

**Beim Sehen übersehen:  
Der Einfluss der Eigenschaften der Retina auf unsere Sicht der Welt**  
- Überlegungen zur Erweiterung des Optikunterrichts -

**Adel Moussa**

Institut für Didaktik der Physik, WWU Münster  
a\_mous01@uni-muenster.de

**Kurzfassung**

In einem immer noch überwiegend fachsystematisch geordneten Physikunterricht spielt der aktive Beitrag der Netzhaut bei der Bildentstehung im Auge in aller Regel keine Rolle. Im Rahmen einer mit den Mitteln der Schulphysik realisierbaren Erweiterung der klassischen Behandlung des Sehvorgangs lassen sich die weitgehend übersehenen Auswirkungen wesentlicher physikalischer Eigenschaften der Retina auf unser Bild der Welt thematisieren. Anhand konkreter Beispiele wird dargelegt, dass sich ein solches Vorgehen nicht nur eine Vielzahl neuer Lerngelegenheiten bietet, sondern darüber hinaus einen Beitrag zu einem viablen, weil umfassenderen Verständnis des Sehprozesses leisten kann.

**1. Einführung**

Ob bei der Lochkamera oder der durch Linsen vermittelten Abbildung der Wendel einer Glühlampe auf einem im abgedunkelten Physikraum aufgestellten Schirm, die Art und Weise wie das in ähnlicher Weise auch auf die Netzhaut projizierte Bild letztlich den Weg in unser Gehirn findet, wird im Physikunterricht in aller Regel weitgehend unreflektiert ausgeblendet.

Fragt man Physiklehrer/innen nach den Gründen, heißt es oft, dass ...

- der Prozess zu komplex sei, um ihn im ohnehin inhaltlich überfrachteten Unterricht der Unter- und Mittelstufe behandeln zu können,
- die Detektion auf der Netzhaut für die im Optikunterricht relevanten Lerninhalte keine Rolle spiele, und
- die Frage nach der Rolle der Netzhaut beim Sehprozess doch eher etwas für den Biologie, denn den Physikunterricht sei.

Die drei genannten Gründe stellen offenbar nur eine Auswahl aus der Gesamtsumme der Antworten dar, die mir Lehrerinnen und Lehrer, die ich auf das Fehlen der Netzhaut im Optikunterricht angesprochen habe, in den vergangenen Monaten gegeben haben.

Mit den sich im Folgenden anschließenden Ausführungen möchte ich diese und andere Vorbehalte widerlegen und interessierten Lehrerinnen und Lehrern Möglichkeiten aufzeigen, die physikalischen Aspekte, des unerheblichen Einflusses der Netzhaut auf unsere Sicht der Dinge zum Unterrichtsgegenstand zu machen und ihren Schülerinnen und Schülern auf

diese Weise eine umfassenderes und befriedigenderes Verständnis des Sehvorgangs zu ermöglichen.

**2. Wie die Retina unser Bild der Welt beeinflusst**

Dass die Netzhaut eine ganz zentrale Rolle bei der Verarbeitung von "Lichtdaten", bzw. "Bildinformation" spielt ist allgemein bekannt. Ihr prägender Einfluss auf unsere Sicht der Welt wird uns allerdings oftmals erst dann bewusst, wenn wir die Grenzen unserer Wahrnehmung untersuchen.

Für mich war es die Auseinandersetzung mit den auch als "Speckle" bekannten bunten Interferenzmustern, die man im teilkohärenten Sonnenlicht auf optisch rauen (=Oberflächenunebenheiten im Bereich der Wellenlänge sichtbaren Lichts) beobachten kann [1], aufgrund derer ich mich erstmals mit der Rolle der Netzhaut beim Sehprozess auseinandersetzte. Dabei stellte sich nach eingehender Untersuchung heraus, dass der Grund dafür das sich die mit bloßem Auge deutlich sichtbaren Lichtflecken zunächst auf keiner der mit einer hochwertigen Spiegelreflexkamera geschossenen Aufnahmen zeigten ein Mismatch zwischen dem hohen Auflösungsvermögen des Objektivs und dem verhältnismäßig gering auflösenden, weil großformatigen CCD Sensoren der Kamera war.

