

Wie aus farbigen Schatten bunte Bilder hervorgehen – Experimente zur Zwei-Farben-Projektion

Nico Westphal¹, Marc Müller¹, Johannes Grebe-Ellis²

¹Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik, AG Didaktik der Physik, ²Leuphana Universität Lüneburg, Phänomenologie und Didaktik der Physik,

Kurzfassung

Die Phänomene der farbigen Schatten und die Farberscheinungen bei den Projektionsexperimenten von Edwin H. Land weisen Gemeinsamkeiten auf, die weit über Ähnlichkeiten im Versuchsaufbau und das Rätsel der sichtbar werdenden Farben hinausgehen. Im Beitrag wird der experimentelle Zusammenhang beider demonstriert. Dazu wird das Schattenexperiment in wenigen Schritten zu einer Zweifarbenprojektion modifiziert. Die dabei deutlich werdende Verwandtschaft beider Phänomene wird anschließend hinsichtlich der Frage geöffnet, ob auch ein auf die Farbwahrnehmung bezogener Zusammenhang besteht.

1. Einleitung

Im Folgenden werden zwei Phänomene näher betrachtet bei denen die Farbwahrnehmung im Widerspruch zu den „klassischen“ Gesetzen der additiven Farbmischung steht. Es handelt sich hierbei zum einen um die 'farbigen Schatten', die u. a. bereits von GOETHE [1] beobachtet und dokumentiert wurden und zum anderen um die Zwei-Farben-Projektionsexperimente nach E. H. LAND [2]. Eine Gemeinsamkeit fällt unmittelbar bei der ersten Betrachtung auf: In beiden Fällen werden zwei verschieden farbige Lichtquellen benutzt. Dies wirft die Frage auf, ob nicht noch weitere Zusammenhänge existieren oder ob es sich sogar um ein und dasselbe Phänomen handelt. So könnten z. B. die Farberscheinungen bei LAND eine „elaborierte Form von Goethes Farbige-Schatten-Experiment“ (Zitat aus [3], S. 449) bzw. die farbigen Schatten ein Spezialfall der Projektionsexperimente sein.

Im vorliegenden Text sollen zunächst beide Phänomene unabhängig voneinander vorgestellt werden. Ferner wird in wenigen Schritten demonstriert, wie sich das Farbige-Schatten-Experiment zu einer Zwei-Farben-Projektion modifizieren lässt. Dabei wird unmittelbar eine experimentelle Verwandtschaft beider Phänomene aufgezeigt.

2. Zweifarbenprojektionen nach Edwin H. Land

Als EDWIN H. LAND 1958 eine Reihe von Projektionsexperimenten dem Fachpublikum der Royal Photographic Society vorstellte, war das der Anfang einer langen „wiederbelebten“ wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den un-

gelösten Problemen auf dem Gebiet der Farbwahrnehmung. In vielen kleinen Schritten demonstrierte LAND zunächst, welche Farberscheinungen auftreten, wenn man das Licht zweier verschieden farbigen Lichtern (Rot und Weiß) auf eine Leinwand projiziert (vgl. [2]). Dabei variierte er die Intensitäten der Lampen mit Hilfe von Graufiltern bzw. zwei um 90° zueinander gedrehten Keilfiltern. Das Ergebnis deckte sich mit den Erwartungen gemäß der Gesetze der additiven Farbmischung: Auf der Projektionsfläche erscheinen die Farben Rot, Weiß, Rosa und im Falle der Keilfilter ein Farbfeld auf dem die Farben Schwarz, Weiß, Rot und Rosa kontinuierlich ineinander übergehen (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Projektion von zwei 90° zueinander gedrehten Graukeilen mit rotem und weißem Licht

