





## Farben: Praktikum We 1

### Übersicht

- 1  Seiten 2 und 3:
  - Beschreibung von Wellen und ihren Eigenschaften
  - Beschreibung der Lichtwellen
  - Vorbereitung des Experimentes zur Bestimmung der Wellenlänge von Licht
- 2  Seiten 4 – 6
  - Bestimmung der Wellenlängen von rotem Laserlicht und allen Spektralfarben
- 3  Seiten 7 und 8
  - Additive und subtraktive Farbmischung
  - Aufbau des Farbkreises
- 4  Stichwortliste zur Orientierung und zum Repetieren im Kasten rechts.

**Longitudinalwelle, Transversalwelle, Wellenlänge, Frequenz, Periode, Amplitude, Wellengeschwindigkeit, Elementarwelle, konstruktive und destruktive Interferenz**

**Strukturfarben, monochromatisches Licht, Polarisation, Beugung am Doppelspalt, Strichgitter, Hauptmaximum, Nebenmaximum, Spektrum des sichtbaren Lichtes, Spektrum der elektromagnetischen Strahlung**

**subtraktive und additive Farbmischung, 6-Farben-Kreis, Primär-, Sekundär-, Tertiär-, Komplementärfarben.**

**Longitudinal- und Transversalwellen**

- 5 ⓘ Schallwellen (siehe Kasten rechts) sind **Longitudinalwellen (Längswellen)**, denn die Materieteilchen schwingen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle.
- 6 ⓘ Dies ist anders bei Wasserwellen oder Wellen entlang eines Seiles: Hier schwingen die Materieteilchen quer zur Ausbreitungsrichtung. Man spricht deshalb von **Transversalwellen (Querwellen)**.
- 7 ? Konstruieren Sie die zwei fehlenden „Momentaufnahmen“ einer Transversalwelle im Kasten unten rechts.  
Aus der Konstruktion einer Welle können wir direkt den folgenden Zusammenhang zwischen Wellengeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge ablesen:

**Für die Wellengeschwindigkeit gilt:**

**Lichtwellen**

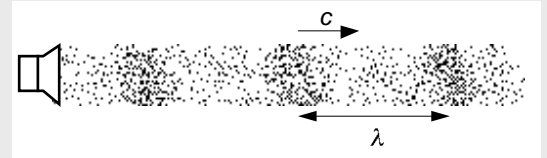
- 8 ⓘ Von der Wellennatur des Lichtes wurden Sie aufgrund der Beugung am Doppelspalt schon überzeugt (siehe Skript zur Einführung: Schlüsselexperimente). Das dort beobachtete Beugungsmuster erklärten wir durch die **konstruktive** und **destruktive Interferenz** von Wellen.  
Wenn das Licht Wellencharakter hat, stellt sich auch die Frage nach der Art der Wellen. Sind Lichtwellen transversal oder longitudinal? Die Frage kann durch Experimentieren mit **Polarisationsfiltern** beantwortet werden. Experiment:

**Lichtwellen sind**

- 9 ⓘ Die Lichtwellen breiten sich mit der **Lichtgeschwindigkeit (c)** aus. In Luft ist die Lichtgeschwindigkeit fast so gross wie im Vakuum. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist die grösstmögliche Geschwindigkeit im Universum. Sie ist eine Naturkonstante.

**Die Lichtgeschwindigkeit beträgt im Vakuum genau  $c = 299'792'458 \text{ m/s}$**

Anfangs Sekunda wurden Sie im Physikunterricht mit Wellenphänomenen konfrontiert, als Sie die Schallausbreitung studierten (Script 3: *Also fangen wir an und forschen!*). Für die **Schallwellen** legen wir uns folgendes Bild zurecht:

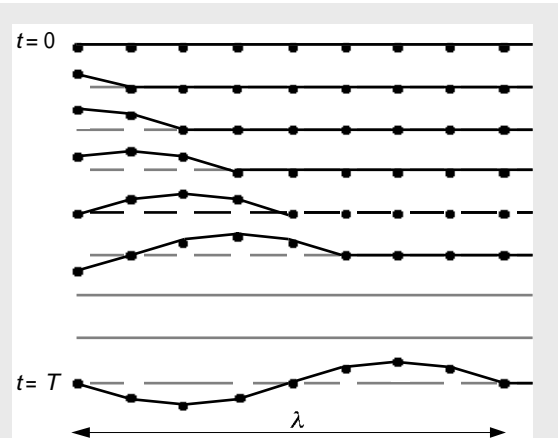


**Die Schallwelle ist eine Longitudinalwelle**

Eine **Schallquelle** (z.B. ein Lautsprecher) erzeugt fortwährend **Verdichtungen** und **Verdünnungen** in der Luft, welche sich mit **Schallgeschwindigkeit** von der Quelle entfernen.