Die Anekdote von den fotoscheuen Interferenzmustern, belegt nicht nur wie prägend die frühe Ausblendung des Einflusses des Detektionsprozesses auch für unsere spätere Auseinandersetzung mit dem Thema sein kann, sie verdeutlicht auch, wo der Einfluss des "Detektors" (CCD-, CMOS-Chips, lichtempfindlicher Film oder Netzhaut) auf unsere Sicht der Welt am größten ist: An den Grenzen unserer Wahrnehmung – dort wo Dinge zu groß  $\Leftrightarrow$  zu klein, zu hell  $\Leftrightarrow$  zu dunkel oder auch zu bunt sind.



**Abb.1:** Es gibt zahlreiche Faktoren, die uns an die Grenze der eigenen Wahrnehmungsfähigkeit. Viele von ihnen lassen sich direkt auf Eigenschaften der Netzhaut zurückführen.

Dabei wäre es allerdings vermessen zu behaupten, dass die Netzhaut allein Schuld trage, trage, wenn wir etwas nicht oder nicht exakt sehen. Der Teil des Netzhautbildes der auf die Randbereiche der Netzhaut fällt, wird etwa nicht nur deshalb unscharf, weil hier die Zapfendichte, die vom innersten der Fovea, dem Zentrum des schärfsten Sehens, wo sie bei 1,2 µm liegt nach außen hin rasch abnimmt, schließlich steigen auch die Abbildungsfehler unserer Linse so weit abseits der optischen Achse deutlich an.

Ein adäquates Verständnis davon, wie unser Bild der Welt zustande kommt, verlangt also stets die Berücksichtigung beider Faktoren.

### 3. Von der "Megapixelkamera" zum Einfluss der eigenen Retina auf unser Bild der Welt

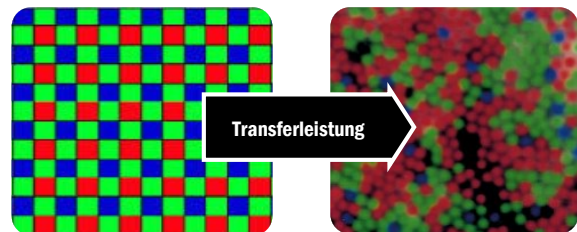
Im Laufe der vergangenen 10 Jahre hat die Digitalfotografie, die klassischen lichtempfindlichen Filme vollkommen verdrängt. Dabei werben Hersteller und Verkäufer entsprechender Geräte nach wie vor mit enormen "Pixelzahlen". "10 Megapixel", "super hochauflösend", etc. – Bezeichnungen wie diese sind heute bereits Fünftklässlern geläufig. Ein Begriff, im Sinne eines verstandenen, also "begriffenen" Konzepts, allerdings, sind sie allenfalls für diejenigen Schülerinnen und Schüler, die sich privat intensiv mit dem Thema Fotografie auseinandersetzen.

Dennoch, oder vielleicht gerade deshalb, macht es Sinn die Frage nach der "Megapixelzahl" moderner

Digitalkameras als Ausgangspunkt für weitere Überlegungen zum Sehvorgang zu wählen, schließlich bieten die existierenden Parallelen und Gegensätze zwischen dem Aufbau eines Digitalkamerasensors und der Retina des menschlichen Auges einen gute Basis für den Einstieg in eine Unterrichtssequenz, die je nach Alter und Vorwissen der Schüler auf einer rein qualitativen, halb-quantitativen oder mathematisch-analytischen Ebene geführt werden kann.

### 3.1. Ein qualitativer Ansatz zur Analyse des Einflusses der Retina auf Auflösungsvermögen und Farbwahrnehmung

Geht man davon aus, dass den Schülerinnen und Schülern der grundsätzliche Aufbau der Pixelmatrix einer Digitalkamera geläufig ist, können wir ohne weiteres davon ausgehen, dass sie in der Lage sind, dieses Wissen auf den Aufbau der menschlichen Retina zu übertragen und Unterschiede und Parallelen zu erkennen.



**Abb.2:** Schülerinnen und Schülern gelingt der Wissenstransfer und Vergleich vom regelmäßigen Pixelraster einer Digitalkamera zum z.T. chaotisch anmutenden Mix aus "roten", "grünen" und "blauen" Zapfen in aller Regel ohne Probleme.

