

## Alternativvorschlag zur graphischen Darstellung von Anti-Farbladungen

Gerfried Wiener<sup>\*\*</sup>, Sascha Schmeling<sup>\*</sup>, Martin Hopf<sup>†</sup>

\*CERN, Genf, Schweiz; †Universität Wien, Österreichisches Kompetenzzentrum für Didaktik der Physik  
[gerfried.wiener@cern.ch](mailto:gerfried.wiener@cern.ch), [sascha.schmeling@cern.ch](mailto:sascha.schmeling@cern.ch), [martin.hopf@univie.ac.at](mailto:martin.hopf@univie.ac.at)

### Kurzfassung

Um der Forderung nach verstärkter Einbindung der modernen Physik im Unterricht nachzukommen, wurde am CERN ein Unterrichtskonzept entwickelt, welches auf den fundamentalen Grundlagen der Teilchenphysik aufbaut. Unter anderem wurden neuartige typographische Illustrationen von Elementarteilchen und Teilchen-Systemen entwickelt, welche im Kontext des Design Based Research mittels Akzeptanzbefragungen erprobt und adaptiert wurden. Im Zuge dessen wurde auch ein Alternativvorschlag zur graphischen Darstellung von Anti-Farbladungen erarbeitet, der auf die klassische Umsetzung durch Komplementärfarben verzichtet. Um diese Überlagerung mit voraussetzendem Wissen aus der Optik zu vermeiden, werden Anti-Farbladungen stattdessen durch eine gestreifte Musterung dargestellt. Dadurch sollen etwaige Fehlvorstellungen bezüglich des „Aussehens“ von Elementarteilchen a priori vermieden werden und gleichzeitig eine eindeutige Unterscheidung zwischen Teilchen und Anti-Teilchen ermöglicht werden. Eine erste Evaluierung mit Jugendlichen (Altersgruppe: 16-17 Jahre, n=42) sowie Physiklehrkräften (n=38) bestätigt den Alternativvorschlag als eindeutig vielversprechend und lernförderlich.

### 1. Einleitung

In den meisten Ländern ist das Kapitel der modernen Physik am Ende des jeweiligen Curriculums platziert – wenn überhaupt [1]. Aber nachdem diese Kapitel, im Speziellen das Standardmodell der Teilchenphysik, die wesentlichen Grundlagen für eine fundamentale Beschreibung der Natur bilden [2], kann dieser Umstand hinderlich für die Entwicklung von kohärenten Wissensstrukturen sein. Um der Forderung nach verstärkter Einbindung der modernen Physik im Unterricht nachzukommen, wurde daher am CERN ein Unterrichtskonzept entwickelt, welches auf den fundamentalen Grundlagen der Teilchenphysik aufbaut [3].

### 2. Theoretischer Hintergrund

Der Designprozess des Konzepts basierte auf dokumentierten Schülervorstellungen (students' conceptions). Neben der Betonung des permanenten Modellcharakters und damit einhergehender sprachlicher Exaktheit fußt das Konzept zusätzlich auf neuartigen typographischen Illustrationen von Elementarteilchen und Teilchen-Systemen (Abb.1). Der essentielle Charakter dieser Illustrationen begründet sich auf Ergebnissen fachdidaktischer Forschung der 1970er und 1980er Jahre, welche zeigten, dass sorgfältig konstruierte Abbildungen die Lernleistung von Jugendlichen verbessern [4]. Forschungsergebnisse der 1990er Jahre unterstützen diese Behauptung nachdrücklich, wenngleich es nach wie vor lernhinderliche Elemente in Illustrationen gibt, wie von

Cook [5] betont wird: *“Visual representations are essential for communicating ideas in the science classroom; however, the design of such representations is not always beneficial for learners.”*

Aktuelle Forschung legt daher den Fokus vermehrt auf die Erforschung und Entwicklung adäquater Illustrationen. In diesem Sinne wurden die typographischen Illustrationen im Kontext des Design Based Research [6] mittels Akzeptanzbefragungen nach Jung [7] erprobt und adaptiert, um lernförderliche sowie lernhinderliche Elemente zu ermitteln.

