

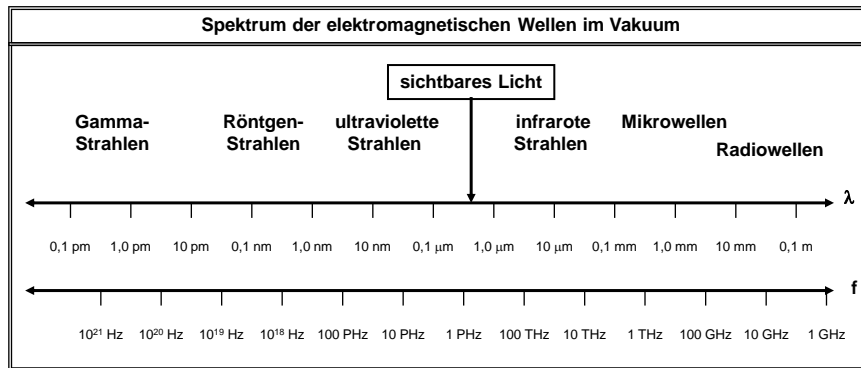
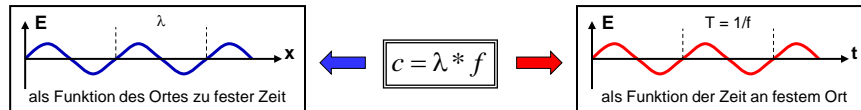
Technische Optik 04

1 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Elektromagnetische Wellen entstehen durch Schwingung der elektrischen Feldstärke E als Folge der beschleunigten Bewegung von elektrischen Ladungen. Weil im Vakuum die Ausbreitungsgeschwindigkeit c für alle diese Wellen gleich groß ist, haben wir einen einfachen Zusammenhang zwischen Frequenz f und Wellenlänge λ :



Technische Optik 04

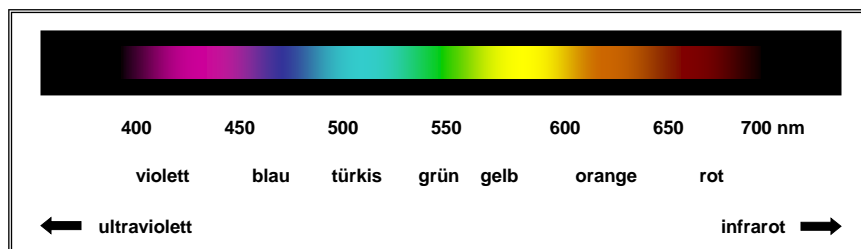
2 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

In der Technischen Optik befassen wir uns mit Licht; darunter versteht man im allgemeinen sichtbares Licht mit Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm (gemessen in Vakuum).

Dieses Bild gibt einen ungefähren Eindruck der Farbe, die Licht von dieser Wellenlänge besitzt:



Die Anzeige auf einem Computerbildschirm hat Grundfarben (rot, grün, blau), die bereits aus verschiedenen Wellenlängen zusammengesetzt sind; daher passen die angezeigten Farben nur ungefähr zu den angegebenen Wellenlängen. Die richtigen Farben sieht man mit einem Spektroskop, wenn das Licht einer kontinuierlich strahlenden Quelle (z. B. Glühlampe) zerlegt wird.

Dieser recht schmale Wellenlängenbereich lässt uns noch die schönsten Bilder erkennen!