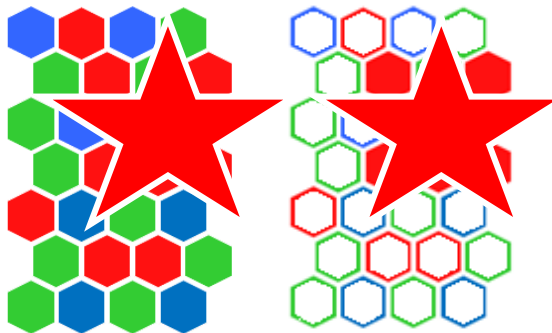
Dabei hängt es vor allem davon ab, wann – also in welcher Klassenstufe – man sich mit dem Thema beschäftigt, ob und in welcher Breite man sich mit der Frequenzabhängigkeit des Signals an den "roten" (langwellig), "grünen" (mittelwellig) und "blauen" (kurzwellig) Zapfen beschäftigt.

Während in der gymnasialen Oberstufe gerade hier ein interessanter Untersuchungsschwerpunkt liegen könnte, bietet sich in der Unter- und Mittelstufe ein wesentlich einfacherer Zugriff auf das Thema an: Das Arbeiten mit farbigen Schablonen (rot, grün, blau; s. Abb.3), die dann auf eine selbst gemalte oder bereits vom Lehrer vorgegebene Zapfenmatrix (s. Abb.4) aufgelegt werden und mit deren Hilfe sich bestimmen lässt, welche der "roten", "grünen" und "blauen" Zapfen ein Signal ans Gehirn weiterleiten.



**Abb.3:** Einfache Vektorgrafiken, wie diese, eignen sich besonders gut als Schablonen für jüngere Schülerinnen und Schüler. Legt man Sie auf eine aus Raute- oder Fünfecken bestehende Zapfenmatrix auf, so lässt sich relativ einfach das Bildsignal bestimmen.

Anhand von Schablonen und Matrizen lassen sich aber nicht nur Erkenntnisse zur Farbwahrnehmung (zeitliches Auflösungsvermögen) gewinnen. Sie lassen auch Rückschlüsse auf das räumliche Wahrnehmungsvermögen und die Art und Weise wie dieses für Farb- und Monochrom-Sehen variiert zu.



**Abb.4:** Das Beispiel des Sterns, zeigt deutlich, dass aufgrund der unregelmäßigen Verteilung der verschiedenfarbigen Zapfen das räumliche Auflösungsvermögen für das Farbsehen deutlich absinkt.

Je nach Alter und Vorwissen der Schüler lässt bereits an dieser Stelle das Nyquist-Shannon Abtasttheorem  $f_{Abtast} > 2 \cdot f_{max}$  einführen, um mit seiner Hilfe die nötige "Abtastrate", also die Zahl an Zapfen, die mindestens auf einen Bildpunkt kommen muss für Farb- und Schwarzweißsehen abschätzen.

Einfacher und nicht nur für Schüler in aller Regel interessanter ist allerdings die an dieser Stelle leicht zu beantwortende Frage nach der Ursache und den Folgen von Farbenblindheit. Mit Hilfe von Testbildern, wie man Sie etwa unter ([www.sehtestbilder.de](http://www.sehtestbilder.de)) kos-

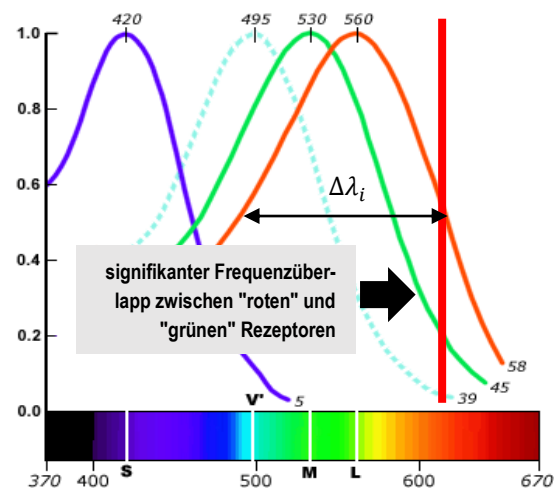
tenlos herunterladen kann, können die Schüler anhand von zweifarbigen Zapfenmatrizen (rot fehlt, oder grün fehlt) nachvollziehen, welche Folgen es hat, wenn einem Menschen die entsprechenden Farbrezeptoren auf der Netzhaut fehlen.