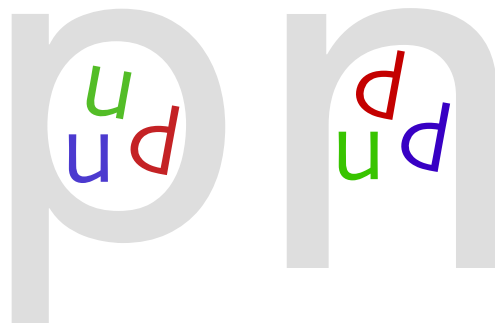


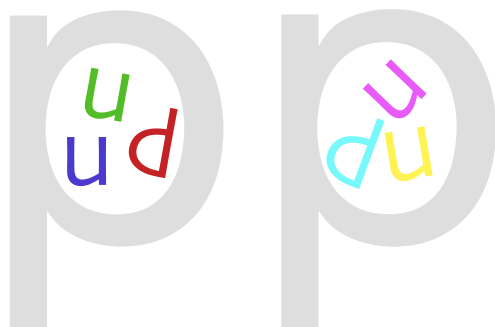
Abb.1: Typographische Illustration von Proton & Neutron

Im Zuge der Konzeptentwicklung wurde auch ein Alternativvorschlag zur graphischen Darstellung von Anti-Farbladungen erarbeitet, der auf die weit verbreitete Darstellung von Anti-Farbladungen durch die jeweiligen Komplementärfarben von rot, grün und blau verzichtet.

### 3. Konzeption des Alternativvorschlags

Im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik werden Elementarteilchen nach ihren jeweiligen Ladungen sortiert. Dabei bezeichnet man mit Ladung die Eigenschaft eines Teilchens, von einer fundamentalen Wechselwirkung beeinflusst zu werden. Im Modell der Quantenfeldtheorie ist mit Ausnahme der Gravitation jede fundamentale Wechselwirkung mit einer fundamentalen Ladung assoziiert. Die abstrakte Bezeichnung "Farbladung" als Ladung der starken Wechselwirkung geht auf die Arbeiten von Greenberg [8] bzw. Han & Nambu [9] der 1960er Jahre zurück und dient als prinzipielle Unterscheidung der sechs möglichen "farbgeladenen" Zustände von Quarks zur Beschreibung von "farbneutralen" Teilchen-Systemen. Diesem Modell zufolge müssen dann Teilchen-Systeme wie Mesonen, die von zwei Quarks gebildet werden, und Baryonen, die von drei Quarks gebildet werden, immer farbneutral sein. Das heißt, die beteiligten Farbladungen müssen sich gegenseitig "aufheben". Bei einem Meson geht das nur, wenn sich ein farbgeladenes Quark mit einem Quark verbindet, das dessen Anti-Farbladung besitzt. Für Baryonen gilt, dass alle drei Farbladung-Zustände bzw. alle drei Anti-Farbladung-Zustände vorhanden sein müssen.

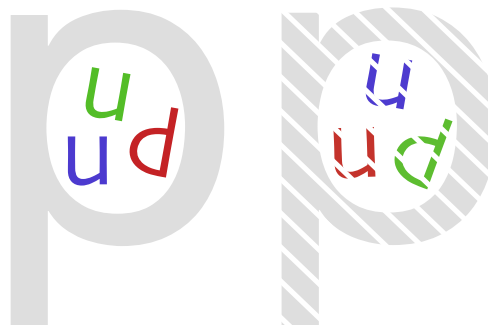
Allerdings ist die graphische Umsetzung von Farbladungen besonders hinsichtlich der Darstellung von Anti-Farben schwierig. Weit verbreitet ist die Lösung durch die jeweiligen Komplementärfarben von rot, grün und blau (Abb.2). Diese baut allerdings auf voraussetzendem Wissen aus der Optik auf, wodurch lernhinderliche Überlagerungen von verschiedenen Informationsinhalten zu erwarten sind.



**Abb.2:** Gegenüberstellung eines von (uud) gebildeten Protons und eines Anti-Protons, dessen Quarks in den jeweiligen Komplementärfarben dargestellt sind.

