

Farbumkehr durch farbigen Glanz

Wilfried Suhr

Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik,
Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster
wilfried.suhr@uni-muenster.de

Kurzfassung

Unter bestimmten Bedingungen erscheint mit Tinte Geschriebenes oder mit Druckfarben Gedrucktes annähernd in seiner Umkehrfarbe. Dieses optische Phänomen wird an Beispielen aus unserem Alltag illustriert. Bereits einfache qualitative Versuche lassen erkennen, dass sich die verblüffende Farbumkehr dem farbigen Glanz des aufgetragenen Farbstoffs verdankt. Wie dies physikalisch zu begründen ist, wird anhand eines klassischen Modells der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie erörtert. Ergänzend dazu, wird mittels mechanischer Analogien ein Zusammenhang zwischen Absorptionsgrad und Reflexionsgrad veranschaulicht, der für die Erklärung dieses Phänomens grundlegend ist.

1. Qualitative Untersuchungen

Was uns im Alltag als Merkwürdigkeit vor Augen kommt, vermag erst der geschulte Blick als physikalisches Phänomen aufzufassen. So hatte ich bereits als Kind beobachtet, dass ein mit blauer Stempelfarbe getränktes Stempelkissen rötlich schimmerte (vgl. Abb. 1). Auch die auf dem Gummi des Stempels haftende blaue Stempelfarbe war von diesem rötlichen Schimmer überzogen. Die Erinnerung daran tauchte beim Lesen eines Abschnitts aus dem von Eugen Hecht verfassten Lehrbuch über Optik auf, in dem er Bedingungen erläutert, unter denen farbige Tinte in ihrer Umkehrfarbe erscheint ([1] S. 211). Erst dieser Fingerzeig machte mir im Nachhinein klar, dass ich diesem optischen Phänomen bereits lange zuvor begegnet war, ohne es als solches zu erkennen. Zugleich war aber auch das Interesse geweckt, dieses Phänomen eingehender zu studieren.



Abb.1: Auf einem Stempel befindliche blaue Stempelfarbe sieht rötlich schimmernd aus.

Anfangs wurde den qualitativen Fragen nachgegangen, worin die materielle Basis des Phänomens der Farbumkehr besteht, welche optischen Merkmale es kennzeichnen und unter welchen Beobachtungsbe-

dingungen es sich am deutlichsten zeigt. Der erste Schritt zur Beantwortung kam einem „Schuss ins Blaue“ gleich, da mit allen verfügbaren Schreibgeräten Tintenstriche auf verschiedenartigen Beschreibstoffen ausgeführt wurden. Diese induktive Vorgehensweise erbrachte aber bereits die Erfahrung, dass für eine besonders markante Farbumkehr glatte, schwarze Oberflächen nötig waren. Aufgefallen war dies bei Beschreibstoffen wie Glas, Kunststoff oder Glanzkarton, in die die Tinte nicht einzog, sondern stattdessen als glatter Film auftrocknete.



Abb.2: Mit derselben roten Tinte auf schwarzem Glanzkarton und weißem Karton Geschriebenes.

Zudem trat das Phänomen nur bei Tinten auf, deren Farbauftrag lasierend, also durchscheinend ist. Dementsprechend ähnelt ihr aufgetrockneter Farbfilm in der Wirkung einem Farbfilter, durch den hindurch man die Oberfläche des Beschreibstoffs erkennen kann. Mit pigmenthaltigen Tinten, die eine deckende Farbschicht hinterlassen, war hingegen kein Effekt zu erzielen. Aber auch unter den durchscheinenden Tinten zeigten nur einige eine deutliche Farbumkehr. Besonders brillante Resultate wurden mit nicht-permanenten Folienstiften erzielt, die zum Beschriften von Overheadfolien gedacht sind. Das Phänomen war dabei umso stärker ausgeprägt, je dunkler die Tintenfarben waren. So erschien mit dunkelroter Tinte auf schwarzem Beschreibstoff Geschriebenes in brilliantem Grün (vgl. Abb. 2), wohingegen mit

gelber Tinte Geschriebenes nur schwach bläulich schimmerte.



Abb.3: Farbumkehr bei Druckfarben. Im Reflex der Lichtquelle kehren sich Blau zu einem rötlichen und Orange zu einem grünlichen Schimmer um.