### 3.2. Ein halb-qualitativer Ansatz zum besseren Verständnis von Farbwahrnehmung und Farbenblindheit

In der Folge kann auch zur Sprache kommen, dass die klassische Einteilung in "rote", "grüne" und "blaue" Pixel eine starke Vereinfachung darstellt, welche die reale Frequenzempfindlichkeit der drei Zapfentypen außer Acht lässt. Ohne diesen Überlapp und die auf Kosten des räumlichen Auflösungsvermögens gehende Farbinterpolation über mehrere Zapfen wäre unsere Welt zwar immer noch bunt, viele Details, wie etwa einen roten sternförmiger Aufkleber auf einem recht weit entfernten Blatt Papier, dessen Abbildung auf der Retina wie der Stern in Abb.4 eine Fläche von nur ca. 10 Zapfen umfasst, könnten wir allenfalls als Fleck, kaum jedoch als Stern erkennen.

Genau hier, also bei dem offensichtlichen Widerspruch zwischen unserer doch recht Fähigkeit farbig Objekte voneinander zu unterscheiden und den Ergebnissen des doch recht schnell an seine Grenzen stoßenden qualitativen 3-Farb-Modells aus dem vorangegangenen Abschnitt, lässt sich das Modell sinnvoll um eine halbquantitative Komponente erweitern.

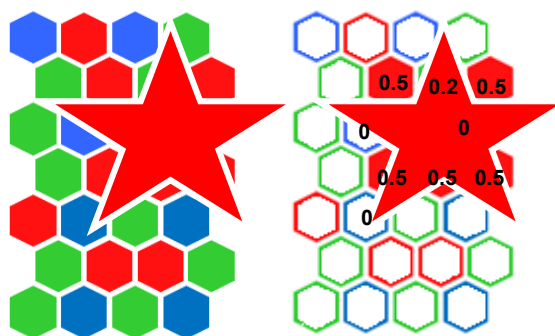
Aufgrund von Daten, die Wissenschaftlicher mit echten Probanden gesammelt haben, wissen wir dass die "roten", "grünen" und "blauen" Zapfen, deren Verteilung auf der Retina von Person zu Person variiert, nicht nur "eine Farbe", d.h. eine bestimmte Frequenz, detektieren können. Dabei variiert die Intensität  $I(\lambda)$  mit der Wellenlänge; wobei die Peaks  $I(\lambda_i) = 1$  in etwa bei  $\lambda_i = \{530 \text{ nm}; 530 \text{ nm}; 420 \text{ nm}\}$  liegen.



**Abb.5:** Wellenlängenabhängigkeit der Lichtempfindlichkeit der roten, grünen und blauen Farbrezeptoren. Ohne den signifikanten Überlapp sähe unsere Welt sicherlich ganz anders aus.

Bei einer Halbwertsbreite  $\Delta\lambda_i$  von mehr als 150 nm sollte damit bereits ohne einen Blick auf die Darstellung in Abb.5 werfen zu müssen klar sein, dass ein nicht unerheblicher Wellenlängen- / Frequenzüberlapp zwischen den drei Grundfarben existiert.

Für den Stern aus Abb.4 etwa bedeutet das, dass nicht nur die roten, sondern auch die grünen Rezeptoren ein Signal an das Gehirn senden werden. Den Wert können Schüler in der Mittelstufe nach einer kurzen Erläuterung meist selbständig aus einem Diagramm wie dem in Abb.5 ablesen. Trägt man nun die entsprechenden Werte für unser Beispiel von vorhin in die Zapfenmatrix ein, ergibt sich folgende quantitativ erweiterte Fassung der Darstellung aus Abb.4:



**Abb.6:** Unter Zuhilfenahme der Darstellung aus Abb.5 können Schüler das einfache RGB-Modell um eine quantitative Komponente erweitern (Anmerkung: In einer Erweiterung könnte man auch die vom Stern bedeckte Fläche noch in die Quantifizierung einbeziehen).