Etwas Unerwartetes trat jedoch bei dem Schlüsselexperiment auf: Anstelle von Graufiltern benutzte LAND jetzt ein Paar Schwarz/Weiß-Dias derselben Szene. Es handelte sich jedoch nicht um Kopien ein und desselben Dias! Der Unterschied zwischen beiden bestand darin, dass sie

durch verschiedene Farbfilter fotografiert wurden. Eines durch ein Grünfilter (*short-record*), das Andere durch ein Rotfilter (*long-record*, siehe Abb. 2 unten). Beide Dias sind prinzipiell nichts anderes, als komplex strukturierte Graufilter, die an einem beliebigen aber fixen Bildpunkt i. Allg. verschiedene Durchlässigkeiten für Licht besitzen. Die Projektionen der beiden Dias überlagerte LAND, so dass diese deckungsgleich waren. Das Ergebnis war eine Szenerie in Schwarz/Weiß. Als er jedoch wiederum den *long-record* mit Hilfe eines Filters mit rotem Licht projizierte, erschien das Bild in einer Farbvielfalt, die sich stark von den Farben bei der Projektion mit den Keilfiltern unterschied (siehe Abb. 2 oben).

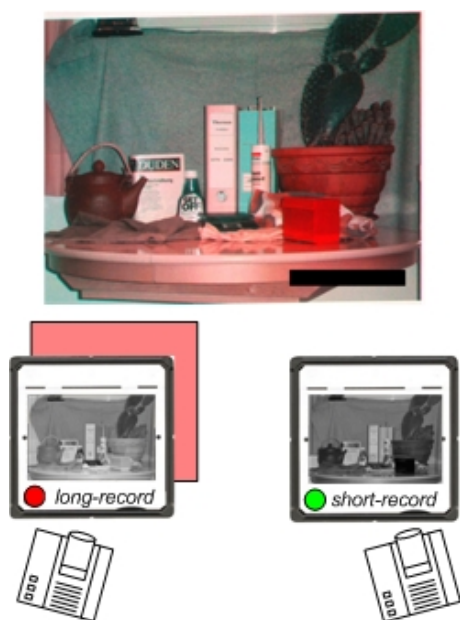


Abb. 2: Aufbau einer Zweifarbenprojektion nach LAND

Der Widerspruch zur additiven Farbmischung besteht also darin, dass obwohl nur mit rotem und weißem Licht durch S/W-Dias projiziert wird, mehr Farben als Rot, Weiß, Schwarz und Mischungen zwischen ihnen wahrnehmbar sind. Der Betrachter könnte sogar meinen, dass es sich bei der Projektion um eine Farbfotografie handelt.

3. Die farbigen Schatten

Das zweite Phänomen ist schon sehr viel länger bekannt als die Experimente von LAND. Die wahrscheinlich ersten, schriftlich festgehalte-

nen Beobachtungen dazu machte LEONARDO DA VINCI (vgl. [4], S. 43). Am bekanntesten ist jedoch die Schilderung GOETHES von seiner Harzreise (vgl. [1], S. 89), in der er die Entwicklung der Schattenfarbe im Schnee während des Sonnenuntergangs beschreibt.

An dieser Stelle sei ein mögliches und auch simples Experiment zur Beobachtung der farbigen Schatten kurz vorgestellt: Vor einer Projektionsfläche befindet sich ein undurchsichtiger Schattengeber. Vor diesem wiederum befinden sich zwei Lichtquellen. Auf der Projektionsfläche sind nun zwei farblose Teilschatten sichtbar, und falls die Abstände günstig gewählt sind, überlappen sich die Teilschatten zu einem Kernschatten. Diese Perspektive, in der das Phänomen von außen betrachtet wird, kann man als *abgelöst* bezeichnen. In der *eingebundenen* Perspektive sieht ein Beobachter vom Ort eines Teilschattens auf dem Schirm jeweils nur eine Lampe, während sich die andere für den Beobachter genau hinter dem Schattengeber befindet. Am Ort des Kernschattens sieht der eingebundene Beobachter demnach keine Lampe. Beides entspricht genau dem, was man auch aus der abgelösten Perspektive mithilfe einer geometrischen Konstruktion der Schattenlehre folgern würde.