Die **Tonhöhe** hängt von der **Frequenz** und die **Lautstärke** von der **Amplitude** der Schallschwingung ab.


Den Abstand zwischen zwei Verdichtungen einer Schallwelle nennt man die **Wellenlänge der Schallwelle**.





**Eine Seilwelle ist eine Transversalwelle**

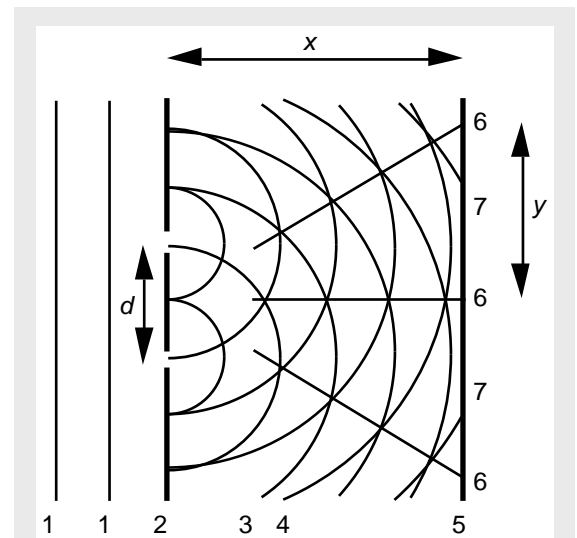
A **Amplitude** der Welle = Amplitude eines schwingenden Massepunktes  
 f **Frequenz** der Welle                      Einheit: 1 Hz  
 T **Periode** der Welle                       $T = 1/f$   
 λ **Wellenlänge** ( $\lambda$ : griech. Buchstabe Lambda)  
 c **Wellengeschwindigkeit** = Ausbreitungsgeschwindigkeit

## Das Doppelspaltexperiment

- 10  Zur Erinnerung an die **Interferenz am Doppelspalt**: Ein Laserstrahl (als ebene Lichtwelle zu betrachten) wird auf zwei schmale Spalten von geringem gegenseitigem Abstand gerichtet. Es zeigt sich das analoge Bild zur Beugung von Wasserwellen am Doppelspalt: Auf dem Schirm sind etwa nicht nur zwei helle Lichtflecken zu sehen, sondern mehrere, nach aussen schwächer werdende.

### Beugungsbild des Doppelspaltes:

- 11  Der Beugungs-Effekt kann verstärkt werden, indem das Licht nicht durch zwei, sondern durch viele Spalten (durch ein **Strichgitter**) geschickt wird: Die Lichtpunkte werden dadurch heller und deutlicher voneinander getrennt. An der nachfolgenden Berechnung der Wellenlänge aufgrund des Beugungsbildes am Doppelspalt ändert sich dadurch aber nichts.
- 12  Protokollieren Sie unten die Ausführungen, die Sie anschliessend zur **Bestimmung der Wellenlänge** vom Licht eines roten Lasers benötigen werden.



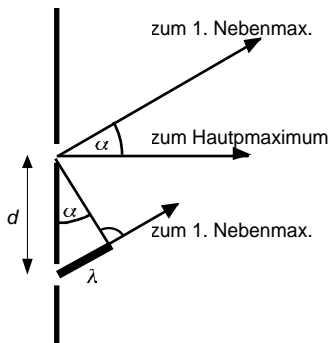
### Zur Interferenz des Lichtes am Doppelspalt.

