinnvolle Deutung liefert³³.

Beleuchtungen kommen praktisch immer von oben

11.7 Farbeffekte

Ganz ähnlich wie beim simultanen Helligkeitskontrast ist unser Sehsystem auch in der Lage, unterschiedliche Farben einer Beleuchtung auszugleichen. Dies wurde bereits in Abschnitt 3.5 besprochen. Beim simultanen Helligkeitskontrast normieren wir praktisch auf eine (hypothetische) Lichtquelle, die – je nach Szene – unterschiedlich stark ist.

Farbkonstanz

Abb. 11.7.45 zeigt, wie auf die Farbe der Lichtquelle normiert wird. Obwohl die „weißen“ Flächen offensichtlich im Bild gelb sind, erscheinen sie uns „weiß“. Der Grund hierfür liegt auf der Dominanz von Gelb über die gesamte Szene. Das „weiß“ ist immerhin weniger „gelb“ als die „ganz gelben“ Flächen. Es ist vergleichsweise wahrscheinlich, vor allem da der Hintergrund auch leicht gelb ist, dass die leicht gelben Flächen und der Hintergrund farblos (weiß) sind und die Szene mit gelbem Licht beleuchtet wird.

Was ist die wahrscheinlichste Realität?

Bei der *Neon-Color-Illusion* (siehe Abb. 11.7.47) sieht der Beobachter im an sich weißen Hintergrund eine Färbung. Wahrgenommen wird also praktisch eine farbige, halbtransparente Scheibe, die einen Teil der Szene abdeckt und so die bunten Linien erklärt. Auch hier ist dies wieder die wahrscheinlichste aller Deutungen für die Szene.

³³Die Erfahrung, dass das Licht von oben kommt, lässt sich allerdings sehr schnell ändern und passt sich an die jeweiligen Gegebenheiten an, siehe Nature Neuroscience DOI: 10.1038/nn1312

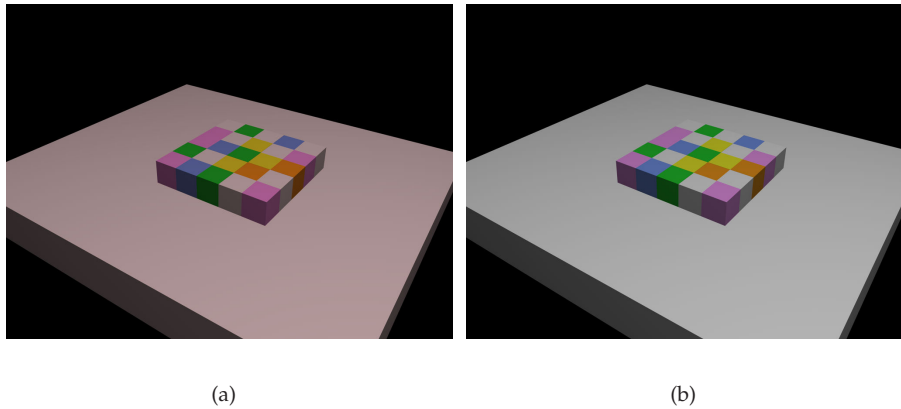


Abbildung 11.7.45: Farbkonstanz: Trotz unterschiedlicher Beleuchtung können wir die Grundfärbung der Flächen sehr gut beurteilen. Die scheinbare Täuschung („die Fläche ist nicht weiß, sondern gelb“) ist also keine echte Täuschung, sondern eine sinnvolle Deutung der Gesamtszene (inklusive Beleuchtung).

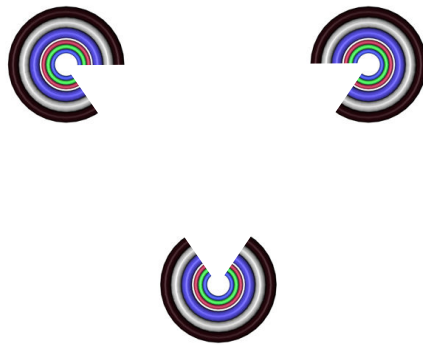


Abbildung 11.7.46: Kaniza Illusion

11.8 Magnetische Hügel

An sogenannten *magnetischen Hügeln* oder *Antigravitationshügeln* passiert scheinbar erstaunliches. An einigen Stellen auf der Welt kann man ein sehr beeindruckendes Phänomen beobachten: Gegenstände (Kugeln, Fahrzeuge im Leerlauf, usw.) scheinen sich entgegen der Schwerkraft nach oben zu bewegen.

Mehr als zwanzig Orte, an denen das Phänomen besonders beeindruckend beobachtet werden kann, sind weltweit bekannt.³⁴ Besonders beeindruckende Bilder werden in einem Artikel von P. Bressan gezeigt.³⁵

Das Phänomen hat natürlich weder etwas mit Magnetismus noch mit Antigravitation zu tun, sondern ist eine optische Täuschung. Zu dieser Täuschung kommt es, weil wir die Richtung der Gravitation falsch einschätzen. Wenn die

Keine Antigravitation sondern optische Täuschung

³⁴Directory of Magnetic Hills, <http://www.eureka4you.com/magnetichillworldwide>

³⁵Bressan et al. Psychological Science, Volume 14, S. 441-449 (2003)

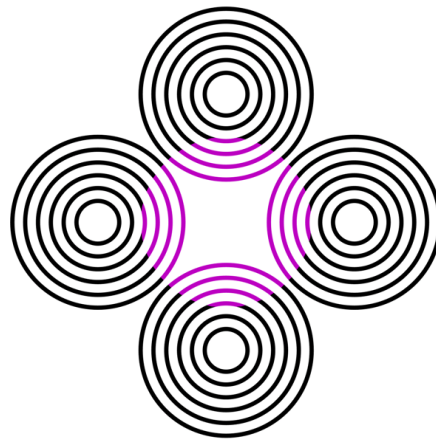


Abbildung 11.7.47: Neon Color Illusion

Straße exakt senkrecht zur Gravitation (also die Richtung zum Erdmittelpunkt) liegt, dann wirkt keine Hangabtriebskraft und die Kugel auf dieser Ebene rollt nicht (von selbst).

Die Richtung der Gravitation schätzen wir aber nicht etwa nur anhand der Gravitationskraft selbst (diese Informationsquelle steht uns bei der Betrachtung eines Bildes sowieso nicht zur Verfügung), sondern auch anhand visueller Eindrücke ab. Besonders wichtig ist dabei der Horizont. In einem Bild gibt der Horizont (zusammen mit der Beobachterposition) die Ebene senkrecht zur Gravitation an. Abb. 11.8.48 zeigt, wie eine Änderung (per Bildverarbeitung) des Hintergrunds, der im wesentlichen für die Schätzung des Horizonts verantwortlich ist, die scheinbare Steigung der Straße ändert.

Wenn der Fluchtpunkt von parallelen Linien in der Ebene der Straße, also z.B. die Fahrbahnmarkierungen, sich unterhalb des Horizonts befindet, dann scheint die Straße bergab zu laufen. Liegt er oberhalb, dann geht es bergauf.³⁶

Eine Täuschung tritt also immer dann auf, wenn der Horizont falsch eingeschätzt wird. Zusätzlich können aber auch noch andere visuelle Eindrücke die Schätzung des Horizonts bzw. der Gravitation beeinflussen. Laut Bressan ergibt sich:

- Wenn auf ein leichtes Gefälle ein starkes Gefälle folgt, dann wird das leichte Gefälle oft als leichter Anstieg gedeutet.
- Starke Steigungen rechts und links von der Straße führen zu einer Fehleinschätzung der Steigung der Straße.

11.9 Perspektiveneffekte

Bei der Schätzung von Längen tritt der Unterschied zwischen dreidimensionaler Realität und zweidimensionalem Bild besonders klar zu Tage. Ein einfach-

³⁶P. Bressan et al. Psychological Science, 14, 441-449, 2003



(a) Originalszene



(b) Hintergrund getauscht

Abbildung 11.8.48: Eine Änderung des Hintergrunds führt zu einer Änderung des scheinbaren Horizonts und damit zu einer scheinbaren Änderung der Steigung der Straße

es Beispiel zeigt Abb. 11.9.49. Die rote Linie (vorne) erscheint kürzer als die blaue Linie (hinten). In Wirklichkeit ist es genau umgekehrt.

Der Effekt kommt dadurch zustande, dass die blaue Linie weit vom Beobachter (bzw. der Kamera) entfernt ist. Nach den Grundsätzen der Perspektive (siehe Abschnitt 2.3.13) werden zwei gleich lange Linien unterschiedlich groß auf die Netzhaut abgebildet, wenn sie in unterschiedlicher Entfernung liegen. Das Sehsystem hat diesen Zusammenhang natürlich gelernt. Daher werden zwei auf der Netzhaut gleich lange Linien als unterschiedlich lang wahrgenommen, wenn sie in unterschiedlichem Abstand vom Beobachter liegen. Genau dies ist in Abb. 11.9.49 der Fall.

Bekannt ist auch die *Müller-Lyer Pfeiltäuschung* (siehe Abb. 11.9.50). Die Pfeilspitzen führen den Betrachter zu der Annahme, dass die linke Seite eine konkave und damit weit entfernte Kante ist. Die rechte Seite zeigt dagegen eine Kante, die auf uns zu gerichtet – also nah – ist. Dementsprechend führt die Umrechnung wieder zum Eindruck, dass die rechte Linie länger als die linke Linie ist. Die perspektivische Darstellung suggeriert eine Tiefe.

Ausschlaggebend ist also, dass wir sehr stark von rechten Winkeln umgeben sind und daher diesen perspektivischen Zusammenhang gelernt haben. Für

Die Perspektive führt dazu, dass Längenvergleiche im Bild anders ausfallen als Längenvergleiche im Raum

Zulus unterliegen nicht der Müller-Lyer Pfeiltäuschung

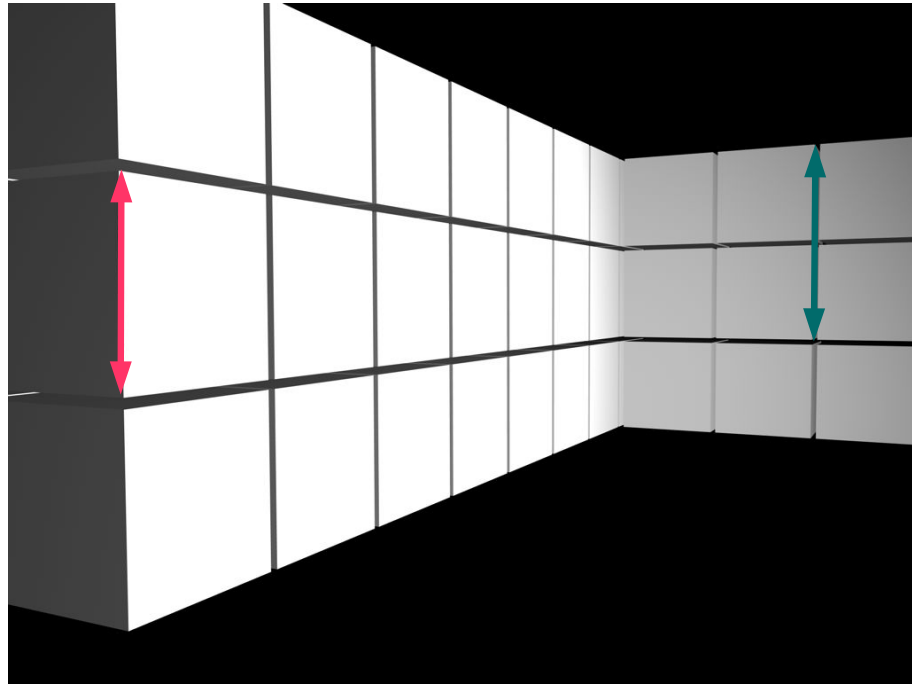


Abbildung 11.9.49: Die rote Linie erscheint kürzer als die blaue. In Wirklichkeit ist die blaue Linie kürzer.

diese Erklärung spricht auch die Tatsache, dass Zulus, in deren Leben praktisch nur runde Formen (runde Häuser) eine Rolle spielen und deren Umgebung daher nicht durch rechte Winkel dominiert wird, der Täuschung nicht unterliegen.