Das Experiment ist jedoch an dieser Stelle noch nicht komplett. Wie schon in der Einleitung erwähnt, benötigt man auch hier, wie bei den Projektionsexperimenten von Land, zwei verschiedene farbige Lichtquellen. Dies erfolgt wieder durch einen roten Lichtfilter vor einer der Lampen (wobei die Farbe grundsätzlich egal ist, dazu später mehr). Die andere Lampe bleibt ohne Filter. Das Experiment ist in Abb. 3 dargestellt.

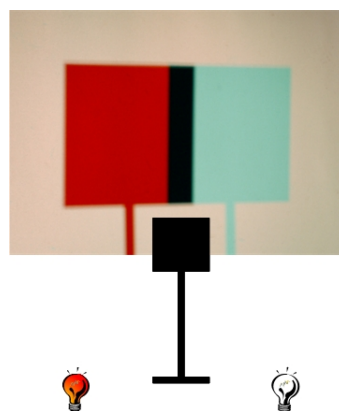


Abb. 3: Ein gefärbter (links) und ein farbiger Schatten (rechts)

Im Vordergrund befinden sich die beiden farbigen Lichtquellen (weiß und rot), dahinter ein undurchsichtiger Schattengeber und im Hintergrund die projizierten Teilschatten bzw. ein Kernschatten (schwarz). Der linke Teilschatten wird durch die rote Lichtquelle (ebenfalls links) rot eingefärbt. Zur besseren Unterscheidung kann man diesen Teilschatten *gefärbten Schatten* nennen (vgl. [4]). Der rechte Teilschatten ist jedoch nicht wie die rechte Lichtquelle farbneutral. Dieser *farbige Schatten* erscheint cyanfarben. Es wurde bereits mehrfach gezeigt, dass ein Perspektivwechsel (abgelöst → eingebunden) zum Verständnis solcher Phänomene beitragen kann (vgl. [5, 6]). Dazu befindet sich der eingebundene Beobachter nun an dem Ort des gefärbten (roten) Schattens. Er sieht eine rote Lampe. Befindet sich der eingebundene Beobachter allerdings an dem Ort des farbigen Schattens, von wo er nur die Lampe ohne Filter sieht, so hat sich für ihn im Vergleich zur vorherigen farblosen Situation (s.o.) nichts geändert. Denn die Sichtbeziehung zur Lampe mit dem Filter ist durch den Schattengeber verhindert. Der Beobachter „weiß“ quasi gar nichts von der farbigen Lichtquelle. Eine eingebundene Perspektive dieser Art ist also für die weitere Betrachtung nicht sinnvoll, da das Phänomen aus ihr heraus gar nicht auftritt.

Wie schon erwähnt, waren die Beleuchtungsfarben Rot und Weiß nicht unbedingt gefordert. Was aber nicht bedeutet, dass das Phänomen nicht davon abhängt – im Gegenteil. Variiert man die farbige Lichtquelle, so ändert sich selbstverständlich auch die Farbe des gefärbten Schattens. Aber auch die Farbe des farbigen Schattens bleibt nicht konstant. Er erscheint immer in der Komplementärfarbe des gefärbten Schattens (siehe Abb. 4). Im Folgenden wird immer von einer roten und einer weißen Lichtquelle ausgegangen, da auch LAND mit diesen beiden Farben projizierte.

Neben den zwei verschiedenen farbigen Lichtquellen gibt es also noch eine Gemeinsamkeit zwischen den farbigen Schatten und den Projektionsexperimenten von LAND. In beiden Fällen nimmt der abgelöste Beobachter zusätzliche Farben wahr. Allerdings sind bei LAND sehr viel mehr zusätzliche Farben sichtbar, als bei den farbigen Schatten, wo nur die eine Komplementärfarbe hinzukommt. Die Ähnlichkeit der beiden Experimente lässt aber vermuten, dass durch eine schrittweise Veränderung des Aufbaus die

Farbvielfalt erhöht werden kann, womit die Verwandtschaft der beiden Experimente bewiesen wäre.