Zudem müssen Komplementärfarben immer für den dem jeweiligen Farbmodell zu Grunde liegenden Farbkreis definiert werden. Dies führt angesichts der Existenz verschiedener Farbmodelle, wie z. B. nach Newton [10] und nach Goethe [11], zu unvermeidbaren Schwierigkeiten, wie folgendes der Evaluation entnommene Zitat belegt: *"Ist die Komplementärfarbe von blau nicht orange, von grün rot und von gelb lila?"* [Schülerin, 17 Jahre]

Um diese Überlagerung mit voraussetzendem Wissen aus der Optik zu vermeiden, werden Anti-Farbladungen im Rahmen des vorgestellten Alternativvorschlags stattdessen durch eine gestreifte Musterung dargestellt (Abb.3). Dadurch sollen etwaige Fehlvorstellungen bezüglich des "Aussehens" von Elementarteilchen a priori vermieden werden und gleichzeitig eine eindeutige, lernförderliche Unterscheidung zwischen Teilchen und Anti-Teilchen ermöglicht werden.



**Abb.3:** Gegenüberstellung eines von (uud) gebildeten Protons und eines Anti-Protons, dessen Quarks in einer gestreiften Musterung dargestellt sind.

Durch die Beibehaltung der ursprünglichen Farben rot, grün und blau liefert allein die gestreifte Musterung die Unterscheidung zwischen Teilchen und Anti-Teilchen. Diese Form der Darstellung verzichtet daher auch bewusst auf die – wenngleich sehr elegante – lernhinderliche Argumentation, dass sich zwei entgegengesetzt farbgeladene Zustände "farbneutralisieren" können. Stattdessen wird auch hier dem permanenten Modellcharakter Rechnung getragen, indem betont wird, dass es sich nur um eine graphische Charakterisierung handelt, der man keine reale Entsprechung zuordnen kann.

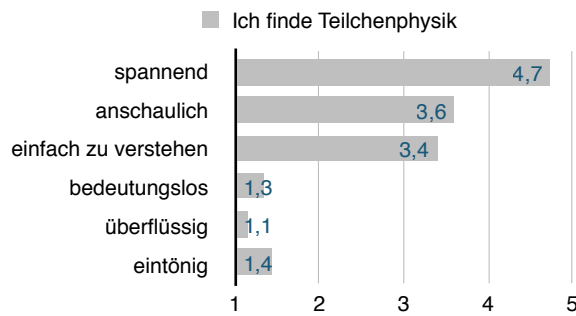
## 4. Evaluation

### 4.1 Setting

Der Alternativvorschlag wurde sowohl Jugendlichen (n=42) als auch Physiklehrkräften (n=38) im Rahmen von mehrtägigen CERN-Besuchen vorgestellt und von diesen mit Hilfe eines Fragebogens mit Single Choice und Multiple Choice Aufgaben evaluiert. Zusätzlich wurde mit Binärfragen die individuelle Bewertung beider Illustrationsmöglichkeiten erhoben. An der Evaluation nahmen folgende drei Gruppen teil:

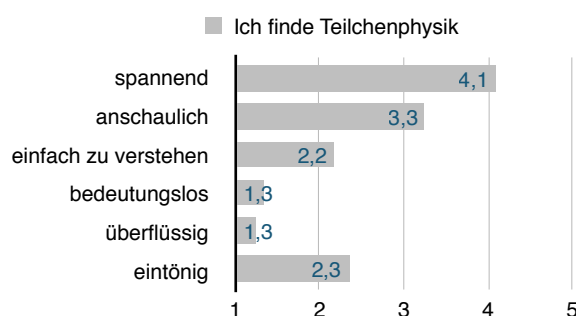
- Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshop  
n=29, Ø 17,2 Jahre
- DLP Alumnus Jugendworkshop  
n=13, Ø 16,3 Jahre
- Österreichisches CERN-Lehrerprogramm  
n=38, Ø 43,0 Jahre

Bei a) handelt es sich um Jugendliche aus ganz Deutschland, die sich im mehrstufigen Programm des Netzwerks Teilchenwelt [12] qualifiziert haben, um am mehrtägigen CERN-Jugendworkshop teilnehmen zu können. Aufgrund deren Vorkenntnisse können die Jugendlichen als Experten bezeichnet werden, da die Kenntnis der Farbladung voraussetzen ist. Wenig verwunderlich bringen diese der Teilchenphysik enormes Interesse entgegen, wie die folgende Erhebung (Abb.4) zeigt, die zu Beginn der Evaluation durchgeführt wurde.



**Abb.4:** Ergebnisse des Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshops (n=29) zum Teilchenphysik-Interesse, mit der Skaleneinteilung: (1) *stimmt gar nicht*, (2) *stimmt wenig*, (3) *stimmt teilweise*, (4) *stimmt ziemlich*, (5) *stimmt völlig*.