Technische Optik 04

3 von 29

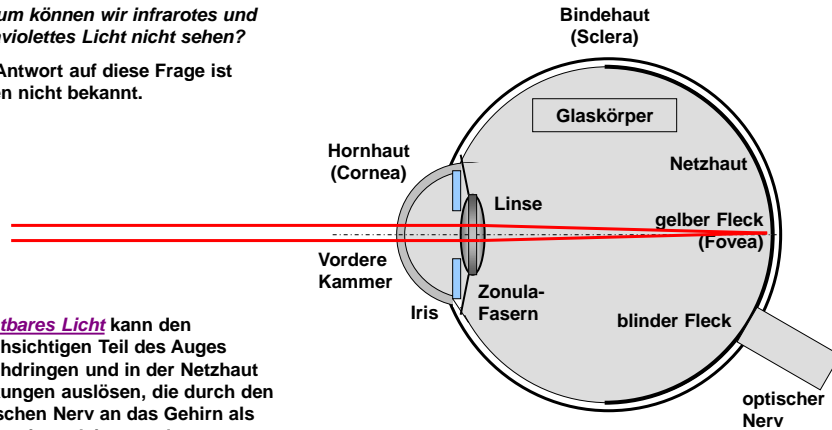
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Warum können wir infrarotes und ultraviolettes Licht nicht sehen?

Die Antwort auf diese Frage ist vielen nicht bekannt.

Sichtbares Licht kann den durchsichtigen Teil des Auges durchdringen und in der Netzhaut Wirkungen auslösen, die durch den optischen Nerv an das Gehirn als Reiz weitergeleitet werden.



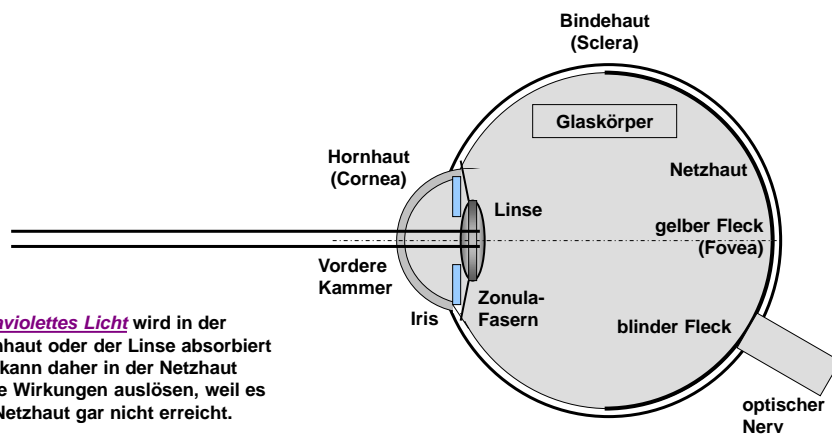
Technische Optik 04

4 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Ultraviolettes Licht wird in der Hornhaut oder der Linse absorbiert und kann daher in der Netzhaut keine Wirkungen auslösen, weil es die Netzhaut gar nicht erreicht.

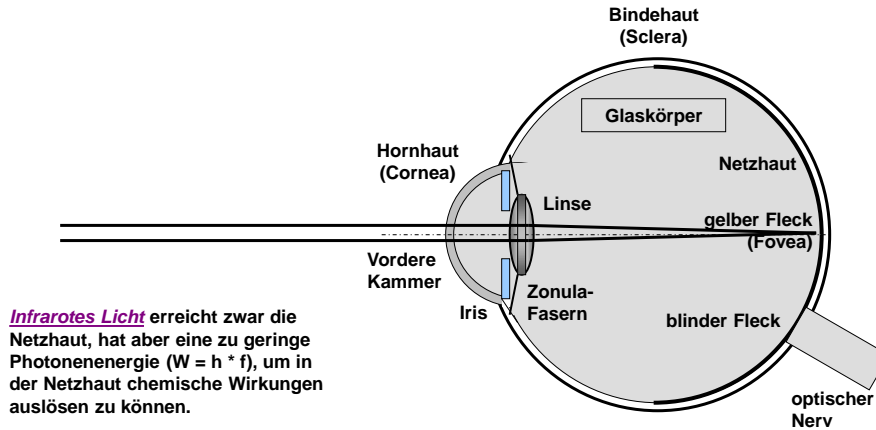


Technische Optik 04

5 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	



Infrarotes Licht erreicht zwar die Netzhaut, hat aber eine zu geringe Photonenenergie ($W = h \cdot f$), um in der Netzhaut chemische Wirkungen auslösen zu können.