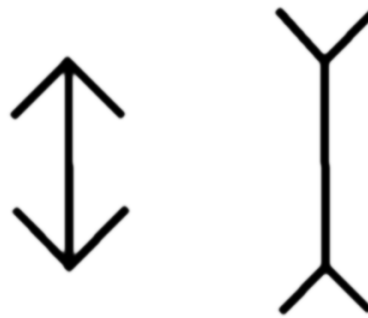


Abbildung 11.9.50: Müller-Lyer Pfeiltäuschung

Die *Krümmungsillusion* zeigt sich auch bei der Betrachtung von Spiegeln oder Linsen. In der Regel kann der Krümmungsradius der Flächen nicht sinnvoll eingeschätzt werden bzw. der Schätzwert variiert massiv mit der Größe des Elements.

Mit der Perspektive verbunden ist ebenfalls die *Zöllner Illusion* (Abb. 11.9.53). Die zu der Hauptdiagonalen des Quadrats parallelen Linien scheinen gegeneinander verkippt zu sein. Viele Abwandlungen zu dieser Täuschung existieren. Ein Beispiel zeigt Abb. 11.9.54. Im oberen Teil der Abbildung tritt wieder die Illusion auf. Die beiden Balken scheinen nicht zueinander parallel zu sein. Im unteren Teil der Abbildung wurde die Schraffur unter 45° ausgeführt. Dadurch verschwindet die Illusion. Entscheidend für die Täuschung sind also die kleinen Linienelemente (Abb. 11.9.53 bzw. die Schraffur aus kleinen Linien in Abb. 11.9.54).

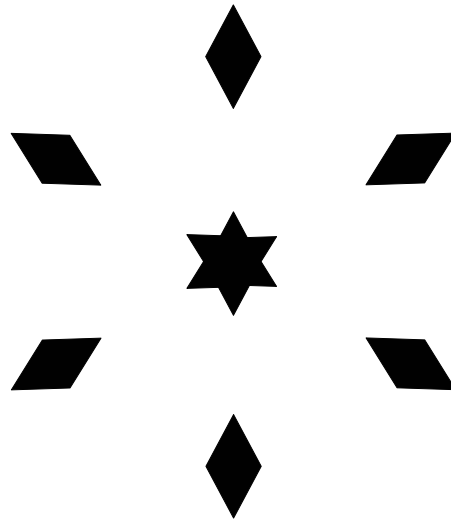


Abbildung 11.9.51: Variationen der Müller-Lyer Pfeiltäuschung, bei der der Effekt nochmals deutlich verstärkt ist (nach Tolansky). Der Abstand zwischen den Rautelementen und den Sternspitzen entspricht der Rautelementlänge.

Die *Zöllner Illusion* und eine ganze Reihe weiterer bekannter Illusionen (s.u.) lassen sich durch eine sehr einfache Regel begründen: *Spitze Winkel werden als weniger spitz wahrgenommen als sie im Bild sind*. Dies macht perspektivisch betrachtet durchaus Sinn, denn rechte Winkel (und von diesen sind wir vorrangig umgeben) erscheinen im Bild auf der Netzhaut (oder im Foto) verkleinert so dass das Gehirn bei der Betrachtung entsprechender Winkel eben auf einen in der dreidimensionalen Welt größeren Winkel schließt.

Auch die *Hering Täuschung* (siehe Abb. 11.9.55) und die *Poggendorf Illusion* (siehe Abb. 11.9.57) lassen sich durch diese Regel zwanglos erklären.³⁷

Bei der *Ebbinghaus Illusion*, die auch unter dem Namen *Titchener Kreistäuschung* bekannt ist (siehe Abb. 11.9.58), schätzt man die Größe der zentralen Kreise fälschlicherweise als unterschiedlich ein. Kleine benachbarte Kreise führen also dazu, dass der zentrale Kreis größer erscheint. Es zeigt sich hier eine Eigenschaft der menschlichen Wahrnehmung, die sehr oft zu Tage tritt: Unterschiede werden verstärkt. In diesem Fall werden die Größenunterschiede verstärkt.

Wenn man die Formen variiert (z.B. nur Sechsecke, im Zentrum ein Dreieck und im Randbereich Quadrate usw.) zeigt sich, dass der Effekt umso stärker ist, je ähnlicher die inneren und äußeren Elemente sind. Dies ist nicht verwunderlich, denn es macht Sinn, dass das Sehsystem zwischen ähnlichen Elementen eher Vergleiche anstellt. Ebenso variiert die Illusion auch mit der Helligkeit der Linien und mit der Anzahl der induzierenden Randelemente.³⁸

³⁷Für Details und Abwandlungen zur Poggendorf Illusion siehe <http://www.leinroden.de/305why.htm>.

³⁸D. Rose, P. Bressan, *Spatial Vision* 15, 191 (1002)

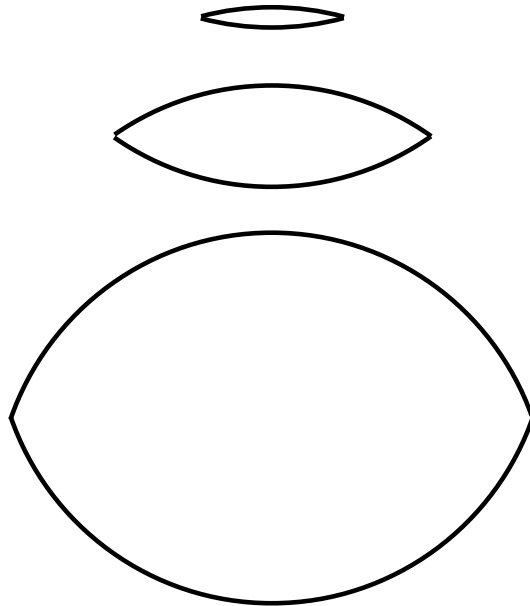


Abbildung 11.9.52: Krümmungssillusion: Alle drei Linsen haben denselben Krümmungsradius.

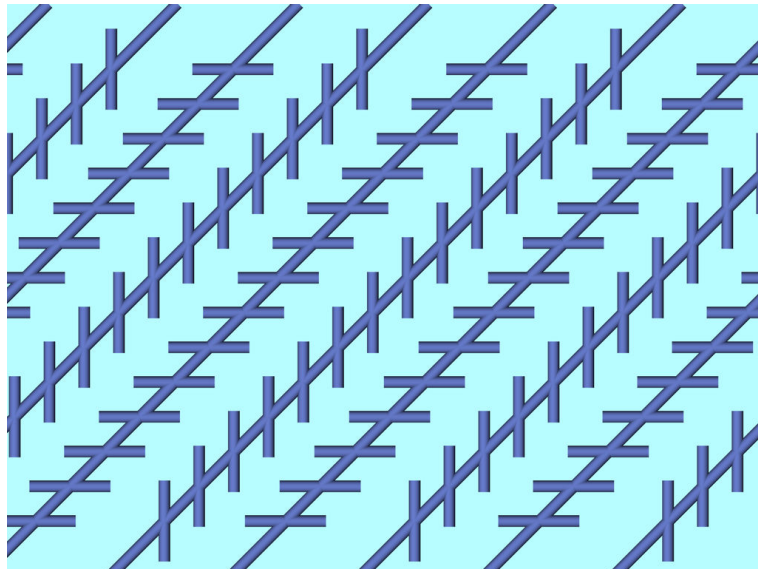


Abbildung 11.9.53: Variationen der Zöllner Illusion: Im oberen Bild ergibt sich keine Illusion, weil der Winkel der Schraffur ungefähr 45° beträgt und damit nicht flach genug ist. Im unteren Bild führt die Schraffur dagegen zur Illusion eines gekippten Balkens.



Abbildung 11.9.54: Zöllner Illusion

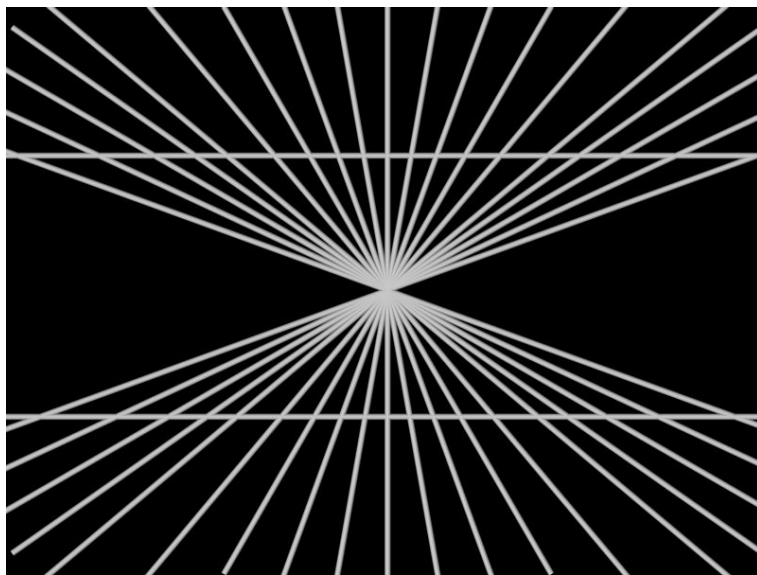


Abbildung 11.9.55: Hering Täuschung: Die beiden Horizontalen scheinen durchgebogen zu sein.