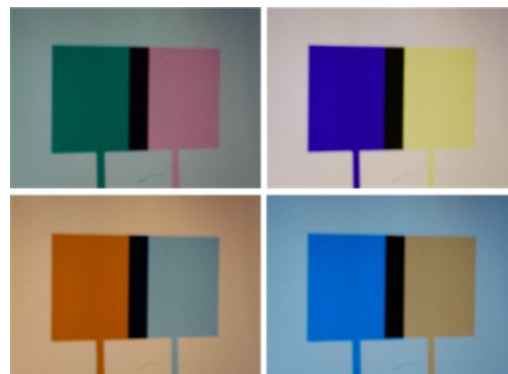


Abb. 4: Farbige Schatten bei verschiedenen farbigen Lichtquellen: Grün/Weiß (l. o.), Violett/Weiß (r. o.), Orange/Weiß (l. u.) und Blau/Weiß (r. u.)

4. Modifikation des Schattenexperiments

Im **ersten Schritt** soll zunächst der bisher undurchsichtige Schattengeber durch einen transparenten ersetzt werden, z. B. durch eine Graufolie. In Abb. 5 oben ist das Schattenbild einer solchen Folie zusehen. Sie hängt oben an einer Stange und ist unten, damit sie sich nicht aufrollt, mit Massen beschwert, was aber bei folgenden Betrachtungen als nebensächlich angesehen werden kann. Der gefärbte und der farbige Schatten sind wieder erkennbar, allerdings ist die Sättigung der Farben geringer als vorher, was auch der nur noch graue Kernschatten wiedergibt. Der eingebundene Beobachter sieht nun von dem Ort des Teilschattens aus jeweils eine Lampe komplett und eine Lampe abgeschwächt. An dem Ort des Kernschattens sieht er beide Lampen abgeschwächt, und zwar beide in gleichem Maße.

Nun soll es auch Bereiche geben, in denen der eingebundene Beobachter beide Lampen unterschiedlich abgeschwächt sehen kann, was im **zweiten Schritt** realisiert wird. Dazu ist eine zweite transparente Graufolie nötig, die sinnvollerweise einen anderen „Transparenzgrad“ besitzt als die erste Folie (siehe Abb. 5 unten). Wieder ist für jede Folie ein gefärbter und ein farbiger Schatten sichtbar. In Abb. 5 sind die beiden Schatten der rechten Folie schwächer gesättigt als die der linken, weil die rechte Folie transparenter ist als die linke. Interessant ist jetzt

der Bereich in der Mitte, wo sich der schwach gesättigte gefärbte Schatten (rot) mit dem stärker gesättigtem farbigen Schatten (cyanfarben) überlappt. Eingebunden ist in diesem Bereich die rote Lampe stärker geschwächt als die weiße.

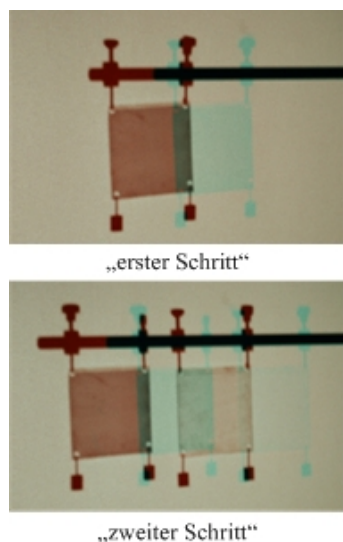


Abb. 5: Die projizierten Schatten der ersten beiden Modifikationsschritte

Auf dieser Stufe der Modifikation sind nun verschiedene Variationen möglich. Naheliegend ist es, die Transparenzen beider Folien zu verändern. Wählt man z. B. sechs verschiedene Abstufungen zwischen undurchsichtig und klarsichtig, so gibt es für den eben betrachteten Bereich 36 verschiedenen Möglichkeiten der Kombination. Im **dritten Schritt** soll dies möglichst effizient geschehen. Außerdem soll es möglich sein, alle Kombinationen miteinander vergleichen zu können. Dazu werden als Schattengeber Dias verwendet, in denen die sechs Abstufungen der Graufolien gleichzeitig realisiert sind. Die Dias für beide Lampen bzw. Projektoren sind wie die Keilfilter in Abschnitt 2 um 90° zueinander gedreht. Die überlagerte Projektion beider Dias entspricht nun allen 36 Kombinationen gleichzeitig (siehe Abb. 6).