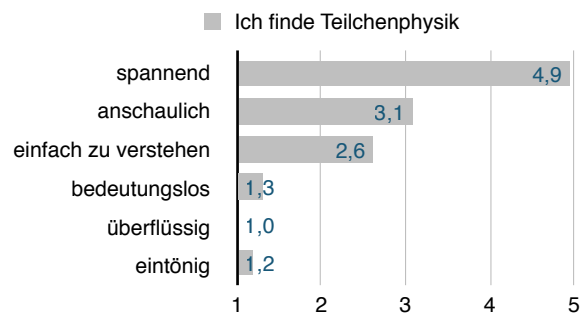
Der unter b) angeführte Jugendworkshop unterscheidet sich wesentlich vom Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshop. Hierbei handelt es sich um eine einzelne Schulklasse, für die die begleitende Lehrperson als Alumnus des *Deutschen CERN-Lehrerprogramms* (DLP) einen mehrtägigen CERN-Besuch organisiert hat. Zum Zeitpunkt dieses Besuchs verfügten die Jugendlichen nur über geringe Kenntnisse der Teilchenphysik. Die Inhalte der Farbladung waren gänzlich unbekannt, weshalb diese Jugendlichen für die Evaluation als Novizen erachtet werden können. Deren Antworten zum Interesse bezüglich der Teilchenphysik sind in (Abb.5) dargestellt.



**Abb.5:** Ergebnisse des DLP Alumnus Jugendworkshops (n=13) zum Teilchenphysik-Interesse, mit der Skaleneinteilung: (1) *stimmt gar nicht*, (2) *stimmt wenig*, (3) *stimmt teilweise*, (4) *stimmt ziemlich*, (5) *stimmt völlig*.

Zusätzlich zu den Jugendlichen der beiden erstgenannten Gruppen beinhaltet c) Physiklehrkräfte aus ganz Österreich, die Ende 2014 am einwöchigen *Österreichischen CERN-Lehrerprogramm* teilnah-

men. Es ist von einer heterogenen Verteilung des Vorwissens bezüglich der Teilchenphysik auszugehen, die Erhebung bezüglich des Teilchenphysik-Interesses (Abb.6) fiel allerdings eindeutig aus.



**Abb.6:** Ergebnisse des *Österreichischen CERN-Lehrerprogramms* (n=38) zum Teilchenphysik-Interesse, mit der Skaleneinteilung: (1) *stimmt gar nicht*, (2) *stimmt wenig*, (3) *stimmt teilweise*, (4) *stimmt ziemlich*, (5) *stimmt völlig*.

Ein Vergleich der drei Gruppen zeigt, dass trotz der unterschiedlichen Voraussetzungen und Vorkenntnisse ein durchgehend sehr großes Interesse bezüglich der Inhalte der Teilchenphysik vorherrscht.

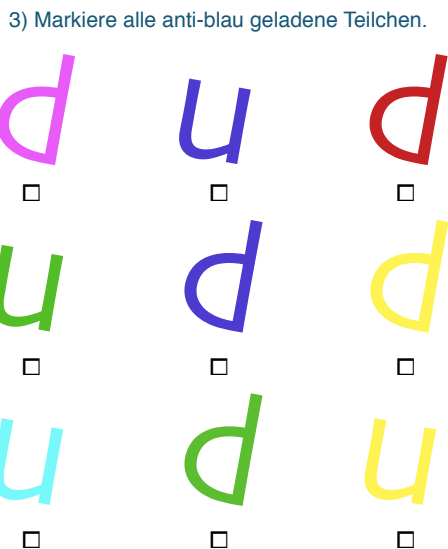
#### 4.2 Fragebogen

In weiterer Folge wurde jeder Gruppe eine kurze Zusammenfassung des Kapitels der Farbladung vorgelegt und im Anschluss daran beide Illustrationen zur graphischen Darstellung von Farbladungen mit Hilfe eines Fragebogens evaluiert. Dieser basiert auf Single und Multiple Choice Aufgaben, bei denen jeweils die richtige Anti-Farbladung angekreuzt werden muss. Jede Aufgabe ist sowohl für Anti-Quarks, deren Anti-Farbladung durch die jeweilige Komplementärfarbe dargestellt ist, zu lösen, als auch für Anti-Quarks, deren anti-farbgeladener Zustand durch eine gestreifte Musterung illustriert wird. Pro Illustration gab es vier identische Fragestellungen, wobei die ersten zwei Aufgaben (Abb.7) in ihrer Konzeption ähnlich sind. Der vollständige Fragebogen ist im Anhang beigefügt.