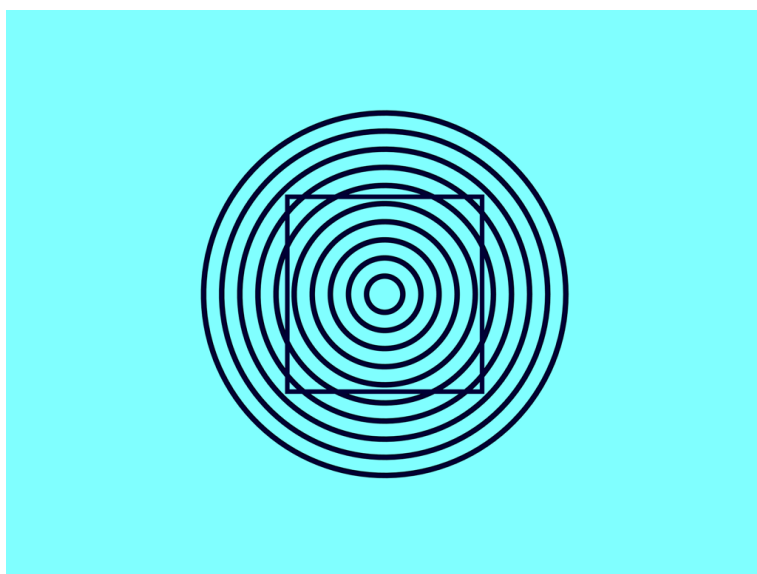


Abbildung 11.9.56: Abwandlung der Hering Täuschung: Das Quadrat scheint eingedellt zu sein.

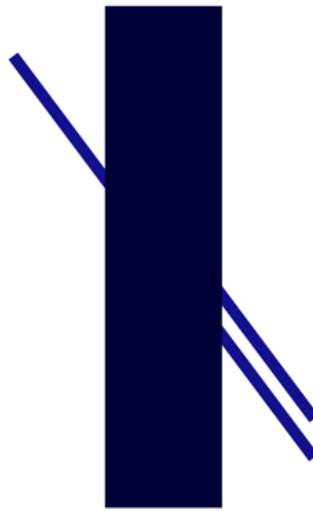


Abbildung 11.9.57: Poggendorf Illusion: Die Fortsetzung der linken Linie wird falsch eingetzt.

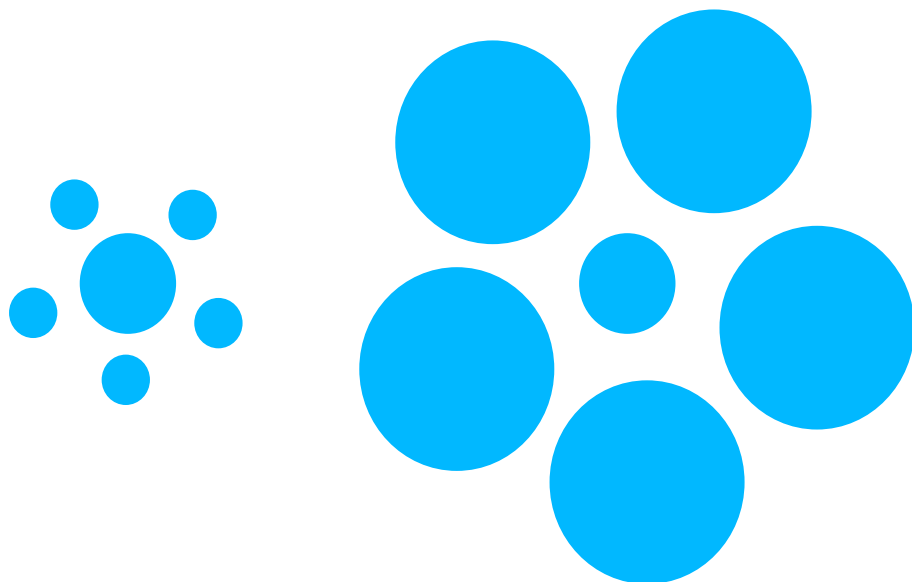
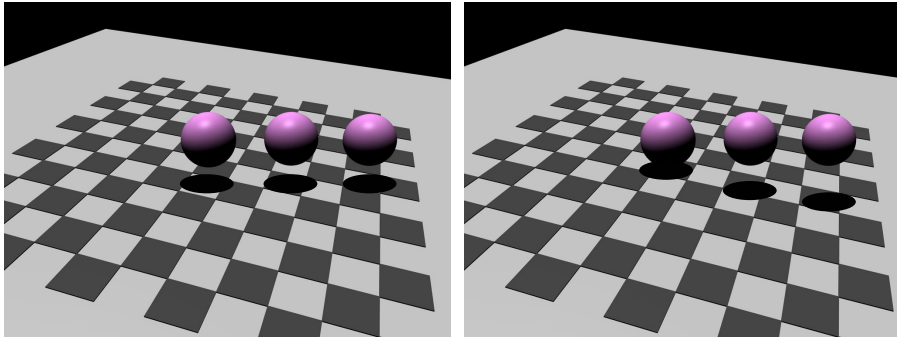


Abbildung 11.9.58: Titchener Kreistäuschung: Beide zentralen Kreise sind gleich groß.



(a) Schatten 1

(b) Schatten 2

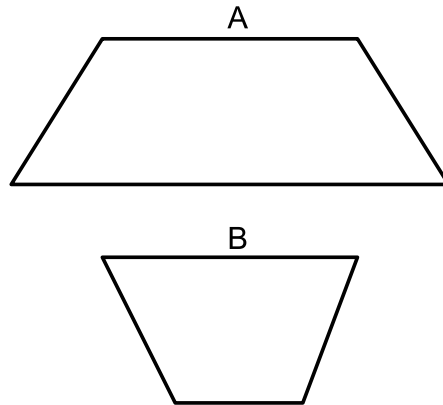
Abbildung 11.9.59: Eine Änderung der Schatten führt zu einer Änderung der Deutung

Bei der *Horizontal-Vertikal Täuschung* ergibt sich der Eindruck, dass vertikale Ausdehnungen größer als an sich gleich große horizontale Ausdehnungen sind. Ein berühmtes Beispiel ist der *Gateway Arch* in St. Louis, der genau 192 m hoch und 192 breit ist. Der Eindruck ist allerdings ein ganz anderer (siehe Abb. 11.9.60).

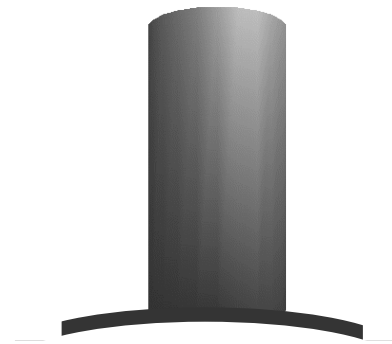


Abbildung 11.9.60: Gateway Arch in St. Louis. Das Bauwerk ist 192 m hoch und 192 m breit. Foto mit freundlicher Genehmigung von C. Haase, www.arrakeen.ch

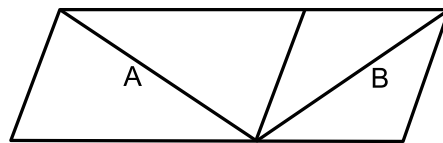
Die Illusion entspricht im Zweidimensionalen der *Bisektionsillusion*, die bereits seit 1863 bekannt ist. Zwei aufeinander senkrecht stehende, gleich lange Geraden erscheinen unterschiedlich lang. Wenn man die Länge der Geraden dagegen so wählt, dass der Beobachter den Eindruck hat, dass sie gleich lang sind, differieren sie um mehr als 20%. In Abb. 11.9.61 ist unter anderem eine Variation der Illusion, die *Top-Hat Illusion*, gezeigt.



(a) A und B sind gleich lang



(b) Der Hut ist gleich hoch wie breit (Top-Hat Illusion)



(c) A und B sind gleich lang



(d) Die äußere Form ist ein Quadrat

Abbildung 11.9.61: Längenillusionen

Kapitel 12

Weiterführende Literatur

Insbesondere im Internet findet man eine Vielzahl hervorragender Seiten zu den hier vorgestellten Themen. Es lohnt sich also in jedem Fall dort (möglichst auf Englisch) zu suchen, wenn man weitere Informationen oder schöne Bilder und Beispiele zu den Phänomenen sucht.

Auch in Buchform sind einige sehr schöne Bücher (leider ebenfalls meist auf Englisch) verfügbar:

- M. Minnaert: „Light and color in the open air“, Dover 1954
Ein sehr preiswerter Klassiker, voll mit allen möglichen optischen Phänomenen. Vom Preis–Leistungsverhältnis her betrachtet unschlagbar. Teilweise (selten) sind die Erklärungen etwas fragwürdig bzw. überholt. Von Springer gibt es eine Neuauflage unter dem Titel „Light and Color in the Outdoors“. Insgesamt mit mehr Bildern und schönerem Layout, aber auch deutlich teurer.
Es gibt auch eine deutsche Version „Licht und Farbe in der Natur“, erschienen im Birkhäuser Verlag, die wohl (ich habe sie selbst bisher nicht gelesen) die Erklärungen auf einen neueren Stand bringt.
- D. K. Lynch, W. Livingston, „Color and Light in Nature“, Cambridge University Press 2001
Ein wunderschönes Buch zu optischen Phänomenen, insbesondere im Bereich der atmosphärischen Optik. Letztlich werden die wichtigsten Phänomene, die auch im Minnaert besprochen werden, hier ausführlich und vor allem mit sehr schönem Bildmaterial dargestellt.
- D. Falk, D. Brill, D. Stork, „Seeing the light“, Wiley 1986
Ansprechend gestaltetes Optikbuch, das seinen Schwerpunkt auf optische Erscheinungen legt. Es existiert auch eine deutsche Version („Ein Blick ins Licht“), die aber leider nur noch antiquarisch verfügbar ist.
- M. Vollmer, „Lichtspiele in der Luft“, Spektrum Akademischer Verlag.
Zum Thema Atmosphärenoptik sehr zu empfehlen. Insbesondere sind dort viele Details zu finden und die Darstellung der Atmosphärenoptik ist deutlich ausführlicher und in die Tiefe gehend als es mir in diesem Buch möglich wäre.
- R. Casati, „Die Entdeckung des Schattens“, Berliner Taschenbuch Verlag 2003.

Ein sehr lesenswertes Buch, in dem insbesondere auf die Kulturgeschichte des Phänomens Schatten eingegangen wird. Die Optik steht dabei nicht im Vordergrund.

- A. Woo, P. Poulin, A. Fournier: „A Survey of Shadow Algorithms“, IEEE Computer Graphics and Applications 10, S. 13, 1990

Der Artikel gibt einen Überblick über bekannte Verfahren zur Berechnung von Schattenverteilungen. Da die Berechnung von Schatten sehr kompliziert bzw. aufwendig ist, eine realistische Darstellung aber gleichzeitig von großer Bedeutung für den realitätsgetreuen Eindruck einer Szene ist, sind Berechnungsverfahren für Schatten ein wichtiger Forschungsgegenstand im Bereich „Computer Grafik“.

- K. Nassau: „Experimenting with Light and Color“ Color“, G. Bell and Sons Ltd., 1997.

Ein wunderschönes Buch über Farbe. In sehr kurzer Form wird ein umfassender Überblick über die Entstehung von Farben gegeben. Das Verhältnis Inhalt zu Seitenzahl ist beeindruckend hoch. Zielgruppe sind eigentlich eher Schüler, so dass das Buch sehr angenehm zu lesen ist.