Wie das Gehirn aus den Unmenge an Daten durch Interpolation über mehrere Zapfen letztlich ein Bild aufbaut ist nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung und damit jenseits des Zugriffs des Physikunterrichts [2].

#### 4. Ausblick: Experiment & Simulation

Obschon sich die exakten Vorgänge im Gehirn unserem Zugriff entziehen, bieten sowohl die Aufnahme, als auch die Analyse der Rohdaten weitere – gerade für den Fortgeschrittenen-Unterricht interessante Untersuchungsaspekte, deren unterrichtliche Realisation im Folgenden allerdings nur kurz angedeutet werden können.

##### 4.1. Konstruktion eines Augenmodells

Für ca. 20 Euro lassen sich auf etwa Ebay und im Fachhandel eine gebrauchte Webcam, eine Linse und ein Acrylkugel, die als "Augapfel" fungiert erwerben.

Aus diesen Grundelementen können – bei entsprechender Vorbereitung durch die Lehrkraft – auch Schülerhände ein Modellauge, wie es in Abb.7 zu sehen ist, konstruieren. Und da das "Auge" den per USB ansteuerbaren CCD Chip einer handelsüblichen Webcam verwendet, lässt es sich mit jedem handelsüblichen PC ansteuern und auslesen.

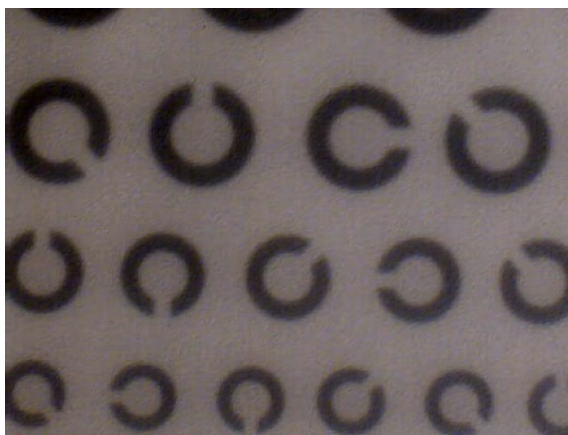


**Abb.7:** Modellauge bestehend aus einer alten Webcam, einer Linse ( $f = 20$  mm), einer Unterlegscheibe ( $d = a_{\text{pupille}} = 3$  mm) als Pupille und einer lackierten Acrylkugel als Augapfel – Kosten ca. 20€.

Um die Eigenschaften des menschlichen Auges möglichst exakt nachzubilden, sollten bei der Konstruktion folgende Punkte beachtet werden:

Zum einen darf die Auflösung der Webcam, deren CCD-Chip man für den Bau des Modellauges verwendet nicht zu hoch sein. Die Einzelpixel hätten sonst aufgrund der kompakten Bauweise der Chips sonst Durchmesser, die wesentlich kleiner wären als die der mittlere Zapfenabstand der lichtempfindlichen Zellen auf der der Retina  $\bar{a}_Z = 5 \mu\text{m}$ .

Zum anderen sollte man sich auch bei Auswahl und Installation von Blende und Linse an den Eigenschaften des menschlichen Auges orientieren. Bei einem Durchschnittsmenschen mit einem Pupillendurchmesser von  $3 \text{ mm} < a_{\text{pupille}} < 6 \text{ mm}$  für normalhelle bzw. – dunkle Lichtverhältnisse und einem Augeninnendurchmesser von ca.  $d_{\text{Auge}} \approx 21 \text{ mm}$  liegt die Blendenzahl  $k$  bei etwa  $7 < k < 3,5$ . Das bedeutet, dass das Verhältnis vom Durchmesser der Brennweite der Linse zur Blende (hier bietet sich etwa eine Unterlegscheibe an) ebenfalls zwischen 3.5 und 7 liegen sollte.