Lichtquellen, die infrarotes Licht aussenden, sind daher besonders gefährlich: Sie können die Netzhaut schädigen, ohne dass wir vorher eine Ahnung davon haben konnten.

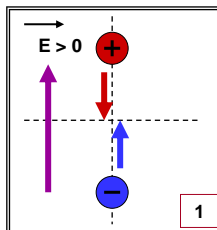
Technische Optik 04

6 von 29

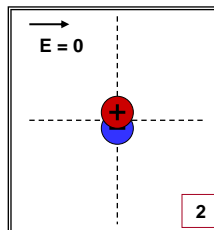
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

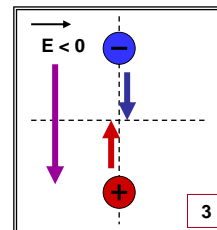
Licht ist eine elektromagnetische Welle; es entsteht bei linearen Schwingungen einer positiven (+) und einer negativen (-) Ladung.



1.) Auf die beiden Ladungen wirkt eine anziehende Kraft. Es ist ein elektrisches Feld als Kraft-Vermittler vorhanden. Dies ist ein Zustand mit potentieller Energie.



2.) Die Ladungen folgen der Kraft. Dabei fließt ein Strom. Um die Richtung des fließenden Stroms entsteht ein Magnetfeld. Das elektrische Feld wird kleiner und zeigt einen Nulldurchgang, wenn das Magnetfeld seinen Maximalwert hat.



3.) Die Ladungen haben den Ort gewechselt. Das elektrische Feld hat ein umgekehrtes Vorzeichen ($E < 0$), und der E-Vektor zeigt nach unten; das Magnetfeld klingt ab.

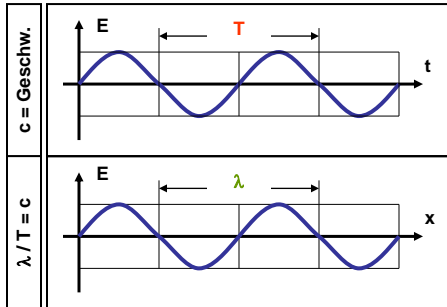
Technische Optik 04

7 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Manchmal sind benachbarte schwingungsfähiger Systeme miteinander gekoppelt. Dann kann die Schwingungsenergie übertragen werden, und die Energie breitet sich in einer Richtung aus: Es entsteht eine Welle.



Für eine Lichtwelle gilt:

1.) Der Wert der elektrischen Feldstärke E variiert sinusförmig als Funktion der Zeit an fest gehaltenem Ort.

2.) Der Wert der elektrischen Feldstärke E variiert sinusförmig als Funktion des Ortes zu einem festen Zeitpunkt.

$$E(x, t) = E_0 * \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda} + \Delta\varphi\right)$$

Für Wellen sind Schwingungsdauer T und Wellenlänge λ bestimmbar. Die Wellenlängen von Licht sind immer für Vakuum angegeben; in Glas sind sie kleiner. Schwingungsdauer T und Frequenz f = 1/T bleiben auch in Glas erhalten.

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c gilt die von Wellen her bekannte Gleichung.

Technische Optik 04

8 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

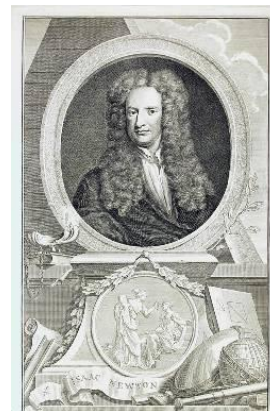
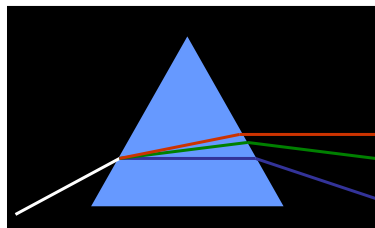
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beim Durchgang durch die Grenzfläche zwischen zwei optisch transparenten Medien wird ein Lichtstrahl gebrochen, d. h. er ändert seine Ausbreitungsrichtung. Es gilt das Brechungsgesetz (Einfallswinkel ε, Brechungswinkel ε', Brechungsindizes n und n'):