- K. Nassau: „The physics and chemistry of color“, Wiley 2001

Ein sehr lesenswertes und umfassendes Werk über die Grundlagen der Farbe. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht auf der Optik sondern auf der physikalischen und chemischen Farbentstehung.

- A. Seckel: „The great book of Optical Illusions“, Firefly books, 2002. Sehr schöne Bilder optischer Täuschungen, leider ohne Erklärung. Al Seckel hat sehr viele schöne Bücher zum Thema optische Täuschung herausgegeben.

- M. Luckiesh: „Visual Illusions“, Dover 1965. Etwas angestaubt aber dennoch lesenswert.

- S. Tolansky, „Optical Illusions“, Pergamon Press 1964
Besprechung geometrischer Illusionen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf Illusionen, die bei wissenschaftlichen Anwendungen zu Fehlinterpretationen führen können.

- Simon Ings, „The Eye: A Natural History“, Bloomsbury Publishing 2007.

- www.meteoros.de

Eine ausgezeichnete Seite mit sehr vielen Informationen und Bildern zum Thema Atmosphärenoptik.

- www.paraselene.de

Ebenfalls ein sehr schöner Überblick optischer Phänomene mit vielen erstklassigen Bildern zum Thema Atmosphärenoptik.

- C. F. Bohren: „Clouds in a Glass of Beer“, Dover 1987. Sehr schönes und gut zu lesendes Buch mit dem Schwerpunkt „Streuung“ in der Atmosphäre.

- S.W. Smith: „The Inner Light Theory of Consciousness“. Ein eBook, das Sie frei im Internet abrufen können und das sehr schön die Theorie der „Wahrnehmung als Modell der Wirklichkeit“ beschreibt. Lesenswert!

- E. Hecht: „Optik“, empfehlenswertes allgemeines Optiklehrbuch.

- D. Kühlke: „Optik“, Verlag Harry Deutsch, 1998. Ausgezeichnetes Einführungsbuch für die eher technisch orientierte Optik.
- G.A. Agoston: „Color Theory and Its Application in Art and Design“, Springer 1979.
- C.A. Padgham, J.E. Saunders: „The Perception of Light and Color“, G. Bell and Sons Ltd., 1975.
- Spektrum der Wissenschaft Spezial: Farben

Index

Index

- 22°-Halo, 148
46°-Halo, 151
Ölfilm, 165
Übergangsmetall, 47
Überlappintegral, 253
überzähligen Bögen, 191
- Abbildungsmaßstab, 15
Absorption, 46, 68
additive Farbmischung, 55
Airlight, 82
Akkommodation, 242
Alexanders dunkles Band, 118
Alexandrit, 54
Algen, 48
Alpenglühen, 81
Ameisen, 45
Ames Raum, 264
Anableps, 99
anisotrope Kristalle, 67
Anticrepuscular rays, 26
Antigravitationshügel, 295
Antireflexbeschichtung, 165
Antisolarpunkt, 30
Arago Punkt, 206
Argonkugel, 229
Aristoteles, 289
arktischer Fuchs, 64
Armbanduhr, 204
Atropin, 247
außerordentlicher Strahl, 208
Aufheller, 230
Augenbrauen, 248
Augenempfindlichkeit, 222
Augenlider, 248
Aureole, 110
Aurora Borealis, 235
- Babinet Prinzip, 185
Baby, 247
Bakterien, 231
Batterie, 67
Bedeutungsperspektive, 22
Beleuchtungsstärke, 253
Belladonna, 247
Benham Illusion, 255
- Benham Scheibe, 255
Berührungsbögen, 151
Bergschatten, 23
Beugung, 168
Beugung an Gittern, 178
Beugungseffekte, 52
Biene, 245
Bienen, 45, 214
Bier, 69
bildseitige Hauptebene, 16
Binokularität, 19
Biochrome, 64
Biolumineszenz, 232
Bisektionsillusion, 303
Bishopscher Ring, 189
blaue Augen, 82
Blickkontakt, 247
blinder Fleck, 258
Blinks, 89
Blinzeln, 289
Blitz, 227
Blitz aus heiterem Himmel, 227
Blitzeinschlag, 236
Blitzen, 225
Boltzmann Konstante, 221
Bravaisbogen, 151
Brechung, 94
Brechungsgesetz, 96
Brechzahl, 42, 94
Brennpunkt, 108
Brennweite, 108
Brockengespinst, 25
Brownsche Röhre, 230
- Caféhaus Illusion, 272
Calcium-Kupfer-Silikat, 51
Camera Obscura, 15
Castles in the sky, 105
Chamäleon, 65
Chemolumineszenz, 232
Chrom, 47
chromatische Aberration, 98
Chromatophore, 64
Chronostasis, 288
Ciliare Korona, 188
Cornea, 241

- Crepuscular Rays, 26
 Cyphochilus, 87

 Dämmerungsstrahlen, 26
 dünne Schichten, 160
 Daumennägel, 196
 Deflektometrie, 133
 Depth from Defocus, 19
 Depth from Focus, 19
 Diamant, 47
 Dichroismus, 216
 dichromatische Farbmischung, 234
 Diffusionsflamme, 224
 Dimensionsanalyse, 74
 Disparität, 19
 Dispersion, 97
 Doppelbrechung, 208
 Doppelspaltanordnung, 194
 Drachenfisch, 233
 Drahtgitterpolarisator, 203
 Dunkeladaption, 254
 Dunst, 89

 Ebbinghaus Illusion, 299
 Edison, 224
 Edwin Land, 61
 Eindringtiefe, 49
 Einweg-Fotoblitze, 225
 Eisenoxid, 51
 Eismirage, 104
 Elektrochrome Filter, 67
 Elektrolumineszenz, 233, 235
 Elmsfeuer, 236
 Energieerhaltung, 253
 Enigma-Illusion, 281
 Entladungslampen, 229
 Erdblitze, 227
 Euler-Lagrange Gleichung, 106
 ewiges Licht, 228
 Exner, 289

 Facettenaugen, 245
 Farbdrucke, 55
 Farbeindruck, 54
 Farbfernsehen, 55
 Farbfotografie, 55
 Farbkonstanz, 61
 Farbkreis, 55
 Farbmodell, 61
 Farbstoffe, 57
 Farbtemperatur, 225
 Farbunterschiede, 64
 Fata Morgana, 105
 Fechner Gesetz, 252
 Fechner-Farben, 255

 Fermatsches Prinzip, 94
 Feuerwerkskörper, 225
 Fische, 45
 Fischeschwärme, 233
 Flächenblitz, 227
 Flüssigkristalldisplays, 204
 Flüssigkristalle, 65
 Flammentests, 225
 Fliege, 241
 Floaters, 249
 Fluchtpunkt, 20
 Fluoreszenz, 230, 233
 Fotometrie, 253
 fotometrische Größen, 253
 fovea centralis, 243
 Fraunhofer Beugung, 176
 Freiheitsstatue, 47
 Frequenz, 41
 Fresnel, 170
 Frisch, 214
 Frosch, 52
 Funkeln der Sterne, 109

 Gardinen, 137, 172
 Gardineneffekt, 252
 Gasbrenner, 224
 Gateway Arch, 303
 Gegendämmerung, 80
 Gegendämmerungsstrahlen, 26
 Geißler, 229
 Geißlersche Röhre, 229
 gelber Fleck, 243
 Geldscheine, 231
 gesättigte Farben, 55
 Gesichter, 261
 Gewitter, 225
 Glühbirne, 224, 252
 Glühemission, 229
 Glühwürmchen, 232
 Glaskörper, 250
 Gletschersee, 48
 Glorie, 188
 Gold, 49
 Goldfische, 45
 Größentäuschung, 264
 Granulation, 196
 Graphit, 68
 Grauer Star, 250
 Guanin-Kristalle, 52

 H₂O, 48
 Höhenmessung, 31
 Hagel, 89
 Haidinger Brush, 213

- Halbschatten, 8
Halogenlampe, 225
Hauptblitze, 226
Hauptebene, 108
Helicone, 51
Hering Täuschung, 299
Hering-Gitter, 276
Hermann, 276
Hermann Gitter, 276
Highway Mirage, 103
Hillingar Effekt, 104
Hohlmaske, 263
Horizontal-Vertikal Täuschung, 303
Horizontalkreis, 151
hormonelle Änderung, 64
Hornhaut, 241
Hunde, 166
Huygens, 158
Hydrochrome Stoffe, 67
- Indigo, 51
Infrarot, 45
inkohärente Überlagerung, 162
Interferenz, 52
Interferenzpigmente, 165
Interferenzterm, 162
Iris, 248
Irisierende Wolken, 189
Irismuskel, 247
Irrlichter, 236
- Käfer, 166, 214
kalt, 56
Kammerwasser, 242
Kanten, 260
Kantendetektion, 276
Kantenvestärkung, 272
Kathodolumineszenz, 230
Katze, 112
Katzen, 166, 245
Kaustiken, 143
Kernschatten, 8
Kerze, 224
Kerzen, 223
Kimmung, 104
Kirchturmspitzen, 236
Klapperschlangen, 45
Kochsalz, 47
kohärente Überlagerung, 193
Kohärenzlänge, 194
Kohärenzzeit, 194
Komplementärfarben, 56
Kompression, 67
- Kondensstreifen, 27
Konversionsfaktor, 253
Konversionsschicht, 234
Korona, 184
Koschenille-Schildlaus, 51
Kosinus-Gesetz, 31
Krümmungsillusion, 298
Kranz, 184
Kristallstruktur, 47
Kugelblitz, 236
Kugelwelle, 160
Kupfer, 47
- Labradorisieren, 165
Ladezustandsanzeige, 67
Land, 204
Laplace Filter, 279
laterale Hemmung, 278
laterale Inhibition, 277
laterale Mirage, 105
Leitblitz, 226
Leitfähigkeit, 49
Leuchtdichte, 253
Leuchtdioden, 233
Leuchtende Nachtwolken, 91
Leuchtfolien, 235
Leuchtschicht, 229
Leuchtstofflampen, 229
Leuchtzeiger, 228
Leukofarbstoffe, 65, 66
Lichtausbeute, 220
Lichtemittierende Kondensatoren, 235
Lichtfluss, 253
Lichtgeschwindigkeit, 42
Lichtsäule, 145
Lidschlag, 248
lineare Polarisierung, 200
Linienblitze, 227
Linse, 241
Lochkamera, 15
Luftspiegelungen, 102
Lumen, 253
Lumineszenz, 228
- Müller-Lyer Pfeiltäuschung, 297
Mach-Effekt, 280
magnetische Hügel, 295
Makula lutea, 243
Maus, 112
Mehrdeutigkeit, 266
Melanine, 52
Metallbedampfung, 49
Metalldampflampen, 230