Umkehrfarben kommen nur bei einer bestimmten Konstellation zwischen Beobachter, Gegenstand und Lichtquelle deutlich zum Vorschein. Denn man trifft sie nur dort an, wo eine Oberfläche glänzt, weil sich darin eine Lichtquelle spiegelt. Anschaulich wird diese Situation insbesondere bei großflächigen Lichtreflexen auf hochglänzenden Farbdrukken (vgl. Abb. 3). Die dort bei bestimmten Druckfarben auftretende Farbumkehr wird im Druckgewerbe als „bronzieren“ bezeichnet und als störender Effekt angesehen [2]. Insgesamt kann die nötige Konstellation aber als Indiz dafür angesehen werden, dass die Umkehrfarben spiegelnd reflektiert werden. Der nachfolgende Abschnitt zeigt, dass sich diese Annahme mittels einfacher Versuche bestätigen lässt.

2. Farbiger Glanz

Bei dem von Oberflächen reflektierten Licht unterscheidet man zwischen einer spiegelnden und einer diffusen Komponente. Letztere ist weitgehend unabhängig vom Blickwinkel zu erkennen. Weil sich ihre spektrale Zusammensetzung deutlich von der des einfallenden Lichts unterscheiden kann, ist sie für den Farbeindruck bestimmend, den die Oberfläche bietet. Dagegen wird die spiegelnde Komponente

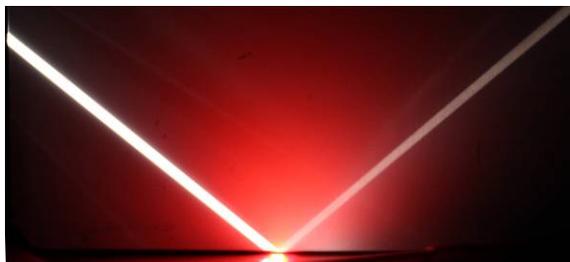


Abb.4: Gerichtete und diffuse Reflexion eines weißen Lichtbündels, beim Auftreffen auf einen roten Kunststoff.

entsprechend der Reflexionsgesetzte nur aus einer bestimmten Blickrichtung sichtbar. Ihr Ursprung ist das Spiegelbild der Lichtquelle, das je nach Rauigkeit der Oberfläche klar oder in verschwommenem Glanz erscheint. Bei den meisten Nichtmetallen erscheint dies gespiegelte Licht in der Farbe der

Lichtquelle, was darauf schließen lässt, dass der spektrale Reflexionsgrad für die spiegelnde Komponente im betreffenden Spektralbereich nahezu konstant ist (siehe Abb. 4). Bei der metallischen Reflexion zeugen der rötliche Glanz von Kupfer oder der gelbliche Glanz von Gold jedoch davon, dass auch der spiegelnden Komponente eine Farbe aufgeprägt werden kann. Der zugehörige spektrale Reflexionsgrad ist dementsprechend bei den kurzen Wellenlängen des sichtbaren Lichts kleiner als bei den längeren.

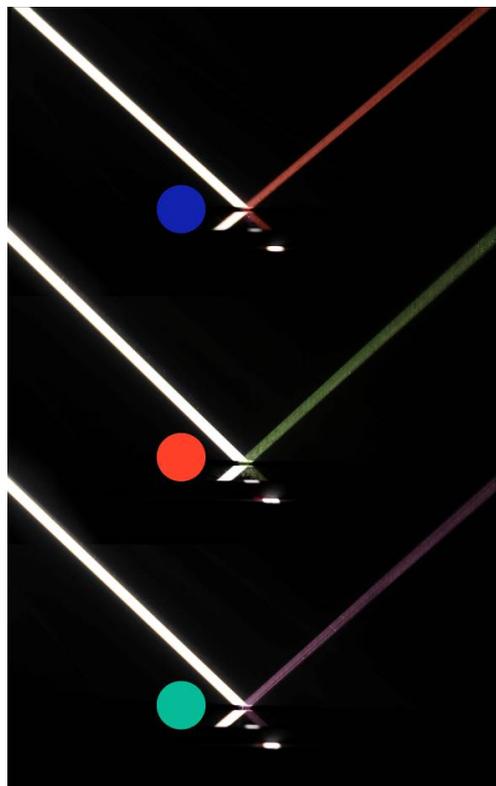
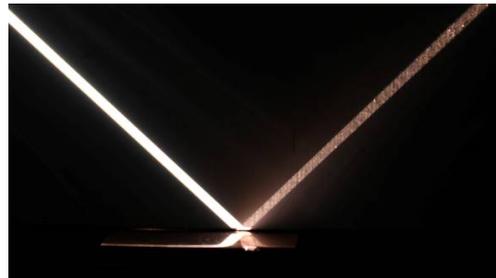


Abb.5: Reflexion eines weißen Lichtbündels, das (oben) auf Kupfer und (in der Bildabfolge unten) auf Schichten von blauer, roter und grüner Tinte auftrifft.