Die Anzahl der beobachtbaren Farben hat nun zugenommen und die Farben entsprechen weitestgehend denen in den Projektionsexperimenten. Dieses Experiment haben bereits WILSON & BROCKLEBANK [7] durchgeführt und festgestellt, dass die hier durch das Experiment generierten Farben der gleichen Art sind wie die

bei LAND. Nur dass diese Darstellung systematischer ist.

Der vierte und **letzte Schritt** besteht also darin, die systematischen Dias durch zufällige Dias auszutauschen, mit der Forderung, dass möglichst viele Kombinationen des Verhältnisses von rotem zu weißem Licht in der Projektion vertreten sind.

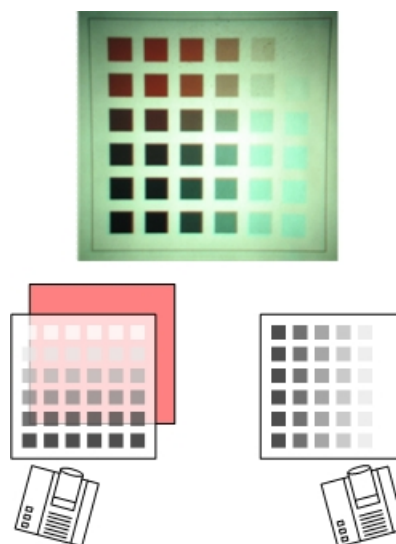


Abb. 6: Im „dritten Schritt“ dienen Dias mit mehreren Feldern verschiedenener Graustufungen als Schattengeber

Wenn zumindest die Farben aus Abb. 6 auftreten sollen, so müssen wenigstens die entsprechenden 36 Kombinationen in der zufälligen Anordnung enthalten sein, während zusätzliche Abstufungen (und damit auch Verhältnisse) die Farbvielfalt nur noch erhöhen. Als zufällige Anordnung dient ein S/W-Dia. Und weil sich die Dias beider Projektoren unterscheiden müssen, da sonst der eingebundene Beobachter die beiden Lampen nicht unterschiedlich abgeschwächt sieht, wählt man zwei S/W-Dias der selben Szene, die durch verschiedene Farbfilter fotografiert wurden. Dies entspricht den Projektionsexperimenten von LAND (siehe Abb. 2). Allerdings können *short-* und *long-record* jetzt als unterschiedlich transparente Schattengeber aufgefasst werden.

Damit ist gezeigt, dass es sich bei den Projektionsexperimenten nach LAND um eine Art Schattenexperimente handelt. Entsprechend treten auch dort farbige Schatten auf. Und zwar

genau in den Bildbereichen, in denen der *short-record* komplett durchsichtig und der *long-record* schwarz ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zwischen den beiden zunächst unterschiedlichen Farbphänomenen konnte ein experimenteller Zusammenhang gezeigt werden. Dazu wurde die Absolutheit eines undurchsichtigen Schattengebers gelockert, indem transparente Schattengeber benutzt wurden. Zusätzlich konnten durch mehrere Schattengeber Überlagerungen von gefärbten und farbigen Schatten hergestellt werden, die in einer systematischen Anordnung mit verschiedenen Abstufungen der Transparenz zusätzliche Farben hervorrufen. Der Übergang von systematischen Dias zu natürlichen Bildern bildet die Brücke zu den Projektionsexperimenten nach LAND, die als elaborierte Form der farbigen Schatten aufgefasst werden können, in denen diese wiederum als Spezialfall enthalten sind. Der Zusammenhang geht also über die Ähnlichkeiten im Aufbau hinaus.