- Metallen, 49, 68
 Metamere, 54
 Mie–Streuung, 84
 Mineralien, 48, 231
 Mirage Inferior, 102
 Mirage Superior, 104
 Mirages, 102
 Moire, 34
 Mondbogens, 118
 Mondhof, 184
 Mondillusion, 264
 Mood–Rings, 65
 moon dogs, 147
 Muffin Blech, 294
 Muscae Volitantes, 249

 Nachbarschaft, 268
 Nachbild, 256, 289
 Nachtblindheit, 246
 NaCl, 47
 Natriumdampflampen, 229
 Nebel, 89
 Nebelbögen, 121, 193
 Nebenmonde, 147
 Nebensonnen, 145
 Necker Würfel, 266
 Neon, 229
 Neon–Color–Illusion, 294
 Neonfischen, 167
 Neonröhren, 229
 Netzhaut, 42, 240, 242
 Neugeborene, 262
 Neugeborenen, 247
 Newton, 55
 Nickhaut, 248
 Nitrate, 225
 Nordlicht, 235
 Notbeleuchtungen, 228
 Novaya Zemlya Effekt, 105

 Oberflächeneffekt, 68
 objektseitige Hauptebene, 16
 Oktopusse, 215
 Once in a blue moon, 91
 Oppositionseffekt, 30
 optische Täuschungen, 258
 Ouchi Illusion, 283
 Oxalat, 232
 Oxidschichten, 165

 Pareidolia, 263
 Path radiance, 82
 Patina, 47
 Penumbra, 8
 Periphere Drift Illusionen, 287

 Perlmutter, 165
 perspektivische Abbildung, 20
 Pfau, 179
 Pfaufedern, 166
 Pferde, 166
 Phasenänderung, 66
 Phosphoreszenz, 230
 photochrom, 67
 Photon, 41
 Photonen, 158
 photonischen Kristallen, 178
 Piezochromismus, 67
 Pigmente, 51
 Pilze, 232
 Plancksche Wirkungsquantum, 41
 Plancksches Strahlungsgesetz, 221
 Plasmafrequenz, 49
 Pleochroismus, 67
 Poggendorf Illusion, 299
 Pointillismus, 55
 Poissonsche Fleck, 170
 Polarisation, 200
 Polarlichtern, 235
 Prisoner’s cinema, 251
 psychologische Farbwirkung, 64
 psychologische Grundfarben, 62
 Pulfrich Effekt, 254
 Pulver, 69
 Pupille, 244, 247, 261
 Pupillen, 247
 Pupillenweitung, 248
 Purkinje Reflex, 249
 Purkinje–Baum, 258
 Purkinje–Effekt, 250
 Purpur, 51
 Purpurlicht, 80
 Pyramiden Illusion, 273

 quadratisches Abstandsgesetzes,
 253
 Quantenmodell, 158
 Quecksilberdampf, 229, 230

 Radiometrie, 253
 radiometrischen Größen, 253
 Raumanzug, 49
 Rayleigh–Streuung, 48, 73
 reflektierende Sonnenbrillen, 49
 Reflexion, 69
 Reflexions–Regenbögen, 119
 Reflexunterdrückung, 165
 Regenbogenhaut, 248
 Regenschirme, 172
 Reptilien, 45

- Retina, 41, 240, 242
Retinex Farbtheorie, 61
Rettungswesten, 230
rezeptive Felder, 278
Rhodopsin, 250
rote Augen-Effekt, 112
Rotgrünblindheit, 44
Rußbildung, 224
Rubin, 47
ruhende Uhr, 288
- Sättigung, 54
Säugetiere, 45
Sakkaden, 249
Salze, 69
Saphir, 47
Sauerstoff, 235
Schäume, 69
Schattenbereich, 61
Schattenmoire, 6
Schiffsmasten, 236
schillernde Farben, 166
Schlangen, 45, 52
Schmetterlinge, 166
Schnee, 69
Schrimps, 45
Schwalbenschwanz-Schmetterling,
45
schwarzer Strahler, 221
Schwefel, 48, 229
Searchlight-Effect, 33
Sedimente, 48
Seifenblase, 160
Sekundärbogen, 118
Shape from Shadow, 6
Sicherheitsanwendungen, 231
Silber, 49
silbernen Rand, 89
simultaner Helligkeitskontrast, 292
Sklera, 261
Skorpione, 241
Sonne, 223
Sonnenuntergang, 61
Sonnenwind, 235
Sonolumineszenz, 228
Spalt, 172
Speckle, 196
spectre of the Brocken, 25
spektrale Empfindlichkeit, 250
Spinnen, 166, 214
Sprache, 255
Springspinnen, 245
St. Elmo, 236
Stäbchen, 42, 242
- Stearin, 224
Stefan-Boltzmann-Gesetz, 221
Stereo-Vision, 19
Stickstoff, 235
Stiere, 45
Straßenlaternen, 229
Strahlenmodell, 157
Streifenprojektion, 24
Stromsparlampen, 229
Strukturdoppelbrechung, 215
struktureller Farbe, 52
subtraktive Farbmischung, 57
sun pillar, 145
sundogs, 145
supernumeraries, 191
Swan, 224
Synthetische Farben, 51
Szintillation, 109
szintillierendes Gitter, 276
- Tapetum lucidum, 166
telezentrische Abbildung, 21
Thermochroismus, 65
Thermolumineszenz, 228
Thomson Effekt, 261
Tiefseebewohner, 232
Tiefseefische, 45
Tintenfisch, 65, 215
Titchener Kreistäuschung, 299
Top-Hat Illusion, 303
Totalreflexion, 231
Towering, 105
Tränenflüssigkeit, 248
transversale Welle, 158, 199
Triangulationsverfahren, 19
Tribolumineszenz, 229
Turmalin, 216
- U-Boot, 233
Umbra, 8
Umov Effekt, 203
unpolarisiertes Licht, 200
Unwetter, 89
Usambara Effekt, 59
- Vögel, 45, 52
Venusgürtel, 80
Vieraugenfisch, 99
violett, 54
visuelle Spannung, 56
Visus, 242
Vulkanausbrüche, 189
- Wüstenmirage, 103
Waldbrand, 189

Wale, 166
warm, 56
Waschmittel, 230
Wasser, 48
Wasserfall-Effekt, 289
Weber Gesetz, 252
weiß-glühendes, 64
Weißabgleich, 61
Wellenlänge, 41
Wellentheorie, 158
Wimpern, 248
Winkelauflösung des Auges, 242
Wolfram, 224
Wolken, 89

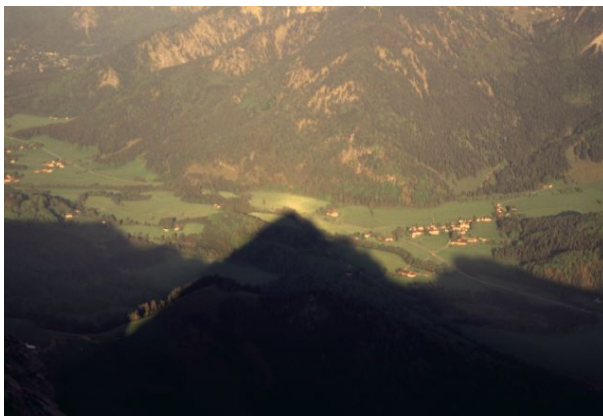
Young, 43, 158, 195

Zöllner Illusion, 298, 299
Zapfen, 42
zeitliche Kohärenz, 194
Ziliarmuskeln, 242
Zinksulfid, 235
Zirkonium, 225
zirkular polarisierte, 200
Zirkumzenital Bogen, 151
Zodiaklicht, 77
Zuckerlösung, 216
Zuckerschichten, 210

Farbtafeln:



(a) Neigung der Auffangebene



(b) Bergschatten des Wetterscheins (und Oppositionseffekt),
Foto mit freundlicher Genehmigung von Claudia Hinz

Abbildung 12.0.1: Perspektiveneffekte bei Schatten: Die Auffangebene schneidet aus dem dreidimensionalen Schattenvolumen einen Ebene aus.



Abbildung 12.0.2: Brockengespinst: Lediglich der Schatten des Beobachters/Fotografen ist sichtbar. Schatten anderer Personen verschwinden. Zusätzlich ist eine Glorie (Beugungseffekt) sichtbar. Foto mit freundlicher Genehmigung von Ken Scott, www.touchingthelight.co.uk

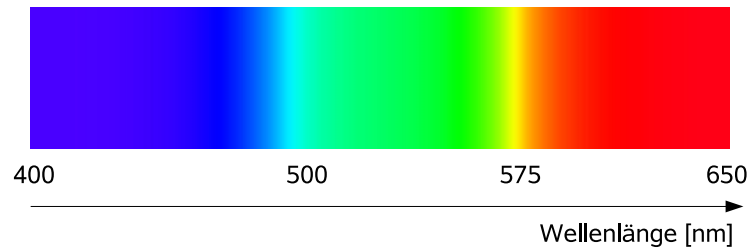


Abbildung 12.0.3: Zuordnung Farbe zu Wellenlänge. Beachte: Der Farbeindruck ist schwierig zu reproduzieren (einerseits wegen der Darstellung auf einem trichromatischen Monitor/Drucker, andererseits wegen der Helligkeitsvariation).

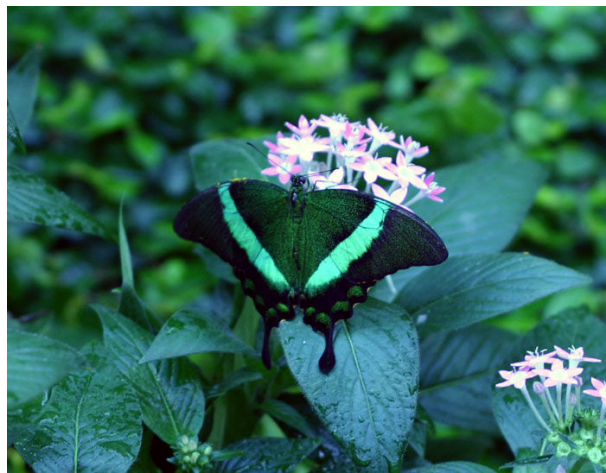


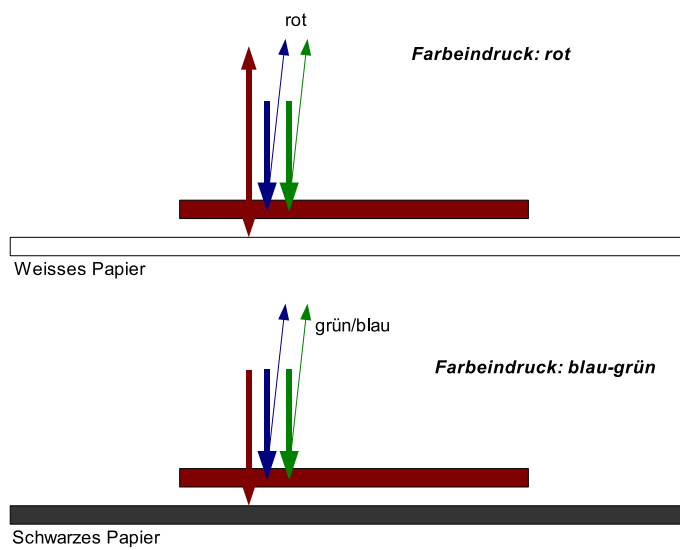
Abbildung 12.0.4: Der Schwalbenschwanz-Schmetterling (hier ein grüngestreifter Schwalbenschwanz) verfügt über fünf Farbkanäle. Im Gegensatz hierzu hat der Mensch lediglich drei (Rot, Grün, Blau) unterschiedliche Farbdetektoren.