Dass sich farbig glänzende Metalle und zur Farbumkehr fähige Farbstoffe im Hinblick auf die Art, wie sie Licht reflektieren, nahe stehen, veranschaulicht ein einfacher Demonstrationsversuch. Benötigt werden dafür kleine Glasplatten, wie zum Beispiel Objektträger, auf die man die farbige Tinte geeigneter Folienstifte flächig aufträgt. Als Vergleichsobjekte sollten eine möglichst glatte Platte aus einfarbigem Kunststoff und eine spiegelblank polierte Kupferplatte verfügbar sein. Die Platten werden einzeln mit

einem parallelen, weißen Lichtbündel beleuchtet, das zur Markierung seines Verlaufs eine weiße Unterlage streift. Bei der damit beleuchteten Kunststoffplatte sind die diffuse und spiegelnde Komponente des reflektierten Lichts leicht voneinander unterscheidbar (vgl. Abb. 4). Die diffuse Komponente ist farbig und in den Halbraum über der Grenzfläche in alle Richtungen gestreut. Die farblich fast unveränderte, spiegelnde Komponente, breitet sich dagegen als paralleles Bündel in der Reflexionsrichtung aus. Beleuchtet man dagegen die Kupferplatte oder eine der mit dem Farbauftrag versehenen Glasplatten (vgl. Abb. 5), so findet fast nur spiegelnde Reflexion statt. Allerdings besteht das reflektierte Strahlenbündel nun aus farbigem Licht. Beim Kupfer hat es die rötliche Farbe des Metalls und bei den jeweiligen Farbaufträgen weist es deren Umkehrfarbe auf. Die gerichtete Reflexion verleiht also nicht nur bestimmten Metallen farbigen Glanz, sondern auch einigen Farbstoffen, wobei diese allerdings in ihrer Umkehrfarbe glänzen.

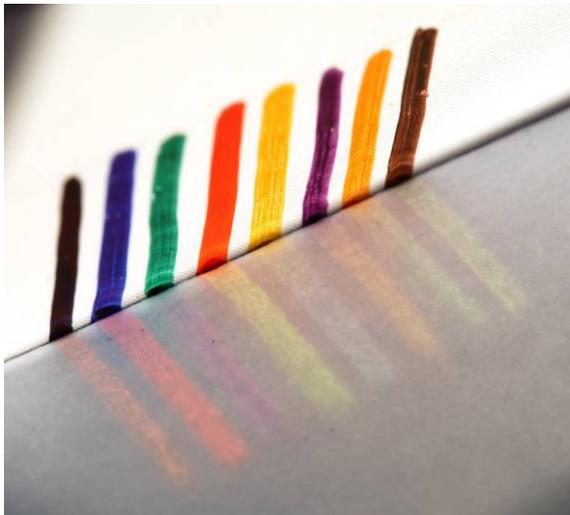


Abb.6: Auf weißem Glanzkarton (mit Folienstiften) aufgetragene Tintenstriche werden von direktem Sonnenlicht beleuchtet. Die Umkehrfarben werden spiegelnd auf den davor liegenden Schirm reflektiert.

Solchen farbigen Glanz bestimmter Farbstoffe illustriert ein einfacher Freihandversuch (vgl. Abb. 6), für den lediglich die oben erwähnten Folienstifte und hochglänzendes, weißes Papier nötig sind. Nach einmaligem Falten des Papiers wird es wieder aufgefaltet. Dann zieht man mit den Stiften Striche bis zur Falzkante. Als Schirm, der das von diesen Strichen reflektierte Licht auffangen soll, dient der gegenüberliegende Teil des Papiers, das man entlang der Falzkante in einen 90°-Winkel nach vorne umknickt. Von direktem Sonnenlicht beschienen, bilden sich durch spiegelnde Reflexion die Striche in ihren Umkehrfarben auf diesem Schirm ab, den man zur Verbesserung des Kontrasts abschatten sollte.

3. Doppelfarbige Tintenstriche

Um begründen zu können, warum ein mit derselben Tinte auf weißem und schwarzem Papier gezogener

Strich in unterschiedlichen Farben erscheinen kann, bedarf es noch einer weiteren Einsicht. Diese drängt sich auf, wenn man auf Glas aufgetrocknete Tinte im Durchlicht betrachtet. Da die zur Farbumkehr fähigen Farbaufträge, wie schon oben erwähnt, lasierend sind, wirken die auf dem Glas haftenden dünnen Farbschichten wie Farbfilter, die das sich darin ausbreitende Licht selektiv absorbieren.