#### Die Zahlen bedeuten:

- 1 ebener Wellenberg eines Lichtstrahls
- 2 Blende mit 2 Spalten im Abstand  $d$
- 3 Wellenberg einer vom unteren Spalt ausgehenden Elementarwelle
- 4 Wellenberg einer vom oberen Spalt ausgehenden Elementarwelle
- 5 Schirm
- 6 Helligkeitsmaximum:  
"Licht + Licht = helles Licht"  
In der Mitte ist das **Hauptmaximum**. Daneben liegt auf beiden Seiten je das **erste Nebenmaximum**.
- 7 dunkle Stelle auf dem Schirm:  
"Licht + Licht = Dunkelheit"

### Bestimmung der Lichtwellenlänge

- 13 ? Sie werden nun mit Hilfe einer CD, welche Sie als Strichgitter verwenden, und der rechts abgedruckten Beschreibung einer CD die Wellenlänge von rotem Laserlicht durch eine Messung bestimmen. Die Elemente der Rechnung ergeben sich aus den folgenden Überlegungen. (Siehe auch Seite 3)
- Das **Hauptmaximum** ist die hellste Stelle auf dem Schirm. Wellenberge, die gleichzeitig durch die beiden Spalten treten, treffen auch gleichzeitig auf dieser Stelle des Schirmes auf. Dies führt dort zu konstruktiver Interferenz.
  - Beim **1. Nebenmaximum** treffen ebenfalls gleichzeitig die Wellenberge (resp. die Wellentäler) ein. Deshalb entsteht auch hier konstruktive Interferenz. Der Unterschied zum Hauptmaximum ist aber der, dass jener Wellenberg, der vom entfernteren Spalt her kommt einen etwas weiteren Weg hat. **Dieser Wegunterschied muss genau eine Wellenlänge** betragen.
  - Dieses Kriterium verwenden Sie nun für die Berechnung der Wellenlänge aus dem **Spaltenabstand  $d$** , der **Distanz  $x$**  zwischen dem Schirm und dem Doppelspalt und aus der **Distanz  $y$**  zwischen dem Haupt- und dem ersten Nebenmaximum.



Die Lichtwege von den beiden Spalten zum 1. Nebenmaximum verlaufen nahezu parallel, da im Experiment  $x \gg d$  ist.

- Aus den Überlegungen geht hervor, dass für  $\sin \alpha$  zwei Ausdrücke angegeben werden können. Durch Gleichsetzen und Umformen gewinnen Sie einen Ausdruck für die Wellenlänge.

Somit erhält man für die **Wellenlänge**

**$d$**  Abstand der Spalten des Strichgitters  
 **$y$**  Abstand zwischen Haupt- und 1. Nebenmaximum  
 **$x$**  Abstand zwischen Strichgitter und Hauptmaximum

### Optische Datenspeicherung


Kaum eine Technologie für den optimalen Umgang mit Schriftgut hat sich in den letzten Jahren so rasant entwickelt wie die optische Speichertechnologie. Die verbreitetste Technik ist dabei **CD-ROM**. Die Buchstabengruppe "CD" steht für Compact Disc und meint technisch die gleiche Plastikscheibe, auf der auch die Hits für die Stereo-Anlage geliefert werden. "ROM" steht für "read only memory", also für einen Speicher, der nur gelesen, nicht aber verändert werden kann.

Im Vergleich zu einer magnetischen Speicherplatte (z.B. Diskette) finden wir einige markante Unterschiede. Da ist zum Beispiel die Anordnung der Spuren auf der Platte. Bei Magnetplatten sind diese in konzentrischen Kreisen angeordnet. Auf der CD dagegen finden wir eine Spirale. Das bedeutet gleichzeitig, daß auf der Magnetplatte die Bereiche in der Plattenmitte dichter beschrieben sind als die Bereiche am Rand. Auf der CD dagegen finden wir eine Spur von gleichbleibender Informationsdichte verteilt über die ganze Scheibe. Die Organisation der CD ist wesentlich komplizierter als die einer Magnetplatte. Als Nutzer spüren wir allerdings nichts davon.

### Das Leseverfahren

Wie kann man nun eigentlich so dicht gepackte Informationen von einer CD überhaupt lesen? Das Geheimnis der CD-ROM sind ungeheuer kleine Vertiefungen. Auf den Datenspuren der CD sind längliche Gräben, sogenannte Pits, eingelassen. In entsprechender Vergrößerung erinnern sie an Spuren im Schnee. Sie werden in diesem Fall durch einen mechanischen Pressvorgang erzeugt und sind natürlich nicht mehr veränderbar, denn auf dieser informationstragenden Schicht befindet sich eine immerhin 1,2 mm dicke Schicht aus durchsichtigem Polycarbonat.