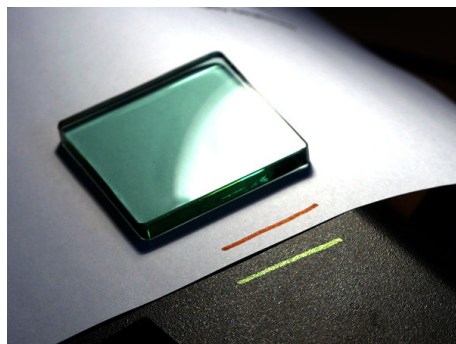
Abbildung 12.0.5: Der Hope Diamant. Foto mit freundlicher Genehmigung von Diva Eva.



Abbildung 12.0.6: Eis und Wasser absorbieren leicht im roten Spektralbereich und sind daher bei genügender Dicke blau, Foto mit freundlicher Genehmigung von Adam Stein.



(a) Prinzip



(b) roter Filzstift



(c) blauer (vermutlich als Warnung gegenüber Feinden) Pfeilgiftfrosch

(d) grüne (vermutlich zur Tarnung) Schlange

Abbildung 12.0.7: Grüne Frösche und Schlangen sind aufgrund der subtraktiven Farbmischung (blau und gelb) grün. Dabei wird das Blau durch Rayleigh Streuung generiert (vgl. Kapitel 4). Wenn das gelbe Pigment fehlt, lässt sich auch blau generieren.

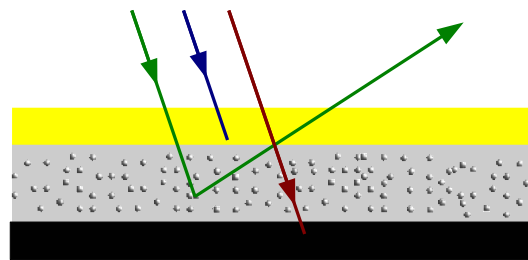


Abbildung 12.0.8: Das Grün der meisten Tiere entsteht durch subtraktive Farbmischung von gelben Pigmenten mit blau-grüner Rayleigh Streuung. Blaues Licht wird in der gelben Pigmentschicht absorbiert. Rotes Licht wird vom schwarzen Untergrund absorbiert. Lediglich grünes Licht wird ausreichend häufig gestreut und nicht von der gelben Schicht absorbiert.

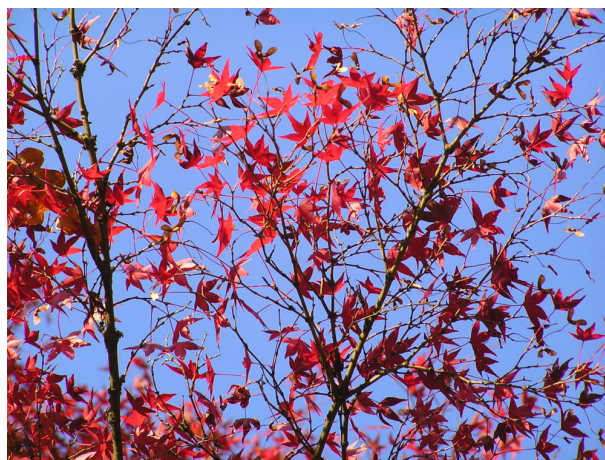


Abbildung 12.0.9: Im Herbst werden die Blätter rot oder braun. Grund hierfür ist das rote Anthocyanin, das dafür sorgt, dass das wertvolle Chlorophyll nicht zu stark bei schlechten Umgebungsbedingungen belichtet und damit zerstört wird.

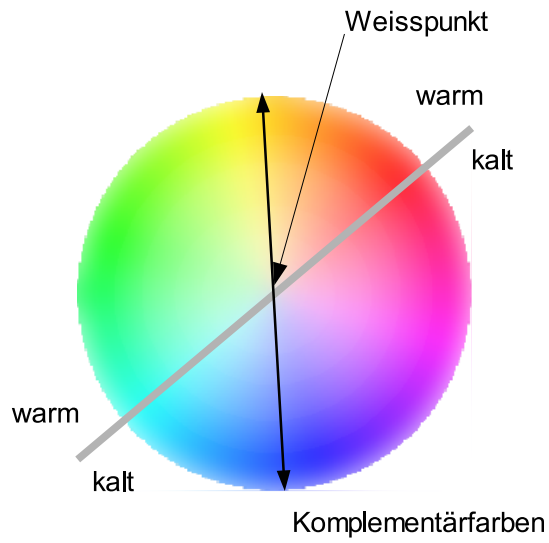
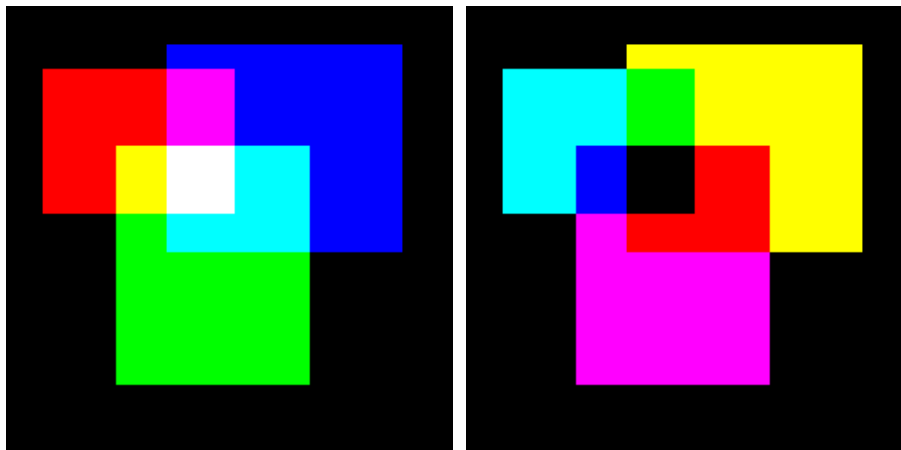


Abbildung 12.0.10: Newtonscher Farbkreis: Komplementärfarben liegen auf gegenüberliegenden Punkten des Kreises. Im Zentrum des Kreises befindet sich „weiß“. Die Farbsättigung nimmt also zum Zentrum der Kreisscheibe ab.



(a) additiv (z.B. Farb-Fernseher)

(b) subtraktiv (z.B. Wasserfarben)

Abbildung 12.0.11: Farbmischungen



(a) Ohne Weißabgleich

(b) mit Weißabgleich

Abbildung 12.0.12: Sowohl in technischen Systemen (Foto) als auch beim Mensch findet ein Weißabgleich statt.



Abbildung 12.0.13: Spielzeug ist nicht umsonst meist in den vier psychologischen Grundfarben gehalten: Die Unterscheidung dieser Farben gelingt aufgrund der neuronalen Verschaltung in der Retina besonders gut.

INDEX



Abbildung 12.0.14: Gelbe Sonnenbrillengläser führen (teilweise) subjektiv kaum zu einer Helligkeitsreduktion und führen zu Kontrastverbesserung bei Objekten vor blauem Hintergrund (z.B. Himmel).



(a) Mood-Ring (Interferenz an Flüssigkristallschichten)



(b) Mood-Ring, Temperatur 2



(c) Mood-Ring, Temperatur 3

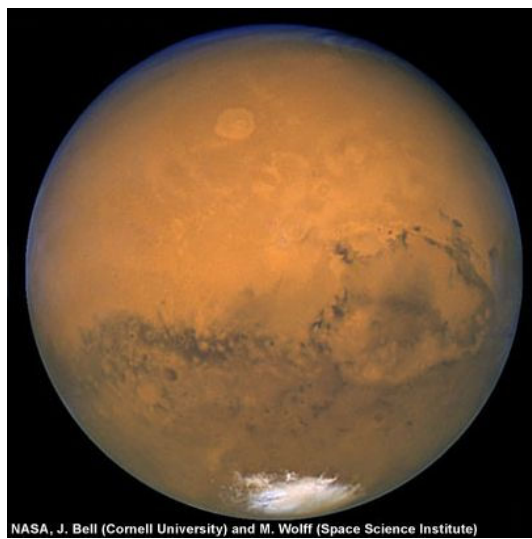


(d) Batterietester (Phasenänderung in Leukofarbstoffen)

Abbildung 12.0.15: Änderung der Farbe bei Temperaturvariation (Thermochromismus)



(a) Der Himmel ist auf vielen Aufnahmen rot bzw. bräunlich



(b) Aus dem Weltall sieht man die äußeren blauen
Atmosphärenbereiche

*Abbildung 12.0.16: Ist der Himmel auf dem Mars rot? Rayleigh-Streuung ist auch auf dem Mars vorhanden, die Absorption (Eisenoxid) dominiert aber oft die Gesamtfarbe.
Fotos: NASA*

INDEX



Abbildung 12.0.17: Erdschatten in Richtung der Gegendämmerung. Der Schatten der Erde wird sichtbar, sobald die Sonne unterhalb des Horizonts liegt. Foto mit freundlicher Genehmigung von Marko Riikonen, www.ursa.fi/riikonen/



Abbildung 12.0.18: Venusgürtel: Ein rosa/violettes Band in Richtung der Gegendämmerung wird beim Sonnenuntergang sichtbar. Es handelt sich um eine Überlagerung von roten (Sonnenuntergang) gestreuten Photonen und doppelt-gestreuten blauen Photonen aus höheren Luftschichten. Foto mit freundlicher Genehmigung von Christine Churchill.



Abbildung 12.0.19: Purpurlicht: Überlagerung von mehrfach gestreutem blauen Licht und den roten Photonen des Sonnenauf/untergangs. Der Effekt ist besonders stark sichtbar, wenn (Großstadtnähe) viele stark streuende große Partikel in der Luft vorhanden sind.



Abbildung 12.0.20: Alpenglühen: Das rote Licht des Sonnenuntergangs wird an weit entfernten Bergen reflektiert. Foto mit freundlicher Genehmigung von Michael Kunze, www.michaelkunze.de



(a) Rauch (Ziegen nicht beachten!)