Betrachten wir nun die optischen Vorgänge an einer Farbschicht, die in Form eines Tintenstrichs auf weißem Papier aufgetragen wurde. Für das auf sie treffende Licht ist die Grenzfläche zur Luft ein Übergang von einem optisch dünneren zu einem optisch dichteren Medium. Dementsprechend wird an dieser Grenzfläche ein Teil des Lichts reflektiert, während der restliche Teil in die Schicht hinein gebrochen wird. Indem dieser die Farbschicht dann durchdringt, wird er selektiv geschwächt. Erreicht dies Licht schließlich die weiße Oberfläche des Papiers, so wird es, entsprechend der Oberflächenrauigkeit, größtenteils diffus zurückreflektiert. Es durchläuft dann nochmals die selektiv absorbierende Farbschicht und gelangt anschließend als selektiv transmittiertes Streulicht in den Halbraum oberhalb der Grenzfläche.

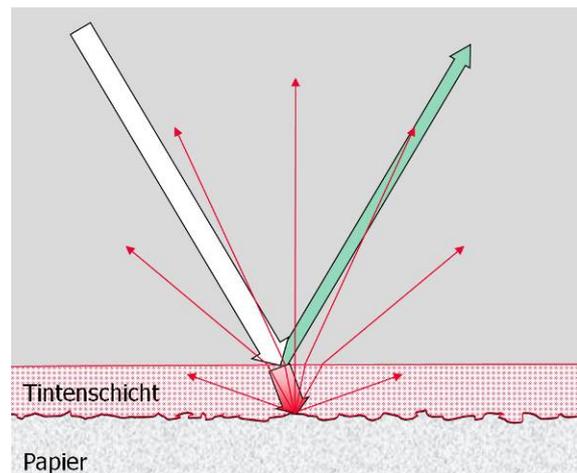


Abb.7: Reflexionsvorgänge an einer roten Tintenschicht auf weißem Papier.

Wie sich dies äußert, soll am Beispiel eines mit roter Tinte auf weißem Papier gezogenen Strichs erörtert werden (vgl. Abb. 7). Für die Beleuchtung mit weißem Licht soll dabei ein entfernt aufgestellter Scheinwerfer sorgen. Aus nahezu allen Perspektiven würde dieser Strich einem Beobachter dann in der Farbe Rot erscheinen, weil dies die Farbe des selektiv transmittierten Streulichts ist, das aus der Farbschicht des Tintenstrichs austritt. Wäre mit derselben Tinte ein Strich auf schwarzem Papier gezogen worden, würde wegen der starken Absorption an dessen schwarzer Oberfläche kaum noch solches Streulicht entstehen. Für einen Beobachter wäre der Tintenstrich damit kaum erkennbar. Nur sein Glanz könnte in verraten, der sich aber nur in der Reflexionsrichtung des auf ihn fallenden Lichts beobachten

lässt. Auf das Auge eines dort befindlichen Beobachters trafe dann nämlich das an der Schichtoberfläche gerichtet reflektierte Licht, so dass er dort, in starkem Kontrast zum dunklen Hintergrund, den Tintenstrich in seiner Umkehrfarbe erkennt. Wäre das Papier in diesem Fall weiß, so würde sich zu der gerichtet reflektierten Umkehrfarbe noch das von der Tinte gefilterte Streulicht mischen. Auch wäre ihr Kontrast vor dem hellen Hintergrund geringer.

4. Theoretischer Hintergrund

Als Phänomen waren die „Umkehrfarben“ bereits der Wissenschaft des späten neunzehnten Jahrhunderts bekannt. August Kundt bezeichnete sie 1871 als „Oberflächenfarben“, weil sie an der Oberfläche von Körpern reflektiert wurden, die andererseits für die dazu komplementären Farbanteile durchlässig waren [3]. Anders ausgedrückt reflektieren sie also genau den Lichtanteil, für den sie ein starkes Absorptionsvermögen haben. Als Grund für dieses bemerkenswerte Verhalten vermutete Kundt den „allgemeinsten Fall der Dispersion“, bei dem also der Brechungsindex des Materials in bestimmten Wellenlängenbereichen ungewöhnlich stark variiert. Daraus könne sich für diesen Bereich, gemäß den Fresnelschen Formeln, ein höherer Reflexionsgrad ergeben. Somit könne es also durchaus sein, dass die Dispersion bei diesen Körpern im Bereich sichtbaren Lichts anomal sei.