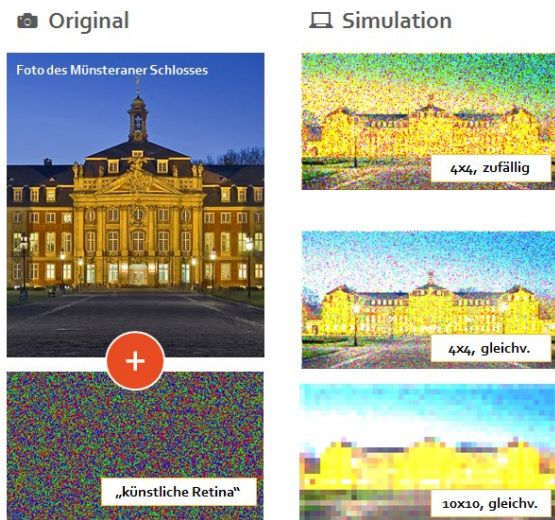
**Abb.8:** Mit Aufnahmen eines Sehtests lassen sich Aussagen über die Sehschärfe des Modellauges machen (Aufnahme des Augenmodell aus Abb.7).

Sieht man von weiteren Abbildungsfehlern ab, so ergibt sich damit das Linsensystem von Modellauge und menschlichem Auge eine durch Beugung begrenzte maximale Auflösung von  $f = 1/(2d_{\text{Airy}})$ . Dabei bezeichnet  $d_{\text{Airy}} \approx 1,22\lambda \cdot k$  den Durchmesser des Beugungsscheibchens, der je nach Pupillenweite zwischen  $d_{\text{Airy}} = 4,7 \mu\text{m}$  bei sehr hellen Lichtverhältnissen und enger Pupille und  $d_{\text{Airy}} = 2,3 \mu\text{m}$  bei dunklen Lichtverhältnissen und entsprechend weit geöffneter Pupille liegt und damit in etwa dem mittleren und minimalen Zapfenabstand in der Fovea entspricht.

Sieht man von der zusätzlichen Reduktion der räumlichen Auflösung aufgrund der Interpolation beim Farbsehen ab und setzt voraus, dass die Abbildungsqualität durch Linsenfehler zusätzlich reduziert wird, ergibt sich hieraus bereits bei der Konstruktion des Modellaufes die auch für Schüler beeindruckende Erkenntnis, dass Auflösungsvermögen von Retina und Linse des menschlichen Auges perfekt aufeinander abgestimmt sind.

#### 4.2. Simulation einer "Virtuellen Retina"

Obschon das im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte Modell bereits weitere Einsichten in das komplexe Wechselspiel zwischen Linse und Netzhaut gewährt, hat es doch eine entscheidende Schwäche: Alle im Handel erhältlichen CCD-Sensoren liefern RGB-Daten für jeden Pixel. Das menschliche Auge hingegen liefert pro Zapfen nur eine Farbinformation, also rot, grün oder blau.



**Abb.9:** Aufnahme des Münsteraner Schlosses und simulierte Retina (links); Abbildung des Bildes auf die Retina + Interpolation der Farben über 4x4 zufällig verteilte bzw. 4x4 und 10x10 gleichverteilte Zapfen.

Auf den ersten Blick scheint das nicht weiter relevant zu sein. Man reduziert eben einfach die Auflösung um den Faktor vier, so dass die Farbe – ähnlich wie man es intuitiv für das Auge vermuten könnte – jeweils über vier Pixel (bzw. Zapfen) interpoliert wird.

Tatsächlich zeigt eine Simulation, bei der ein reales Bild, hier das Münsteraner Schloss, auf eine nach dem Vorbild der realen Retina randomisierte "virtuelle Retina" projiziert wird allerdings, dass im ersten Fall (Abb.9, oben rechts) bedingt durch die dem realen Auge nachempfundenen zufällige Anordnung roter und grüner "Zapfen" auf der virtuellen Retina auch eine Interpolation 4x4 Pixel nicht ausreicht, um eine korrekte Farbwiedergabe zu gewährleisten.

Die Simulation zeigt aber auch (Abb.9, mitte rechts): Bei einem weniger chaotischen Durcheinander von Rot und Grün, als Roorda und Williams 1999 bei zwei Probanden einer Studie zur Zapfenverteilung im menschlichen Auge beobachteten, müsste unser Gehirn nicht nur weniger Aufwand betreiben, um die korrekten Farben zu ermitteln, der Prozess würde darüber hinaus auch eine geringere Auswirkung auf das räumliche Auflösungsvermögen haben.