Der Laserstrahl, der die Datenspur abtastet, wird durch die Brechung dieser Polycarbonatschicht auf einen Lichtpunkt von nur 1,7 Mikrometer verdichtet. Dieser Lichtpunkt überstreicht die Datenspuren. Eine lichtempfindliche Diode erkennt nun einen Unterschied in der zurückgeworfenen Lichtstärke, je nachdem, ob gerade ein Pit überstrichen wird oder die umgebende Fläche, das sogenannte "Land". Natürlich reflektiert der Boden eines Pit genauso gut wie das höherliegende Land. Es ist das gleiche Material. Was also macht den Unterschied? Das eigentliche Geheimnis liegt in der ungeheuren Winzigkeit dieser Strukturen. Die Tiefe eines Pit beträgt gerade mal 0,12 Mikrometer, **genau ein Viertel der benutzten Lichtwellenlänge**. Das wiederum bedeutet, die zurücklaufenden Lichtwellen von Pit und Land **löschen** sich gegenseitig aus. Die Photodiode erkennt einen Unterschied in der Lichtintensität immer dann, wenn der Lichtpunkt die Grenze zwischen Pit und Land überschreitet. Genau mit diesem Übergang wird die

14  Für die Messung verwenden Sie eine gewöhnliche **CD als Strichgitter**.

- Erzeugen Sie durch geeignete Anordnung ein Beugungsbild mit dem Hauptmaximum und den beiden 1. Nebenmaxima auf dem Schirm. Skizzieren Sie die Anordnung.
- Zeichnen Sie (ohne den Schirm zu verschieben) das Hauptmaximum und die beiden 1. Nebenmaxima auf dem Schirm auf.
- Messen Sie die Distanz  $x$  zwischen Strichgitter und der Mitte des Hauptmaximums.
- Nun können Sie den Schirm wegnehmen und die Distanzen zwischen dem Hauptmaximum und den beiden 1. Nebenmaxima messen. Verwenden Sie für  $y$  den Mittelwert davon.
- Bestimmen Sie den Spaltenabstand  $d$  aus den Angaben im Text rechts.
- Berechnen Sie die Wellenlänge  $\lambda$  des Lichtes.
- Versuchsergebnisse:

**Lichtfarbe:**

$d =$

$x =$

$y =$

$\lambda =$

15 ? Damit durch ein weiteres Experiment **jeder Farbe** des Spektrums eine **Wellenlänge** zugeordnet werden kann, beantworten Sie durch eine Rechnung die folgende Frage:

Wie gross ist für die vorgegebenen Wellenlängen die Entfernung zwischen dem Hauptmaximum und dem ersten Nebenmaximum, wenn ein Strichgitter mit 13'000 „lines per inch“ 2 Meter weit vom Schirm entfernt aufgestellt wird?

Wellenlänge	$y$ in cm
200 nm	
400 nm	
600 nm	
800 nm	
1000 nm	

Information entschlüsselt. Immer, wenn Pit und Land sich abwechseln, entsteht eine 1. Unterbleibt der Wechsel an der vorgesehenen Stelle, entsteht eine 0.

#### Die Größenverhältnisse

Ein Mikrometer ist etwas ungeheuer Winziges. Der Anschaulichkeit wegen noch ein paar Anhaltspunkte dazu: Ein Meter teilt sich in 1000 Millimeter und jeder Millimeter teilt sich in 1000 Mikrometer. Jeder Mikrometer wiederum in 1000 Nanometer. Große einzelne Moleküle, zum Beispiel der blaue Blutfarbstoff der Weinbergschnecke, erreichen bereits 20 nm (Nanometer). Die Wellenlänge von violetterem Licht beginnt bei 380 nm. Rot endet bei 800 nm. Der Abstand zwischen zwei Spuren auf der CD beträgt 1 Mikrometer, also 1000 Nanometer. Die Breite der Pits beträgt 600 nm. Ein menschliches Haar ist dagegen 30000 nm dick.