Auch in der aktuellen Physik wird das Phänomen der Umkehrfarben auf die sogenannte *anomale Dispersion* zurückgeführt. Dieser Begriff ist in der klassischen Wellentheorie verankert, wonach alle dielektrischen Medien Wellenlängenbereiche mit *normaler* und *anomalener Dispersion* aufweisen. Normale Dispersion liegt vor, wenn der Brechungsindex mit zunehmender Wellenlänge allmählich abnimmt. Dies ist beispielsweise bei Materialien wie Glas im Bereich sichtbaren Lichts der Fall. Erst in einem Bereich ultravioletter Strahlung kommt es bei Glas zu anomaler Dispersion, wobei dort der Brechungsindex mit zunehmender Wellenlänge steil ansteigt.

Ein klassischer Ansatz, um das Zustandekommen normaler und anomaler Dispersion zu erklären, ist das Lorentz-Oszillator-Modell. Demnach kommt es zwischen Licht und Materie zur Wechselwirkung, weil Licht als elektromagnetisches Wechselfeld anzusehen ist, dessen elektrische Feldkomponente \vec{E} auf die in der Materie enthaltenen elektrischen Ladungen Kräfte ausübt. Bei dielektrischen Medien bewirken diese Kräfte eine Polarisation, die die zuvor im Gleichgewicht befindliche Ladungsverteilung im Stoff stört. Aufgrund der Anziehung zwischen positiven und negativen Ladungen existiert aber eine Rückstellkraft, die das Gleichgewicht der Ladungsverteilung wieder herstellt, wenn kein äußeres elektrisches Feld mehr einwirkt. Die Materie gleicht in dieser Modellvorstellung also einem klassischen Oszillator, den das elektrische Wechselfeld

des Lichts zu erzwungenen Schwingungen anregen kann. Da die Frequenzen im sichtbaren Bereich aber sehr hoch sind, kann man davon ausgehen, dass nur die Elektronen, wegen ihrer geringen Trägheit, dieser Anregung folgen können. Für das durch das Feld induzierte Dipolmoment \vec{p} eines gebundenen Elektrons lautet dann die Schwingungsgleichung

$$m \left(\frac{d}{dt^2} + \gamma \frac{d}{dt} + \omega_0^2 \right) \vec{p} = e^2 \vec{E}$$

Dabei ist m die Masse und e die elektrische Ladung des Elektrons. Bei der Kreisfrequenz ω_0 würde das System in Resonanz schwingen. Da aber im Resonanzfall die Auslenkung endlich bleibt, muss eine Dämpfung der Schwingung angenommen werden, für die der Dämpfungsfaktor γ angesetzt wird.

Für die Polarisierbarkeit $\alpha = \vec{p} / \vec{E}$ des Materials liefert der klassische Lösungsansatz für Schwingungsgleichungen

$$\alpha = \frac{e^2}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}$$

Die Polarisierbarkeit α ist eine mikroskopische Größe, die für die makroskopisch messbare Permittivität $\hat{\epsilon}$ bestimmend ist. Diesen Zusammenhang beschreibt die sogenannte Clausius-Mossotti-Gleichung, in die außerdem noch einige stoffspezifische Konstanten eingehen. Sofern es sich um unmagnetische Materialien handelt, ergibt sich der Brechungsindex unmittelbar aus $\hat{n} = \sqrt{\hat{\epsilon}}$. Weil die Polarisierbarkeit einen imaginären Dämpfungsterm enthält, ist sie eine komplexe Größe. Dementsprechend sind auch die daraus berechneten Größen $\hat{\epsilon}$ und \hat{n} komplex. Der komplexe Brechungsindex lässt sich daher in einen Real- und Imaginärteil zerlegen, so dass $\hat{n} = n + i\kappa$. Die jeweilige Bedeutung beider Summanden wird erkennbar, wenn man in der Wellengleichung $E = E_0 \exp i(kx - \omega t)$ die Wellenzahl k durch $\hat{n}k_0$ ersetzt. Denn damit lautet die Wellengleichung

$$E = E_0 \exp(-\kappa k_0 x) \cdot \exp i(nk_0 x - \omega t).$$

Der erste Exponentialterm entspricht einer exponentiellen Abnahme der Amplitude von E mit der Eindringtiefe x in das Medium. Da dies einer Absorption gleich kommt und diese maßgeblich von dem Imaginärteil des Brechungsindex κ abhängt, findet sich dafür auch die Bezeichnung „Absorptionsindex“. Der Realteil n ist dagegen für die Stärke der Dispersion maßgeblich.