(b) Blaue Augen, Foto mit freundlicher Genehmigung von Mark Kochanowicz (©2005)

Abbildung 12.0.21: Beispiele für Rayleigh Streuung

INDEX

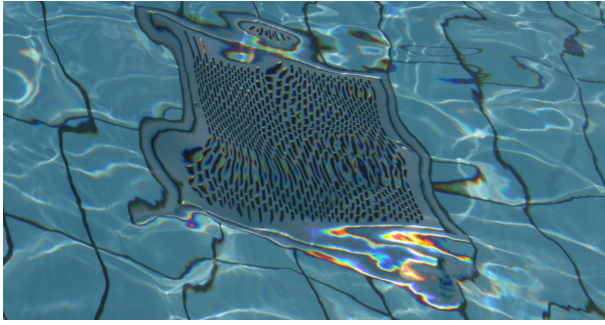


Abbildung 12.0.22: An Wasserwellen gebrochene Lichtstrahlen führen zu interessanten Helligkeitsmustern am Boden des Gewässers. Sichtbar sind auch die „chromatischen Aberrationen“ als Farbsaum der Lichtmuster.



Abbildung 12.0.23: Der „Rote-Augen-Effekt“: Bei der Fotografie mit Blitzlicht wird die gut durchblutete Netzhaut sichtbar. Die weiten Pupillen (Dunkelheit) lassen viel (Blitz)licht eindringen, das an der Netzhaut zurück in Richtung Kamera reflektiert wird.



Abbildung 12.0.24: Primärer und sekundärer Regenbogen sowie Aufhellung im Innern des Hauptregenbogens, mit freundlicher Genehmigung von Ian Britton, www.freefoto.com



Abbildung 12.0.25: Roter Regenbogen beim Sonnenuntergang



Abbildung 12.0.26: Kombination von Regenbogen und Gegendämmerungsstrahlen. Die Gegendämmerungsstrahlen laufen auf den Antisolarpunkt zu.

INDEX



Abbildung 12.0.27: Hauptbogen, Sekundärbogen und Reflexionsbogen, mit freundlicher Genehmigung von Ann Bowker, <http://www.madaboutmountains.com>



Abbildung 12.0.28: Nebelbogen, Foto mit freundlicher Genehmigung von K. Kaiser, <http://home.eduhi.at/member/nature/default.htm>

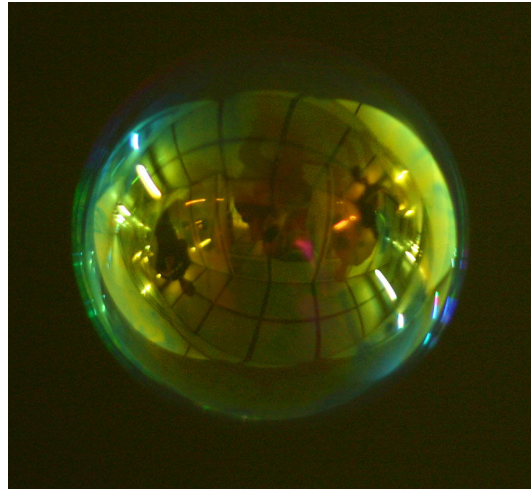


Abbildung 12.0.29: Eine Seifenblase kann gleichzeitig als Konvex- und Konkavspiegel dienen. Entsprechend sieht man gleichzeitig ein aufrechtes und ein invertiertes Bild. Eines der beiden Bilder ist dabei (eine entsprechend geringe Tiefenschärfe vorausgesetzt) leicht unscharf).



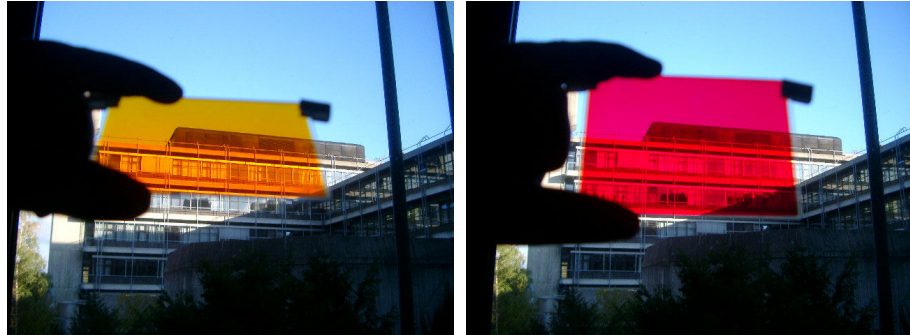
Abbildung 12.0.30: Die Farbe von Wasser wird im wesentlichen durch die Farbe der darin gespiegelten Szene bestimmt. Dadurch entspricht die Farbe des Wassers meist der Farbe des Himmels. Wenn kaum Wellen vorhanden sind, sind auch die Helligkeit von Spiegelung und Himmel annähernd gleich. Foto mit freundlicher Genehmigung von W. Gorski.



Abbildung 12.0.31: Bravaisbogen Bogen (Zirkumzenital Bogen)



Abbildung 12.0.32: Mehrere Halos gleichzeitig, Foto mit freundlicher Genehmigung von Marko Riikonen, <http://www.ursa.fi/riikonen/>



(a) Orientierung 1

(b) Orientierung 2

Abbildung 12.0.33: Interferenzfarben am Beispiel eines Interferenzfilters: Durch die Reflexion an Vorder- und Rückseite an dünnen Schichten ergibt sich eine – je nach Wellenlänge und Einfallswinkel – konstruktive oder destruktive Überlagerung und damit eine Verstärkung oder Abschwächung.



(a)

(b)

Abbildung 12.0.34: Zwei schillernde Käfer, Bilder mit freundlicher Genehmigung von Walter Müller.



(a) Haliotis iris

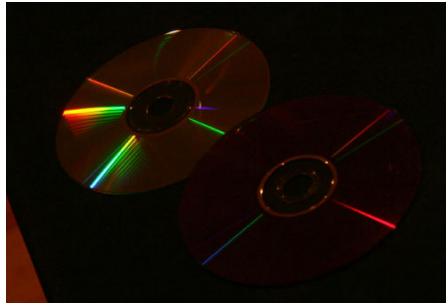


(b) Öl auf Strasse, Foto mit freundlicher Genehmigung von Jason Eppink

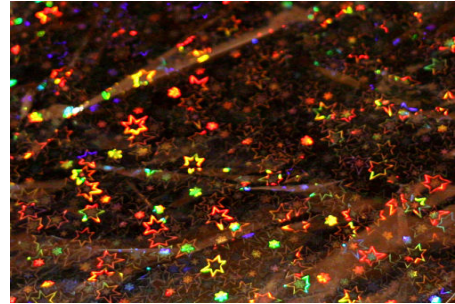


(c) Reflexion von Fischschuppenm

Abbildung 12.0.35: Einige weitere Interferenzeffekte



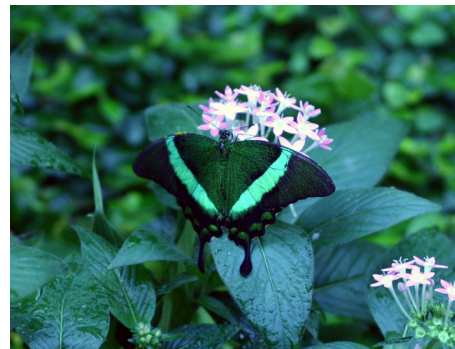
(a) Beugung an Compact Discs



(b) Beugung an den Gittern eines Geschenkapiers



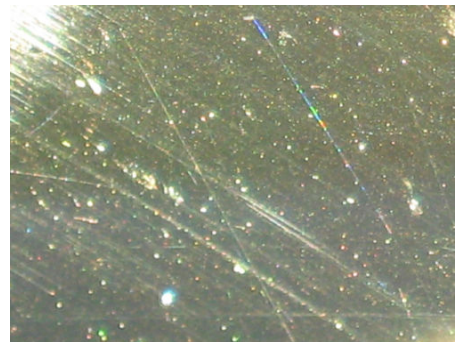
(c) Beugung am Gitter (eines Damenstrumpfes). Die Gitterorientierung ist dabei variabel. Ein ähnlicher Effekt wird bei sehr feinen Gardinen oder Regenschirmen beobachtet.



(d) Schwalbenschwanz-Schmetterling



(e) Ein Öltropfen auf dem Flügel ändert die Interferenzbedingung (andere Brechzahl) und statt blau wird grün reflektiert, Foto mit freundlicher Genehmigung von P. Vukusic.



(f) Beugung an Kratzern auf einer Scheibe

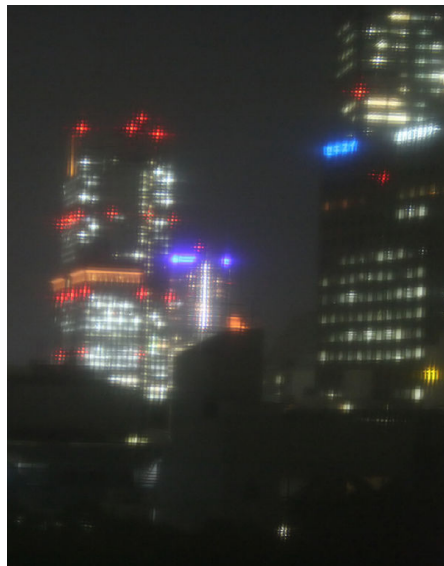
Abbildung 12.0.36: Verschiedene Beugungseffekte



Abbildung 12.0.37: Beugung am Gitter einer Vogelfeder.



(a) ohne Vorhang



(b) mit Vorhang

Abbildung 12.0.38: Beugung am Gitter eines Vorhangs



Abbildung 12.0.39: Korona um den Mond, Foto: Tom Ruen, dieses Bild basiert auf dem Bild Lunarcorona.jpg aus der freien Enzyklopädie Wikipedia.

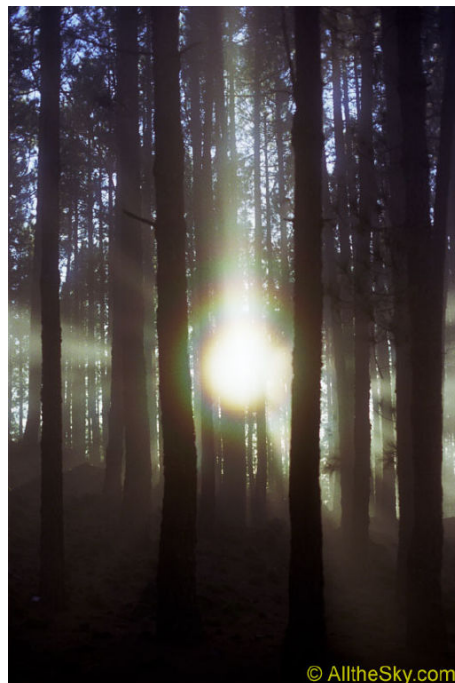


Abbildung 12.0.40: Aureole/Glorie an den Nebeltropfen in einem Wald, Foto copyright T. Credner und S. Kohle, www.AlltheSky.de, <http://www.allthesky.com/copyright-d.html>

INDEX



Abbildung 12.0.41: Glorie. Das farbige Ringmuster ist um die Position des Fotografen im Flugzeug zentriert. Oft sind auch höhere Ringordnungen (schwächer) sichtbar.



Abbildung 12.0.42: Irisierende Wolke: Die Farben entstehen durch Beugung an den Wassertropfen bzw. Eiskristallen in den Wolken. Es handelt sich letztlich um Koronasegmente. Foto mit freundlicher Genehmigung von L. Seifert.