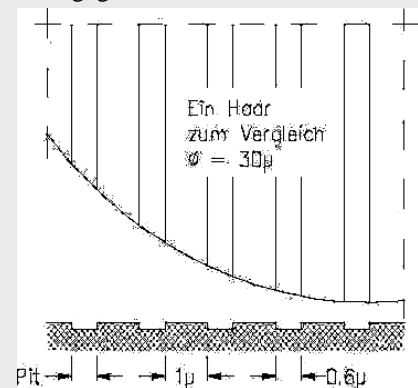


Abb. 10: Abstand der CD-Spuren im Vergleich zur Haardicke. Von der Mitte einer Spur zur Mitte der nächsten Spur sind es 1.6  $\mu\text{m}$ .

#### Warum schillert eine CD?

Eine Frage noch: Warum schillert eigentlich eine CD so wunderbar? Die wohlfeile Antwort lautet: Das ist wie bei einem Prisma und entsteht durch die Brechung in der Polycarbonatschicht. Aber diese Antwort ist **falsch**.

Eine CD schillert bereits während des Herstellungsprozesses, noch bevor der Schutzlack aus Polycarbonat überhaupt aufgebracht ist. In Wirklichkeit gibt das Schillern **Strukturfarben** wieder: Die winzigen Vertiefungen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge bewirken, daß verschiedenfarbiges Licht abhängig vom Betrachtungswinkel verschieden gut reflektiert wird. (Besser wäre es, mit konstruktiver und destruktiver Interferenz zu erklären. Anmerkung M.Wey)

Dieser Effekt ist ähnlich wie bei blauen Augen: Auch die Iris ist nicht durch Pigmente gefärbt, sondern durch solche winzigen Strukturen. Und auch das Gefieder vieler Vögel erhält seine Farbenpracht auf diese Weise.

Quelle:

<http://www.knowhow-kompakt.com/am/schrig/amsg010.htm>

## Farbe und Wellenlänge

- 16 ? Mit der vorangegangenen Aufgabe haben Sie eine Wellenlängenskala berechnet, welche uns nun erlaubt, für das ganze Spektrum eine Zuordnung Farbe  $\leftrightarrow$  Welle vorzunehmen. Tragen Sie das Versuchsergebnis mit der entsprechenden Farbe hier ein.



Das Spektrum des Lichtes: Die Farbe des Lichtes als Funktion der Wellenlänge

- 17 ⓘ Weitere komplexe Versuche würden zeigen: Lichtwellen sind von elektromagnetischer Natur; das was schwingt sind elektrische und magnetische Felder.

**Lichtwellen sind elektromagnetische Transversalwellen und als solche nur ein kleiner Teil eines Spektrums, das sich über viele Größenordnungen erstreckt.**

**Je kleiner die Wellenlänge (d.h. je höher die Frequenz) ist, desto energiereicher ist die elektromagnetische Strahlung. (Siehe Praktikum We 2)**

Wellenlänge in m	Bezeichnung
$10^5 - 10^4$	Niederfrequenz (Mikrophon)
$10^4 - 10^0$	LW, MW, KW, UKW
$10^0 - 10^{-3}$	Fernsehen, Richtfunk, Radar-Wellen
$10^{-3} - 10^{-4}$	Mikrowellen
$10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$	Infrarot-Strahlung (Wärmestrahlung)
<b><math>8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}</math></b>	<b>Licht: rot ... blau</b>
$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	Ultraviolett-Strahlung
$10^{-9}$	Röntgenstrahlung
$10^{-10} - \dots$	$\gamma$ -Strahlung

Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung.

## Zur Vertiefung

- 18 ? Können Sie die folgenden Fragen beantworten?
- Das Leseverfahren einer CD basiert auf der destruktiven Interferenz. Erklären Sie.
  - Warum sieht man in einer CD die Regenbogenfarben?
  - Welche Frequenzen haben blaues, gelbes, rotes Licht etwa?
  - Welche Farberscheinungen in der Natur kommen durch Interferenz zustande? Beispiele?
  - Warum bezeichnet man das Laserlicht als **monochromatisches Licht**.

## Additive und subtraktive Farbmischung

- 19 ⓘ Farbiges Licht mischen oder Malfarben mischen ist nicht dasselbe. Sie sollen die zwei Arten, Farben zu mischen unterscheiden und einige Regeln und Gesetzmässigkeiten des Farbkreises kennen lernen.