**Abb.7:** Exemplarische Darstellung der ersten zwei Aufgaben. Aus Platzgründen ist hier jeweils nur eine Illustration der Anti-Farbladung abgebildet.

Die dritte Aufgabe (Abb.8) ähnelt den ersten zwei Aufgaben, allerdings konzentriert sich die Fragestellung ausschließlich auf die Anti-Farbladung. Insgesamt stehen neun mögliche Anti-Quarks (und Quarks) zur Auswahl, wobei mehrere Antwortmöglichkeiten korrekt sein können.



**Abb.8:** Exemplarische Darstellung der dritten Aufgabe. Aus Platzgründen ist hier nur die Version zur Illustration durch Komplementärfarben abgebildet.

Die vierte und letzte Aufgabe (Abb.9) konzentriert sich auf Mesonen als farbneutrale Teilchen-Systeme. Analog zu den vorhergegangenen Aufgaben gilt es hier "korrekt dargestellt" Teilchen-Systeme zu identifizieren, also Systeme bestehend aus entgegengesetzt farbgeladenen Quarks und Anti-Quarks. Die Fragestellung stellt 12 Teilchen-Systeme zur Auswahl und beide Darstellungsversionen werden parallel verwendet, wobei auf eine Vermischung beider Illustrationen innerhalb eines Teilchen-Systems verzichtet wurde, um unnötige Verwirrung zu vermeiden.

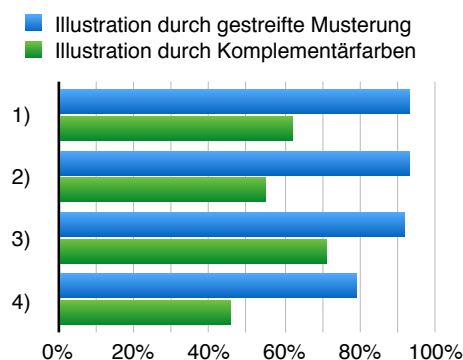


**Abb.9:** Exemplarische Darstellung der vierten Aufgabe. Aus Platzgründen sind hier nur vier der 12 zur Auswahl stehenden Teilchen-Systeme abgebildet.

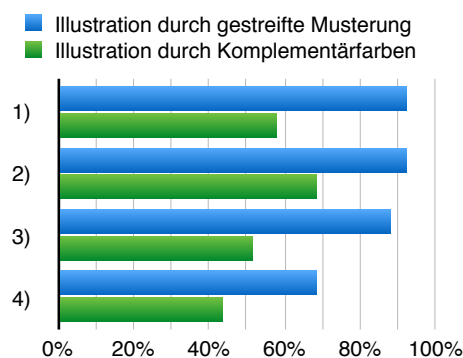
### 4.3 Ergebnisse

Die Evaluation des Alternativvorschlags fiel für alle drei Gruppen äußerst positiv aus. Bei allen vier Aufgaben führte die Darstellung der Anti-Farbladung durch gestreifte Musterung zu signifikant mehr richtigen Antworten. Sehr erfreulich ist dabei zu sehen, dass alle drei Gruppen trotz unterschiedlicher Vorkenntnisse vergleichbar gute Ergebnisse erzielen konnten. Vor allem die ersten drei Aufgaben wurden mit durchschnittlich mehr als 90% korrekten Antworten von allen drei Gruppen sehr erfolgreich gelöst. Die vierte Aufgabe fiel diesbezüglich mit 70-80% korrekten Antworten nur geringfügig ab.

Demgegenüber schnitt die herkömmliche Darstellungsvariante durch Komplementärfarben deutlich schlechter ab, wenngleich es hier zwischen den drei Gruppen zu den erwarteten unterschiedlichen Ergebnissen kam. Im Vergleich zu den Jugendlichen des Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshops (Abb. 10) und den Lehrpersonen des *Österreichischen CERN-Lehrerprogramms* (Abb.11), die bereits über breites Vorwissen bezüglich der Thematik der Farbladung verfügten, lösten die Jugendlichen des DLP Alumnus Jugendworkshops (Abb.12) weniger Aufgaben korrekt.