Bisher noch unbeachtet blieb der inhaltliche Zusammenhang. Seitdem die farbigen Schatten beobachtet wurden, gibt es auch Theorien über deren Entstehung. Vom physikalischen Standpunkt aus ist man geneigt, eine subjektive, physiologische Ursache zu suchen und den farbigen Schatten keine reale, objektiv messbare Existenz zuzugestehen. Dies ist jedoch nicht im Sinne einer vernünftigen Betrachtung von Farbe als Empfindung (vgl. [8]). Die angesprochenen Theorien sind sehr unterschiedlich und reichen vom *simultanen Farbkontrast* [9] über *Farbadaptation* [10] bis zu Erklärungen, die aus den Prinzipien der Farbenlehre von GOETHE abgeleitet wurden [4]. Ein inhaltlicher Zusammenhang würde also bestehen, wenn ein Erklärungsansatz für die farbigen Schatten auch bei den Farberscheinungen bei LAND fruchten würde. Es müsste also eine Theorie sein, aus der sich sowohl der Spezialfall „farbige Schatten“ als auch sämtliche anderen Farben ableiten lassen. Eine Untersuchung in dieser Richtung geschah im Rahmen einer Staatsexamensarbeit [8]. Offen bleibt die Frage nach einer übergeordneten Theorie der Farbwahrnehmung, die sowohl die hier vorgestellten als auch andere Phänomene berücksichtigt. Denn dann wäre es prinzipiell möglich, die bisher noch überwiegend unverstandene Wahrnehmung mithilfe von Sensoren nachzuempfin-

den und damit auch die farbigen Schatten physikalisch messbar zu machen.

Literatur

- [1] MATTHAEI, Rupprecht (Hrsg.): *Goethes Farbenlehre – ausgewählt und erläutert von Rupprecht Matthaei*. 3. Ravensburg : Otto Maier Verlag, 1998
- [2] LAND, Edwin H.: Experiments In Color Vision. In: *Scientific American* 200 (1959), Nr. 5, S. 84–99
- [3] WRIGHT, W. D.: Colour Vision: a Field of Unsolved Problems. In: *The New Scientist* 6 (1959), S. 447–449
- [4] OTT, Gerhardt ; PROSKAUER, Heinrich O.: *Das Rätsel des Farbigen Schattens*. Basel : Zbinde Verlag, 1979
- [5] MÜLLER, Marc: Spiegelbilder der Sonne im Tropfen – Zur Phänomenologie des Regenbogens. In: GRÖTZEBAUCH, V. Nordmeier; H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik – Regensburg 2007*. Berlin : Lehmanns Media, 2007
- [6] GREBE-ELLIS, Johannes: Lesen im buch der Natur – Zur Entwicklung einer phänomenologischen Lesekompetenz. In: GRÖTZEBAUCH, V. Nordmeier; H. (Hrsg.): *Didaktik der Physik – Regensburg 2007*. Berlin : Lehmanns Media, 2007
- [7] WILSON, M. H. ; BROCKLEBANK, R. W.: Two-Colour Projektion Phenomena. In: *The Journal of Photographic Science* 8 (1960), S. 141–150
- [8] WESTPHAL, Nico: *Der Zusammenhang zwischen den Phänomenen der farbigen Schatten und den Farberscheinungen bei Edwin H. Lands Projektionsexperimenten*. 2008. – Wissenschaftliche Hausarbeit zur Ersten Staatsprüfung für das Amt des Studienrats
- [9] CAMPENHAUSEN, Christoph von: *Die Sinne des Menschen – Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung*. 2., völlig neu bearbeitete. Stuttgart; New York : Georg Thieme Verlag, 1993
- [10] KALLMANN, Anatol J.: *Farbkonstanz und Farbkontrast - Eine Untersuchung mit Hilfe der farbigen Schatten*, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Diss., 2003