Abbildung 12.0.43: Überzählige Bögen kommen durch Beugung an Regentropfen beim Regenbogen zustande. Dabei müssen aber die Regentropfen eine sehr homogene Größenverteilung aufweisen.

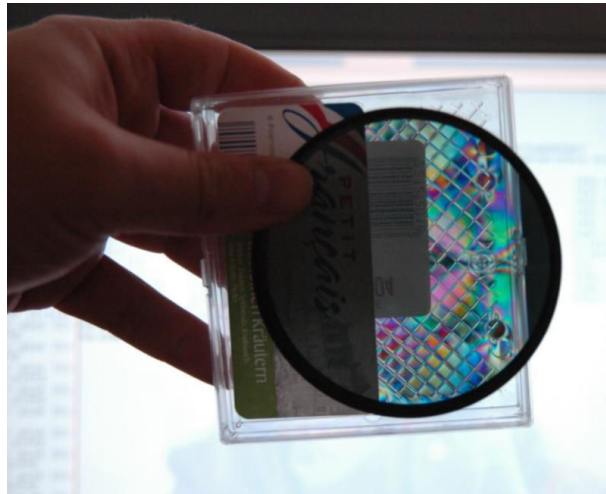
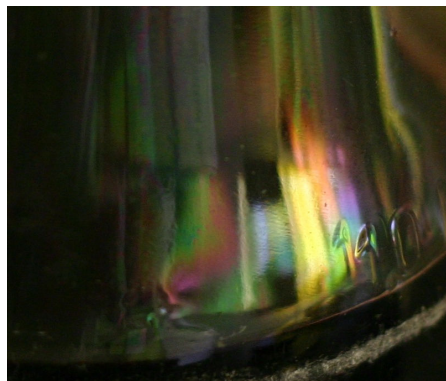


Abbildung 12.0.44: Farbeffekte aufgrund der Doppelbrechung. Doppelbrechende Materialien führen zwischen Polarisatoren zu Farbeffekten.



(a) Zuckerschicht auf Glas



(b) Plexiglasbox



(c) Cockpitfenster



(d) Plexiglasbox

Abbildung 12.0.45: Farbeffekte aufgrund von Doppelbrechung ohne Polarisatoren



Abbildung 12.0.46: Haidinger Schmetterling: Genügend Übung vorausgesetzt kann man bei der Beobachtung einer homogen, aber linear polarisiert leuchtenden Fläche (z.B. Himmel in Richtung des Zenits bei Sonnenuntergang) eine entsprechende Figur (allerdings sehr viel schwächer) bemerken. Das menschliche Auge ist leicht polarisationsempfindlich.

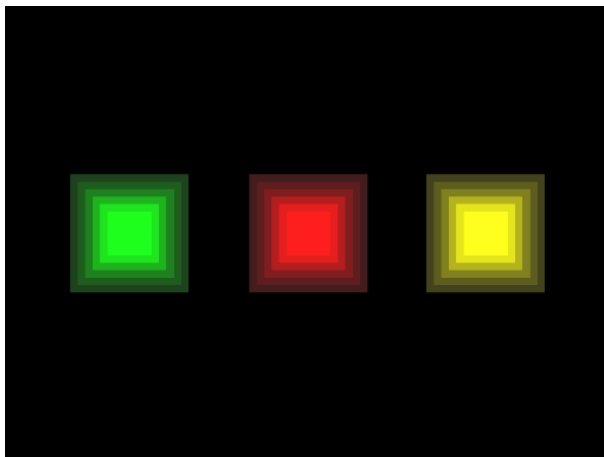


Abbildung 12.0.47: Pyramiden Illusion: Die Diagonalen sind nicht wirklich heller als der Rest. Bild nach Vasarely, „Arcturus II“.

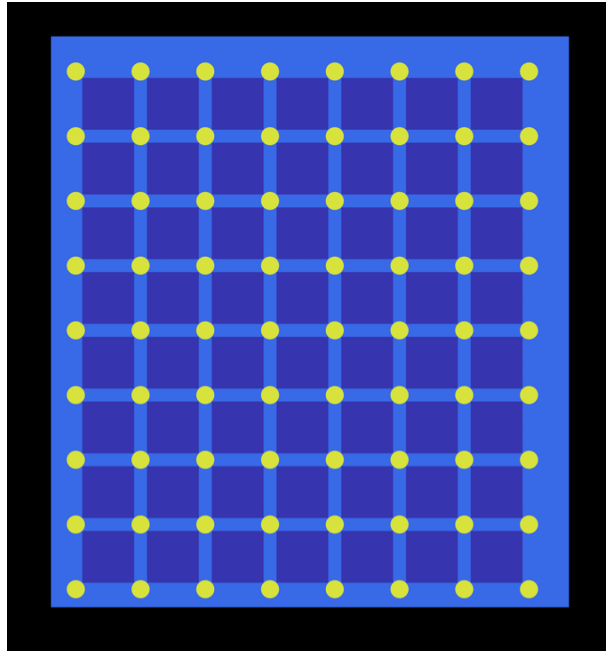


Abbildung 12.0.48: Szintillierendes Gitter: Die im Schatten liegenden hellen Flächen erscheinen heller als die im Lichtbereich liegenden dunklen Flächen. Im Bild sind die Flächen aber gleich hell.

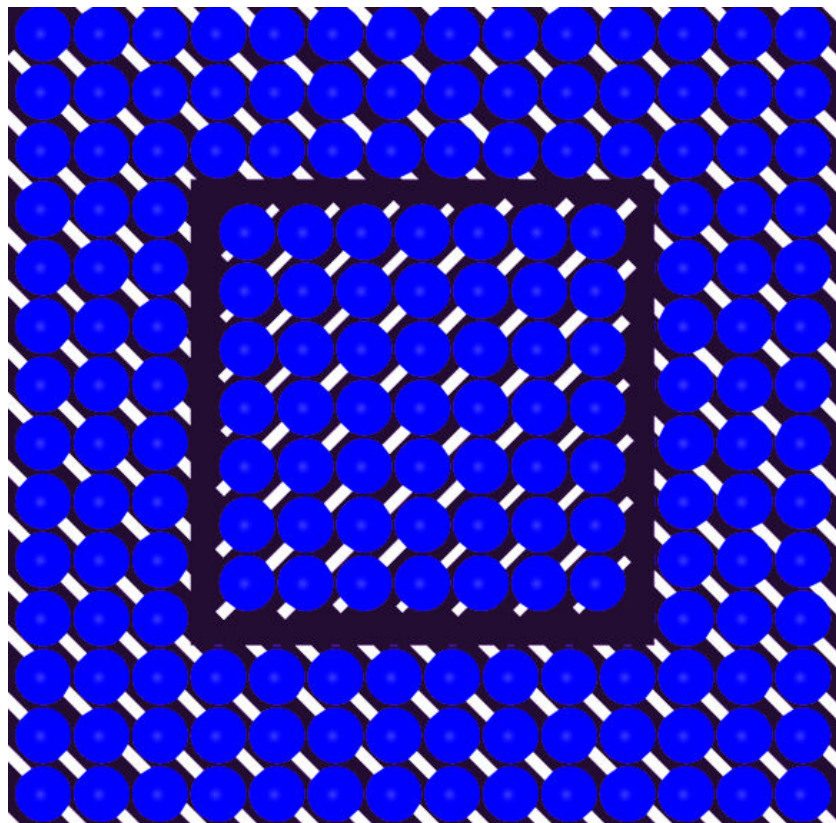


Abbildung 12.0.49: Eine Variation der Ouchi Illusion

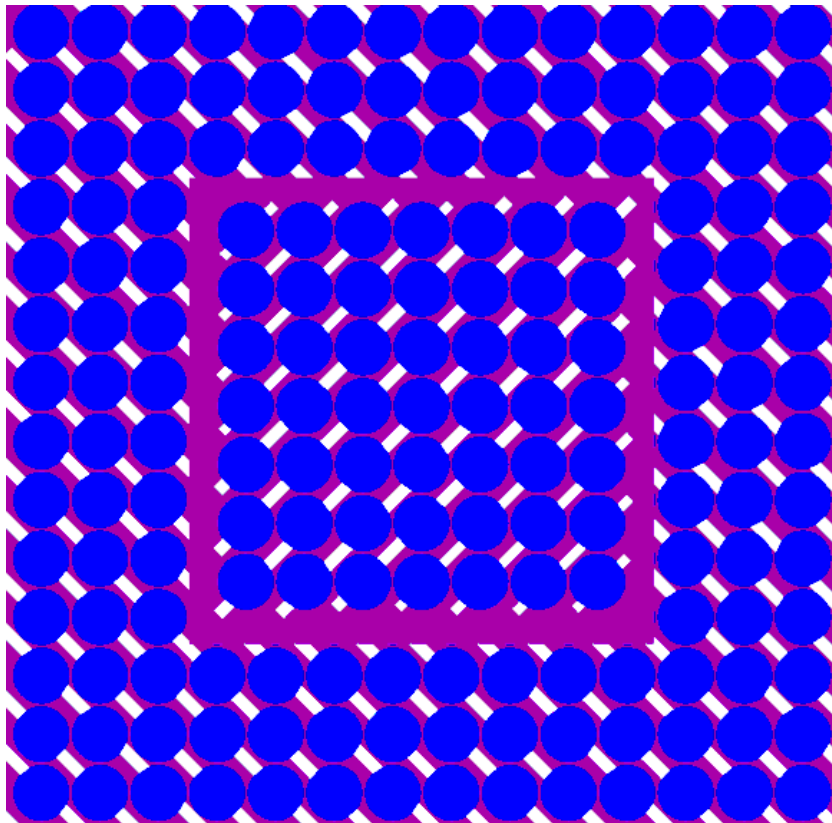


Abbildung 12.0.50: Die Ouchi Illusion verschwindet, wenn der Hintergrund nicht dunkel ist.

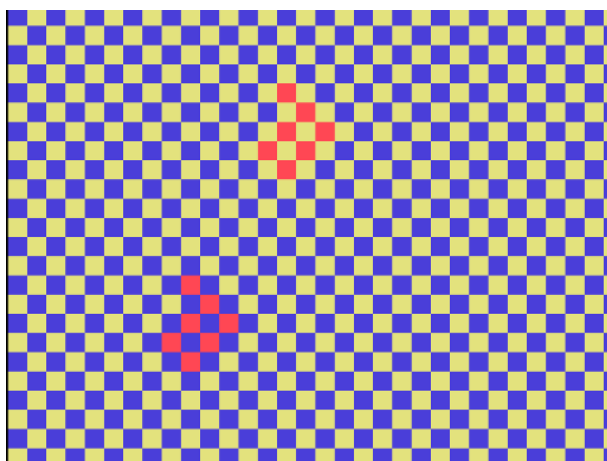


Abbildung 12.0.51: Die Umgebung beeinflusst die Helligkeitswahrnehmung: Alle roten Kacheln sind gleich hell.