$$n * \sin(\varepsilon) = n' * \sin(\varepsilon')$$

Der Brechungsindex hat für verschiedene Wellenlängen unterschiedliche Werte: $n = n(\lambda)$; das nennen wir Dispersion. Deshalb wird beim Durchgang durch ein Prisma weißes Licht in seine spektralen Farbanteile zerlegt; das hat schon Isaac Newton (1643 - 1727) beschrieben ("Opticks", 1704).

Dies ist eine historisch sehr wichtige Methode zur Zerlegung von zusammengesetztem Licht in seine einzelnen Wellenlängen. Heute verwendet man öfter Beugungsgitter.



Isaac Newton,
1643 - 1727

Technische Optik 04

9 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	



Zur Art und Weise der Abhängigkeit hat Ernst Abbe (1840 – 1905) eine empirische Regel (die **Abbesche Dispersionsregel**) aufgestellt:

$$\frac{dn(\lambda)}{d\lambda} < 0$$

In Worten: **Mit zunehmender Wellenlänge λ nimmt der Wert der Brechzahl n ab.**

Ernst Abbe war Teilhaber an der Firma Zeiss. Nach dem Tod von Carl Zeiss zahlte Abbe die Erben aus und wurde dadurch zum Besitzer der Firma. Dann führte er den 8-Stunden-Tag ein, die 5-Tage-Woche und Lohnfortzahlung im Krankheitsfall. Anschließend übergab er den Firmenbesitz der Zeiss-Stiftung.

Der von anderen Unternehmern prophezeite Verfall der Firma trat durch diese soziale Verhaltensweise nicht ein. Damit Mitarbeiter gute Arbeit leisten können, sollten sie sich auch wohl fühlen können.

Technische Optik 04

10 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

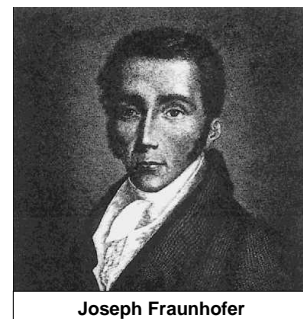
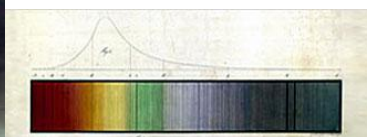
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Im Jahr 1804 führte William H. Wollaston (1766 - 1828) eine genauere Analyse des Lichts der Sonne mit einem Prisma durch. Er entdeckte dunkle Linien, erforschte aber nicht ihre Positionen oder Herkunft.

Auch Joseph Fraunhofer (1787 - 1826) führte wissenschaftliche Untersuchungen zur Zerlegung des Lichts mit Prismen durch. Das führte zur Wiederentdeckung der heute nach ihm benannten **Fraunhofer-Linien**. Er benannte die wichtigsten mit den Großbuchstaben (A, B, C, D, ...) und nutzte ihre Position als Fixpunkte im Spektrum, an denen die Brechzahlen von Gläsern reproduzierbar bestimmt werden können.



Dies wird auch heute noch für optische Gläser so durchgeführt.