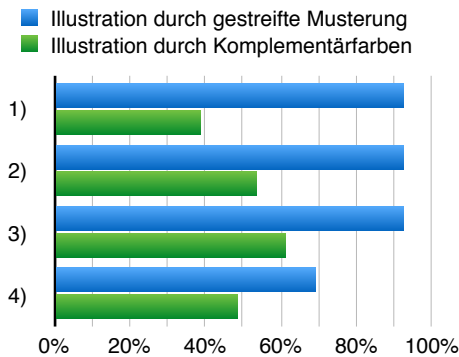
**Abb.10:** Ergebnisse des Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshops; korrekte Antworten sortiert nach Illustration.



**Abb.11:** Ergebnisse des *Österreichischen CERN-Lehrerprogramms*; korrekte Antworten sortiert nach Illustration.

Allerdings kann man im Fall des DLP Alumnus Jugendworkshops einen Lerneffekt erkennen, da sich die Ergebnisse der Novizen im zeitlichen Verlauf der ersten drei Aufgaben an das Niveau der Experten an-

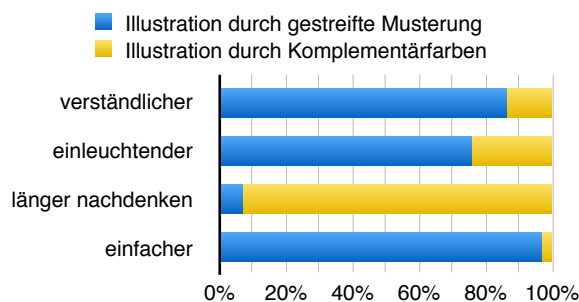
gleichen. Die vierte – und komplexeste – Aufgabe wurde in der Darstellung durch Komplementärfarben dann sowohl von den Experten als auch den Novizen mit zumindest 45% korrekten Antworten gelöst.



**Abb.12:** Ergebnisse des DLP Alumnus Jugendworkshops; korrekte Antworten sortiert nach Illustration. Die korrekten Antworten für die Illustration durch Komplementärfarben nehmen über die ersten Aufgaben eindeutig zu, was auf einen Lerneffekt schließen lässt.

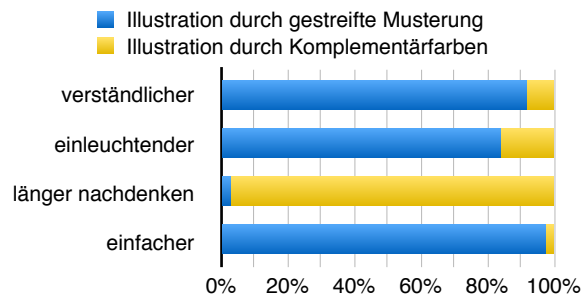
Um auf den Ergebnissen der Evaluation aufbauen zu können, wurden am Ende des Fragebogens auch noch Entscheidungsfragen zwischen den zwei Illustrationsmöglichkeiten gestellt. Dabei ging es ausschließlich um die subjektive Bewertung der beiden Illustrationen, welche Darstellung als verständlicher, einleuchtender und einfacher empfunden wird. Zusätzlich wurde auch noch abgefragt, inwiefern die subjektiv empfundene Nachdenkzeit von der jeweiligen Illustration abhängt.

Sowohl die Jugendlichen des Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshops (Abb.13) als auch die Lehrpersonen (Abb.14) sprachen sich in ihrer Bewertung als Experten bezüglich der Verständlichkeit und Einfachheit geschlossen für die Illustration von Anti-Farbladung durch gestreifte Musterung aus.



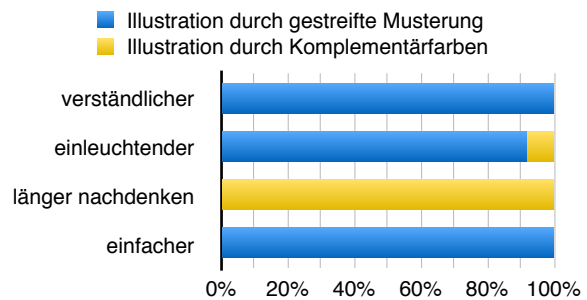
**Abb.13:** Ergebnisse des Netzwerk Teilchenwelt Jugendworkshops; individuelle Bewertung beider Illustrationen.