Proband	Rot (%)	Grün (%)	Blau (%)
A	75.8	20	4.2
B	50.6	44.2	5.2

**Tab.1:** Prozentuale Verteilung der "roten", "grünen" und "blauen" Zapfen im Auge von zwei Probanden aus einer Studie von Roorda & Williams [4].

Ein Blick auf die weiteren Ergebnisse der 1999 im Wissenschaftsmagazin Nature veröffentlichten Studie, deren Daten (Tab.1) auch als Referenz bei der Programmierung des Skripts für die Simulation verwendet wurden, birgt noch eine weitere im Hinblick auf den Ausgangspunkt der hier vorgestellten Überlegungen nicht ganz unrelevante Erkenntnis: So konnten Roorda & Williams zeigen, dass nicht nur die Verteilung, sondern auch die Verhältnisse von "roten" und "grünen" Zapfen von Individuum zu Individuum unterschiedlich sind.

Unser vermeintlich objektives Bild der Welt ist also insbesondere was seine Farbigkeit angeht letztlich weitaus weniger eindeutig als es die im Rahmen der Schulphysik auf die Bildentstehung auf der Netzhaut beschränkten Untersuchungen nahelegen scheinen.

#### 5. Fazit

Dass die Bildentstehung im Auge und ihre detaillierte Behandlung im Rahmen des Strahlenmodells zurecht einen der zentralen Lerninhalte des Optikunterrichts darstellt, steht außer Frage. Genauso unstrittig ist allerdings, dass "das Sehen", das ja also solches ausdrücklich in den Curricula aller Bundesländer als zentraler Themenkomplex des Physik- und Naturwissenschaftsunterrichts auftaucht, nicht beim Auftreffen der Lichtstrahlen auf die Netzhaut endet. Es erscheint daher sinnvoll die bewährte Unterrichtspraxis zu erhalten und sie abhängig von individuellen Rahmenbedingungen (Vorwissen der Schüler, Zahl der Unterrichtsstunden, Interesse von Schülern und Lehrern, etc.) zu ergänzen.

Vor diesem Hintergrund sind die in diesem Beitrag umrissenen Konzepte nicht in Konkurrenz, sondern als Ergänzung zur bisherigen Unterrichtspraxis gedacht. Als solche können sie einzeln oder in Form einer zusammenhängenden Unterrichtseinheit sowohl im Physikunterricht der Unter- (insbesondere 3.1) und Mittelstufe (3.2 und 4.1) als auch im fächerübergreifenden Projektunterricht (hier ist insbesondere die Programmierung des Programms zur Auswertung von Bilddaten zu nennen, s. 4.2) verwendet werden.

Auf diese Weise ließe sich nicht nur die von Schülerinnen und Schülern durchaus wahrgenommene Lücke in der unterrichtlichen Auseinandersetzung mit dem Sehprozesses schließen. Das Aufgreifen der hier vorgestellten Ideen würde auch eine vertiefte Auseinandersetzung mit andernfalls oftmals nicht oder nur kurz behandelten Unterrichtsinhalten, wie dem Auflösungsvermögen des Auges, den Grenzen der Wahrnehmung, der Rolle der additiven Farbmischung beim Sehvorgang oder dem Zusammenhang zwischen Farbe und Frequenz ermöglichen und etliche im Be-

reich des "Lernens über Physik" zu verortende Lernpotentiale (Modellbildung, Modellexperimente, Simulation, etc.) erschließen.

## 6. Literatur

- [1] Moussa, Adel (2009): "Flickenteppich aus Licht: Specklephänomene im Alltag." In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Bochum 2009.
- [2] Neri, Peter (2008): "Coarse to fine dynamics of monocular and binocular processing in human pattern vision." In: PNAS 108(26): 10726-10731.
- [3] NRW Bildungsministerium (2008): "Kernlehrplan Physik." Ritterbach Verlag GmbH, Frechen. S. 13.
- [4] Roorda, Austin; Williams, David R. (1999): "The arrangement of the three cone classes in the living human eye." Nature 397: 520-522.