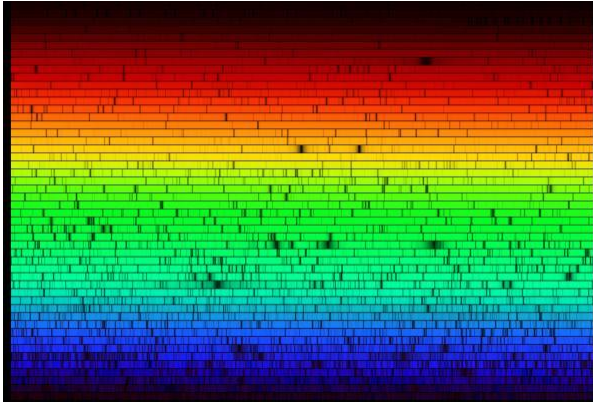
Technische Optik 04

11 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die dunklen Linien im Spektrum der Sonne repräsentieren Wellenlängen, an denen durch Absorption Leistung aus dem kontinuierlichen Spektrum entfernt wurde. Diese Linien nennt man Fraunhofer-Linien. Sie werden durch ca. 60 Elemente verursacht, die auf der Sonne vorkommen und deren Anwesenheit so nachgewiesen wurde. Für einige der Linien ist bis heute die Ursache unklar!



Elemente (%):

Wasserstoff	92,0
Helium	7,8
Kohlenstoff	0,02
Stickstoff	0,008
Sauerstoff	0,06
Neon	0,01
Magnesium	0,003
Silizium	0,004
Schwefel	0,002
Eisen	0,003
...	

Quelle: "Astronomy Picture of the Day" 27th June 2010., aufgenommen am McMath-Pierce Solar Observatory, Kitt Peak, Arizona. Von unten nach oben sind 50 Teilspektren gezeigt; sie haben eine Breite von jeweils 6 nm und überstreichen den Bereich von 400 bis 700 nm.

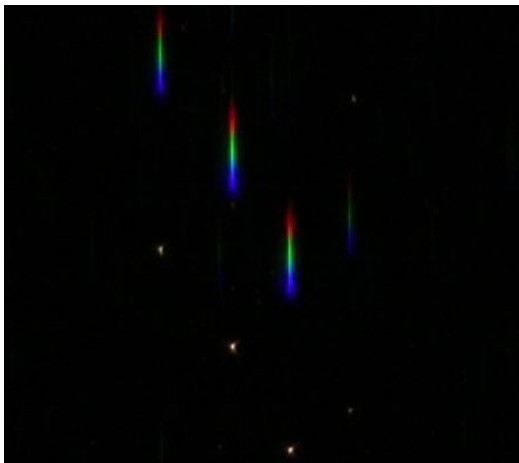
Technische Optik 04

12 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Weil das Spektrum einer Lichtquelle Informationen über die Vorgänge enthält, die bei der Lichterzeugung ablaufen, wurde am 29. 9. 2008 beim Verflühen der unbemannten Raumsonde „Jules Verne“ das Spektrum von zwei Flugzeugen aus über dem Südpazifik detektiert. Das Bild zeigt die drei Gürtelsterne des Sternbilds Orion mit ihren Spektren.



Die Daten wurden mit elektronischen Kameras aufgenommen, die gleichzeitig ein Bild und versetzt dazu in einer Linie ein Spektrum auf demselben Chip produzieren.

Ein ähnliches System hat die Firma Zeutec in Rendsburg für analytische Aufgaben entwickelt („Spectralzyzer“).

<http://atv.seti.org/images/atv%209-28%207.jpg>

Technische Optik 04

13 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

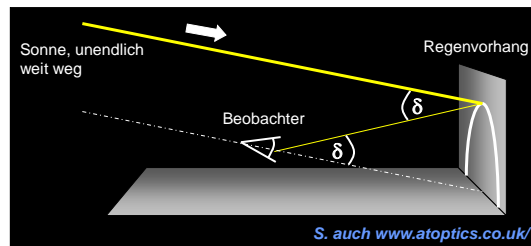
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Es wird oft behauptet, die Farben des Regenbogens seien „einfarbig“. Das ist falsch!



Zunächst unterscheiden wir den primären und den sekundären Regenbogen. Beide haben eine verschiedene Abfolge der Farben. Zwischen ihnen gibt es eine Lücke, genannt das „Dunkle Band des Alexander von Aphrodisias“ (ca. 200 n. Chr.). Die Aufnahme stammt vom Dettifoss in Island (nach dem Produkt von Wassermenge und Fallhöhe einer der größten Wasserfälle in Europa).