Ebenso positiv fiel die Bewertung des Alternativvorschlags durch die Jugendlichen des DLP Alumnus Jugendworkshops (Abb.15) aus, wobei deren Beurteilung als Novizen sogar noch eindeutiger gestaltet war. So wurde die gestreifte Musterung zum Beispiel jeweils zu 100% als verständlicher und einfacher kategorisiert.



**Abb.14:** Ergebnisse des Österreichischen CERN-Lehrerprogramms; individuelle Bewertung beider Illustrationen.

Zudem bestätigen die individuellen Bewertungen aller drei Gruppen die dem Alternativvorschlag zu Grunde liegende Annahme, dass durch die gestreifte Musterung eine eindeutiger Unterscheidung zwischen Teilchen und Anti-Teilchen ermöglicht wird und die subjektiv empfundene zur Problemlösung benötigte Nachdenkzeit dadurch verringert wird.



**Abb.15:** Ergebnisse des DLP Alumnus Jugendworkshops; individuelle Bewertung beider Illustrationen.

## 5. Diskussion

Der hier präsentierte Alternativvorschlag zur Darstellung von Anti-Farbladung erwies sich im Rahmen der Evaluation als sehr erfolgreich. Die Anzahl an korrekt gelösten Entscheidungsaufgaben überwiegt im Vergleich zur herkömmlichen Illustration durch Komplementärfarben deutlich.

Die eindeutige Mehrheit der Jugendlichen und Lehrkräfte bewertet die Illustration durch gestreifte Musterung als verständlicher und einleuchtender, wie folgendes der Evaluation entnommene Zitat unterstreicht: *“Rein vom Verständnis ist die Abbildung durch die Komplementärfarben zwar logisch, da diese ohnehin schon das Gegenteil illustrieren. Überaus einfacher für mich persönlich ist jedoch die gestreifte Version, da diese leichter zu erkennen ist.”* [Schüler, 16 Jahre]

Des weiteren zeigen die subjektiven Bewertungen eine drastische Reduzierung der zur Problemlösung benötigten Nachdenkzeit. Vor allem unter diesem Gesichtspunkt erweist sich der Alternativvorschlag als besonders lernförderlich und äußerst vielversprechend. Als Fazit dieser Untersuchung empfehlen wir daher für zukünftige Verwendung die Illustration von Anti-Farbladungen durch gestreifte Musterung.

## 6. Literatur

- [1] Mullis, I., Martin, M., Minnich, C., Stanco, G., Arora, A., Centurino, V. & Castle, C. (2012). TIMSS 2011 Encyclopedia: Education Policy and Curriculum in Mathematics and Science. Chestnut Hill, MA: TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College
- [2] Griffiths, D. (2004). Introduction to elementary particles. Weinheim: Wiley-VCH
- [3] Wiener, G. J., Schmeling, S. M. & Hopf, M. (2015). Can Grade-6 students understand quarks? Probing acceptance of the subatomic structure of matter with 12-year-olds. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 3(4)
- [4] Carney, R. N. & Levin, J. R. (2002). Pictorial Illustrations Still Improve Students' Learning From Text. *Educational Psychology Review*, 14, 5-26
- [5] Cook, M. P. (2006). Visual Representations in Science Education: The Influence of Prior Knowledge and Cognitive Load Theory on Instructional Design Principles. *Science Education*, 90, 1073-1091
- [6] Design-Based Research Collective (2003). Design-based Research: an emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, 32, 5-8
- [7] Jung, W. (1992). Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Ed.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, 278-295
- [8] Greenberg, O. W. (1964). Spin and Unitary-Spin Independence in a Paraquark Model of Baryons and Mesons. *Phys. Rev. Lett.*, 13(20), 598-602
- [9] Han, M. Y. & Nambu, Y. (1965). Three-Triplet Model with Double SU(3) Symmetry. *Phys. Rev.* 139(4B), 1006-1010
- [10] Newton, I. (1984). *The Optical Papers of Isaac Newton. Vol. 1: The Optical Lectures, 1670–1672*. Cambridge: U. Press
- [11] Goethe, J.W. (1810). *Zur Farbenlehre*. Bd. 1 und 2. Tübingen: Cotta
- [12] Homepage des Netzwerks Teilchenwelt: <http://www.teilchenwelt.de> (Stand: 5/2015)