Mit der bisher dargelegten Theorie lässt sich nun beschreiben, auf welche Weise einige dielektrische Medien Licht selektiv absorbieren. Gemäß dieser klassischen Betrachtungsweise beruht das Absorptionsvermögen eines Mediums auf der Fähigkeit darin gebundener Ladungsträger in Resonanz mit der Frequenz des einfallenden Lichts mitzuschwingen.

Die Dämpfung solcher Resonanzschwingungen entspricht dabei dem Umwandlungsprozess der dabei übertragenen Strahlungsenergie in Wärme.

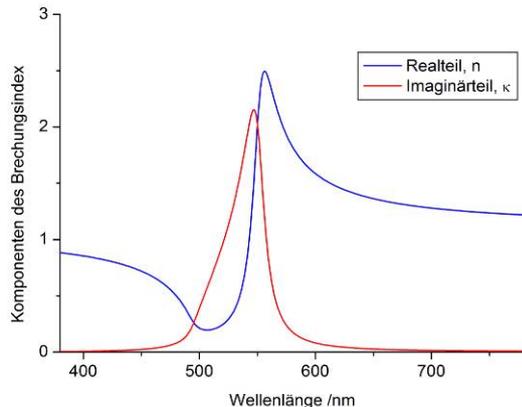


Abb.8: Berechneter komplexer Brechungsindex in Abhängigkeit von der Wellenlänge, für den roten Tintenfärbstoff Eosin.

Am Beispiel des roten Tintenfärbstoffs Eosin soll der Zusammenhang zwischen seinem Absorptionsvermögen und seinem komplexen Brechungsindex illustriert werden. Da das Absorptionsmaximum von Eosin bei 530 nm liegt, wird daraus zunächst die Kreisfrequenz ω_0 für das Maximum der Resonanz berechnet. Die oben erläuterten Schritte zur Berechnung des komplexen Brechungsindex ergeben dann für das sichtbare Spektrum einen (als qualitativ anzusehenden) Verlauf für den Real- und Imaginärteil, wie ihn Abbildung 8 zeigt. In unmittelbarer Nähe des Absorptionsmaximums ist aus dem Verlauf von n zu ersehen, dass dort die Dispersion anomal ist. Zugleich ist dort der „Absorptionsindex“ κ maximal.

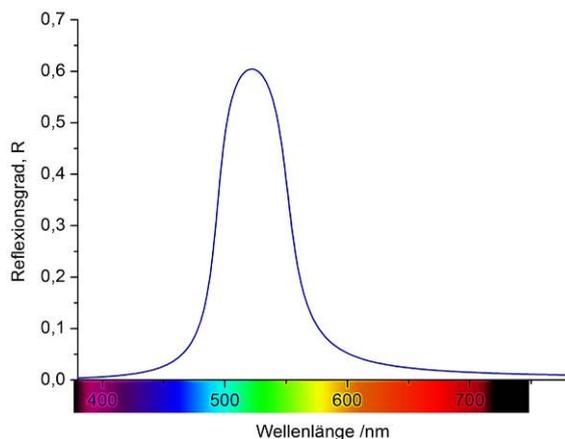


Abb.9: Mit den Werten aus Abb. 8 berechneter Reflexionsgrad des Farbstoffs Eosin.

Um das Geheimnis der Umkehrfarben zu lüften, genügt es nun, nach den Fresnelschen Formeln zu berechnen, welcher Reflexionsgrad R sich aus dem Brechungsindex für die jeweilige Wellenlänge ergibt. Beschränkt man die Betrachtung auf einen