## Subtraktive Farbmischung

- 20 ⓘ Der Farbdruck und die Farbfotografie basieren auf den drei **Primärfarben Cyan (C), Magenta (M) und Yellow (Y)**. Alle Farben können mit diesen durch geeignete Mischung erzeugt werden. Die folgende Anleitung soll dazu dienen, einen einfachen **Farbkreis** herzustellen. Sie werden aus angefärbten Karten kleine Stücke schneiden und im 6-Farbkreis rechts aufkleben. (Anstelle der Wasserfarben, können Sie für die Farbkreisversuche auch **wasserlösliche Farbstifte** verwenden.)

- 21 👁 Beginnen Sie mit den **Primärfarben**: Feuchten Sie jeweils eine weisse Karte (Format A6) in der Mitte leicht an und geben Sie vier Tropfen der speziellen Wasserfarben auf diese angefeuchtete Stelle. Verteilen Sie die Farbe über die Karte, ohne die Farbe zu stark zu verdünnen. Beschriften Sie die Karte (z.B.: 100% Y).

- 22 **22 Reine Farben** sind aus höchstens zwei Primärfarben gemischt. Werden zwei Primärfarben zu gleichen Teilen gemischt, so erhält man eine **Sekundärfarbe**. Stellen Sie nun Karten her mit den drei möglichen Sekundärfarben, indem Sie je zwei Tropfen von zwei Primärfarben auf die befeuchtete Stelle geben und die Farbe über die Karte verteilen. Beschriften Sie auch diese Karten (z.B.: 50% C; 50% M).

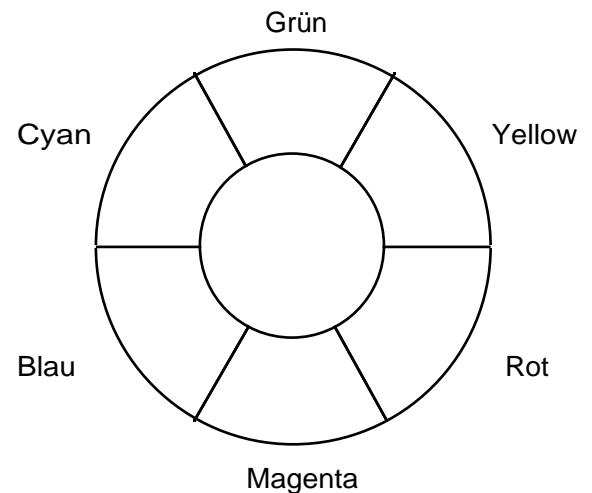
- 23 **23 Es gibt reine und unreine Tertiärfarben.** Reine Tertiärfarben entstehen durch Mischung von einer Primärfarbe mit einer benachbarten Sekundärfarbe. Stellen Sie eine Karte her mit einer reinen Tertiärfarbe.  
z.B.: Magenta, gemischt mit der Sekundärfarbe 50% M; 50% Y ergibt die Farbe 75% M; 25% Y

Wo sind die reinen Tertiärfarben im Farbkreis anzuordnen?

**Unreine Tertiärfarben** enthalten alle Primärfarben. Welche Farbe entsteht, wenn Sie alle Primärfarben zu gleichen Teilen mischen (je zwei Tropfen)? Das ergibt dann:

33% C; 33% M; 33% Y.

Sie erkennen hier, warum man in der Drucktechnik auch noch die "Farbe" Schwarz verwendet.



**Der 6-Farben-Kreis, bestehend aus den Primär- und den Sekundärfarben**

Eine Farbe kommt im Spektrum des weissen Lichtes nicht vor. Dieser Farbe kann auch keine Wellenlänge zugeordnet werden. Welche ist es? Wie kann diese Farbe dennoch erzeugt werden?

Vergleichen Sie Gothes Farbkreis (Einführung We) mit dem hier dargestellten.

- 24 ? Zwei Farben, die gemischt Grau ergeben heissen **Komplementärfarben**. Grau entsteht aber auch durch Mischung aller Primärfarben zu gleichen Teilen. Bestimmen Sie die Komplementärfarben-Paare der angemalten Karten.