## 7. Anhang

Farbladung & Anti-Farbe | Fragebogen zur graphischen Darstellung von Quarks  
CERN 2014 | [gerfried.wiener@cern.ch](mailto:gerfried.wiener@cern.ch)

### A) Aufgaben zur Illustration durch Komplementärfarben

1. Markiere das anti-grün geladene up-quark.

u

u

u

2. Markiere das anti-blau geladene down-quark.

d

d

d

3. Markiere alle anti-rot geladene Teilchen.

u

d

u

d

u

u

d

u

d

Abb.16: Zur Evaluation verwendeter Fragebogen; Aufgaben 1-3 zur Illustration durch Komplementärfarben

**B) Aufgaben zur Illustration durch gestreifte Musterung**

1. Markiere das anti-blau geladene up-quark.



2. Markiere das anti-rot geladene down-quark.



3. Markiere alle anti-grün geladene Teilchen.



**Abb.17:** Zur Evaluation verwendeter Fragebogen; Aufgaben 1-3 zur Illustration durch gestreifte Musterung



C) Aufgaben zu beiden Illustrationen

4. Markiere alle farbneutralen Teilchen-Systeme.

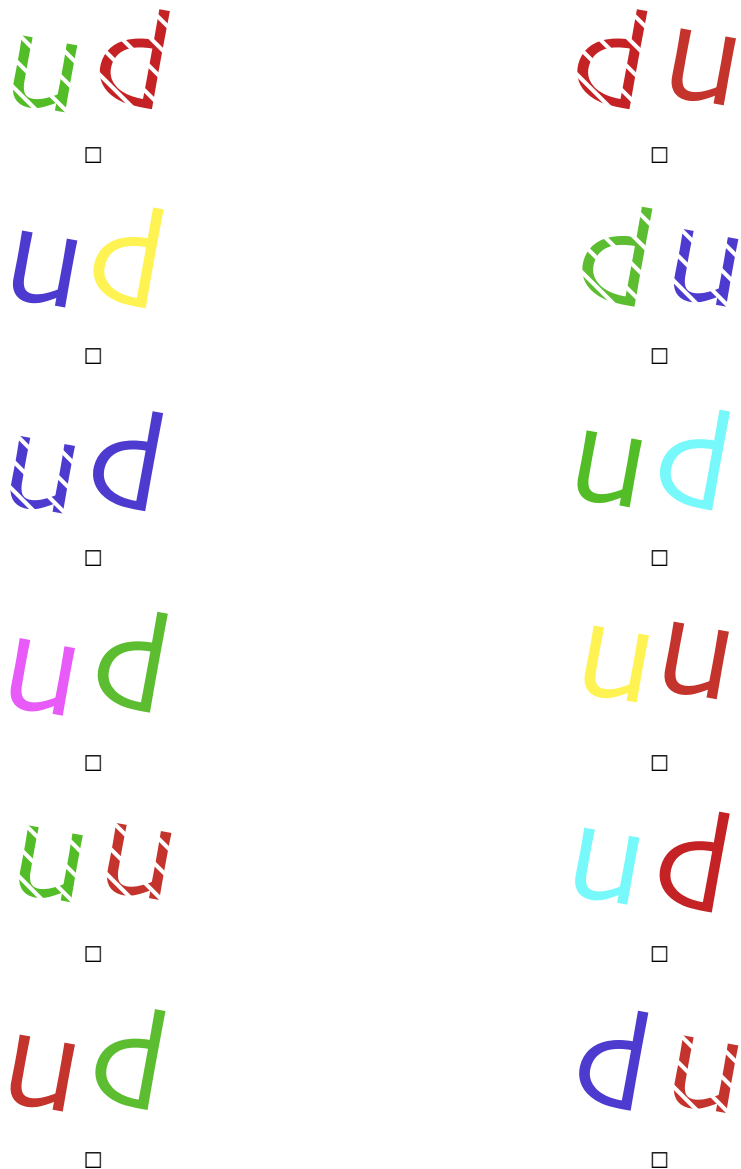


Abb.18: Zur Evaluation verwendeter Fragebogen; Aufgabe 4 zu beiden Illustrationen