senkrechten Lichteinfall, so gilt der vereinfachte Ansatz

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2}$$

Unter Verwendung der in Abbildung 8 enthaltenen Werte für den Brechungsindex von Eosin, wurde mit diesem Ansatz der in Abbildung 9 gezeigte wellenlängenabhängige Verlauf des Reflexionsgrades R für diesen Farbstoff berechnet. Es fällt dabei auf, dass das Reflexionsmaximum mit der Wellenlänge des Absorptionsmaximums übereinstimmt. In Wellenlängenbereichen, in denen der Farbstoff stark absorbiert, reflektiert er also auch gut. Was in dieser Aussage zunächst wie ein Widerspruch klingt, wird plausibel, wenn man bedenkt, dass der Absorptionsgrad maßgeblich vom „Absorptionsindex“ κ abhängt. Wie schon oben erläutert, hängt von κ wiederum die Eindringtiefe der Lichtwellen in das Material ab. Ist die Eindringtiefe kleiner als die Lichtwellenlänge, so spricht man von *starker* Absorption. In diesem Fall kann von der auftreffenden Strahlungsleistung nur ein Bruchteil auf das Material übertragen werden. Der Rest wird reflektiert. Würde man den Farbstoff beispielsweise in Wasser auflösen, entstünde daraus ein *schwacher* Absorber in den das Licht tiefer eindringen könnte. Da dies eine bessere Übertragung der Strahlungsenergie ermöglicht, nimmt das Reflexionsvermögen im Gegenzug ab. Während Eosin als fester Stoff also die Umkehrfarbe Grün reflektiert, würde es diese selektive Reflexion umso mehr schwächen, je mehr man den Farbstoff verdünnt.

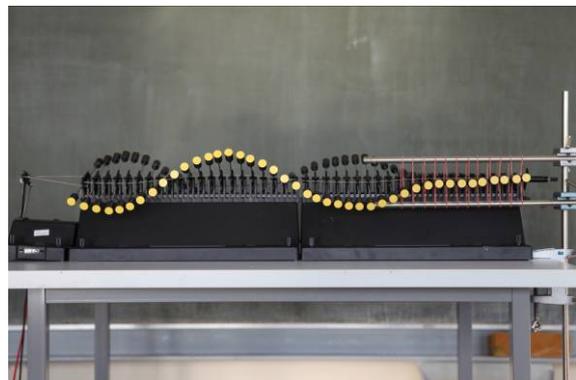


Abb.10: Mechanisches Analogon eines starken Absorbers.

Um diesen Zusammenhang anhand einer Analogie zu illustrieren, schlägt R. W. Pohl die Verwendung einer Torsionswellenmaschine vor, an der an einem Ende ein Dämpfungsmechanismus angebracht wurde. Bei einer aus heutiger Zeit stammenden Wellenmaschine konnte diese Reibungsdämpfung mit Hilfe gespannter Gummiringe realisiert werden, wie Abbildung 10 dies zeigt. Der einfache Aufbau ermöglicht eine Änderung der Spannung der Gummiringe, wodurch sich die Stärke der Gleitreibung variieren lässt, die auf die einzelnen Torsionselemente einwirkt. Eine straffe Einstellung bewirkt also

eine Schwergängigkeit, die es verhindert, dass auf den Dämpfer zulaufende Wellen tief in ihn eindringen. Stattdessen werden sie nahezu ungeschwächt reflektiert. Dies ermöglicht die Entstehung einer stehenden Welle auf der Wellenmaschine, wenn diese kontinuierlich in einer Eigenfrequenz angeregt wird. Verringert man die Spannung der Gummiringe, so können die Wellen weiter in den Dämpfer vordringen. Dabei verbleibt mehr von ihrer Energie im Dämpfer, was die Reflexion letztlich so schwächt, dass nur noch zum Dämpfer laufende Wellen zu beobachten sind.

5. Ausblick

Obwohl es sich bei den Umkehrfarben um ein altbekanntes Phänomen handelt, kann man ihm dennoch einen Aspekt abgewinnen, der in der Literatur noch nicht erwähnt wurde. Was diesen Aspekt zum Vorschein bringt, ist die Kombination zweier unüblicher Betrachtungsweisen. Einerseits blickt man zur Betrachtung durch ein Polarisationsfilter und andererseits nimmt man eine Perspektive ein, aus der die Umkehrfarben unter einem relativ großen Reflexionswinkel ($>70^\circ$) gespiegelt werden. Unter diesen Bedingungen kann man die Umkehrfarbe durch Drehung des Polarisationsfilters deutlich verändern. Betrachtet man die zur Einfallsebene senkrecht polarisierte Komponente des Lichts, so hat dies kaum Einfluss auf die Umkehrfarbe. Die parallel polarisierte Komponente erscheint dagegen in einer deutlich anderen Farbe (vgl. Abb. 11). Ein mit einem roten Folienstift gezogener Strich erscheint dann nicht in seiner gewöhnlichen Umkehrfarbe Grün, sondern in Blau.