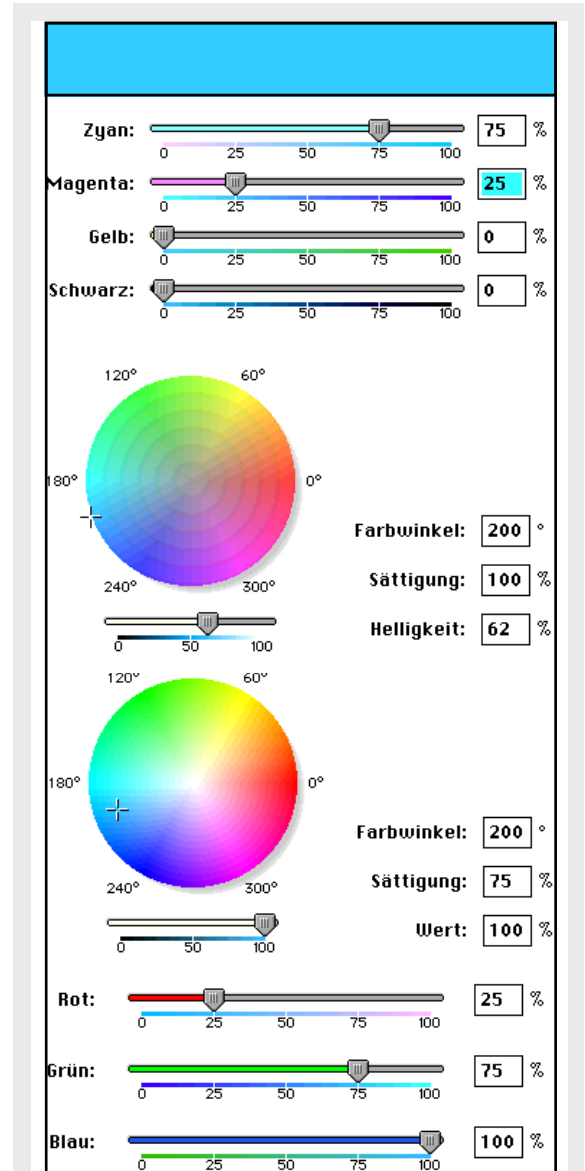
Wie liegen die Komplementärfarben zueinander auf dem Farbkreis?

### Additive Farbmischung

- 25 ⓘ Die Farben eines Fernsehschirmes basieren auf den drei **Primärfarben Blau, Rot und Gelb**.
- 26 26 Es steht eine Vorrichtung mit dem Hellraumprojektor zur Verfügung, mit welcher Sie die drei Primärfarben an eine weisse Wand projizieren können. Durch verdrehen von Spiegeln können Sie die Farben übereinander lagern. Erzeugen Sie so alle möglichen **Sekundärfarben**.
- 27 27 Welche Farbe entsteht, wenn **alle drei** Primärfarben überlagert werden?
- 28 28 Zwei Farben, die kombiniert Weiss ergeben, heissen **Komplementärfarben**. Erzeugen Sie mit der Versuchsvorrichtung Paare von Komplementärfarben.
- 29 29 Die Herstellung von **Tertiärfarben** ist hier etwas schwieriger. Dies gelingt, wenn die Intensität einer Grundfarbe etwas vermindert wird, mit einer feinen Gase zum Beispiel. (Wahrscheinlich fehlt die Zeit, um dazu Untersuchungen machen zu können.)

### Zur Vertiefung

- 30 ? Warum werden diese Mischungsarten **subtraktive** und **additive Farbmischung** genannt? Was wird jeweils subtrahiert, resp. addiert?
- 31 ⓘ Es stehen auf dem Computer kleine Simulationsprogramme zur Farbmischung zur Verfügung benützen Sie diese zur Repetition.



Das Farbmanagement auf einem Computer kann über verschiedene Systeme erfolgen: Im **System Cyan, Yellow, Magenta und Schwarz (CYMK)**, resp. dem **Farbkreis der subtraktiven Farbmischung**; oder mit dem **Farbkreis der additiven Farbmischung**, resp. **im RGB-System** (von oben nach unten). Man erkennt, wie die Farbe im Balken ganz oben in den verschiedenen Systemen dargestellt wird. Vergleicht man einen farbigen Ausdrucks obiger Darstellung mit der Bildschirmdarstellung, so fallen starke Abweichungen auf. Die Farben auf dem Bildschirm (additive Farbmischung) lassen sich nicht ohne weiteres richtig auf einen Drucker (subtraktive Farbmischung) übertragen. Zudem verlieren die Farben an Brillanz.