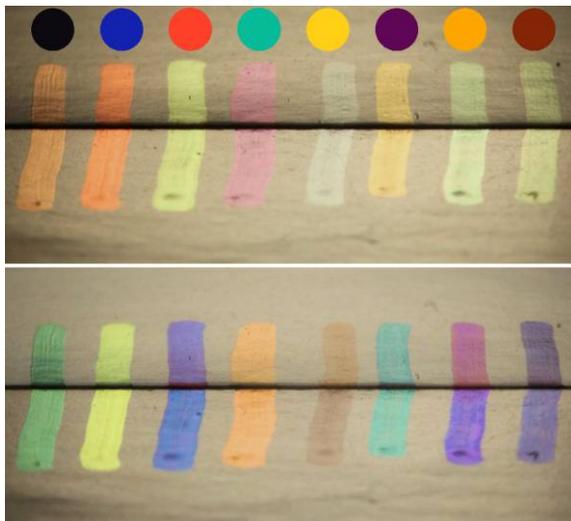


Abb.11: Unter einem Reflexionswinkel von ca. 70° betrachtete Tintenstriche. (Die runden Marker zeigen die ursprüngliche Tintenfarbe an). Im oberen Bild ist das Licht zur Einfallsebene senkrecht polarisiert, im unteren Bild dagegen horizontal polarisiert.

Beleuchtet man zur Farbumkehr fähige Farbstoffe also mit polarisiertem Licht, dann kann sich ihr farbliches Aussehen mit der jeweils dazu eingenommenen Perspektive ändern. Zur Demonstration

dieser Richtungsabhängigkeit eignet sich ein Lampengehäuse, aus dem mehrere Strahlen austreten, die sich mit daran befestigten Umlenkspiegeln zu einem gemeinsamen Schnittpunkt lenken lassen. Treffen sie dort auf die Oberfläche des Farbstoffs, so werden sie von da aus in verschiedene Richtungen reflektiert. Lässt man die einfallenden Strahlen ein geeignet orientiertes Polarisationsfilter passieren, so erscheinen die reflektierten Strahlen, je nach Reflexionswinkel, in verschiedenen Farben (vgl. Abb. 12).

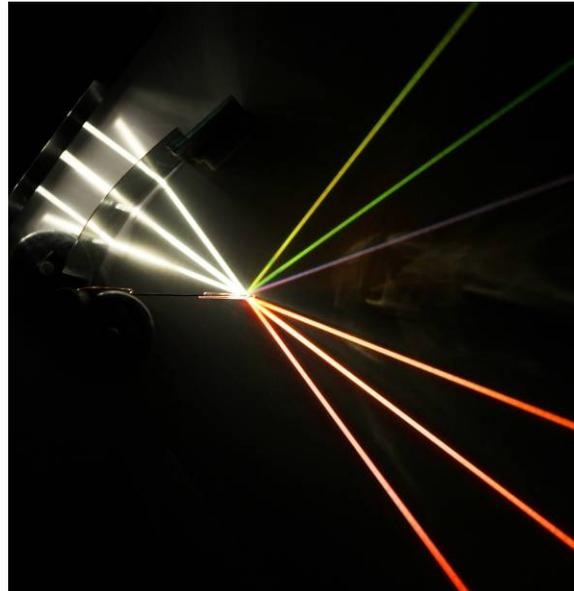


Abb.12: Polarisiertes weißes Licht trifft unter verschiedenen Einfallswinkeln auf eine Schicht roter Tinte, die sich auf einer horizontalen Glasplatte befindet. Je nach zugehörigem Ausfallswinkel hat das reflektierte Licht eine unterschiedliche Farbe.

Für eine theoretische Begründung reicht auch hier die anomale Dispersion aus. Allerdings muss dazu separat für jede Polarisationsrichtung der Reflexionsgrad für schrägen Lichteinfall berechnet werden. Weil die entsprechenden Fresnelschen Formeln etwas umfänglich sind, ist zur Berechnung ein Computer unabdingbar. Qualitativ zeigt sich bei den Resultaten eine umso stärkere Verschiebung zwischen den berechneten Reflexionsspektren, je größer der Reflexionswinkel ist. Bei großen Reflexionswinkeln hat das zur Einfallsebene parallel polarisierte Licht demnach ein selektives Reflexionsspektrum das gegenüber dem von senkrecht polarisiertem Licht zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben ist. Insofern stimmen diese Berechnungen mit den Beobachtungen qualitativ überein.

6. Literatur

- [1] Hecht, Eugen (2001): *Optik*. Oldenbourg; München
- [2] Prinzmeier, Matthias (2012): Dem Bronzieren auf der Spur. In: *Farbe und Lack*, 2, 24 – 27
- [3] Kundt, August (1871): Ueber die anomale Dispersion der Körper mit Oberflächenfarben. In: *Pogg. Ann.* 142, 163 - 171