Der Regenbogen entsteht auf einem Vorhang aus Regentropfen als Kurve um die Verbindungslinie zwischen Sonne und Kopf für die Strahlen, die um denselben Winkel δ abgelenkt wurden. Je größer der Ablenkwinkel δ , desto größer der scheinbare Radius des Kreises für den Bogen.



Technische Optik 04

14 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Dietrich von Freiberg (ca. 1240 - ca. 1318), ein deutscher Dominikaner-Mönch, soll die erste richtige Erklärung für den primären und den sekundären Regenbogen gegeben haben. Der Titel seines Buches lautet: „*De iride et radialibus impressionibus*“).

Das alte Bild lässt (besonders bei dem zweiten Beobachter von rechts) die große Bewunderung ahnen, mit der man vor vielen Jahrhunderten diese Erscheinung am Himmel betrachtete.



Bild aus einer Abhandlung über den Regenbogen der VHS Basel (Heiri Schenkel);
www.educare.ch/educare_doks/VHS_jan30_08.pdf

Technische Optik 04

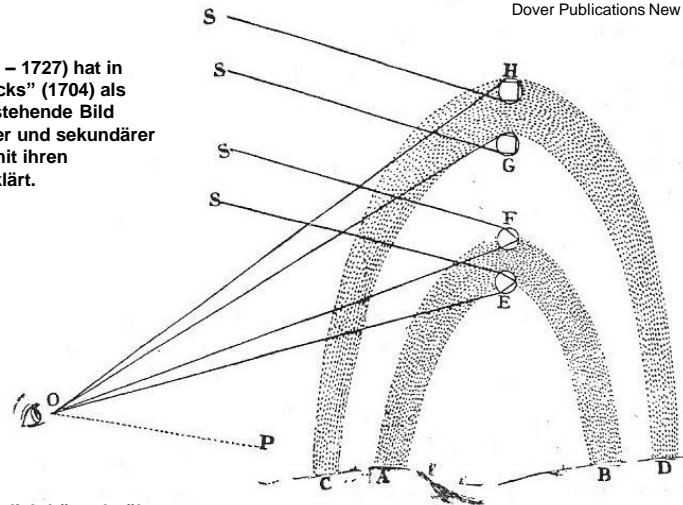
15 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bild aus "Opticks" von Isaac Newton,
Dover Publications New York

Isaac Newton (1643 – 1727) hat in seinem Buch "Opticks" (1704) als Abb. 15 das nebenstehende Bild gezeichnet. Primärer und sekundärer Regenbogen sind mit ihren Strahlengängen erklärt.



Newton wäre vermutlich böse darüber, wenn jemand käme und seine Strahlengänge anzweifelte.

FIG. 15.

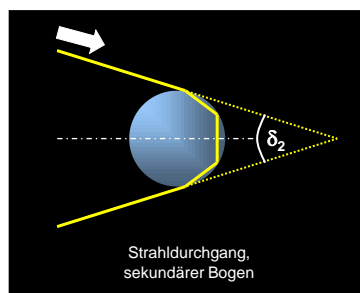
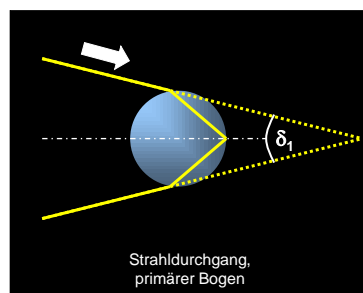
Technische Optik 04

16 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Für die Ablenkung unter dem Winkel δ_1 finden beim primären Regenbogen in den kugelförmigen Wassertropfen zwei Brechungen und eine teilweise Reflexion statt. Für den sekundären Regenbogen (δ_2) sind zwei teilweise Reflexionen im Tropfen verantwortlich. Er ist ungefähr zehnfach schwächer als der primäre Bogen, denn die „teilweisen“ Reflexionen haben einen Reflexionsgrad R von nur ungefähr 0,1.



Technische Optik 04

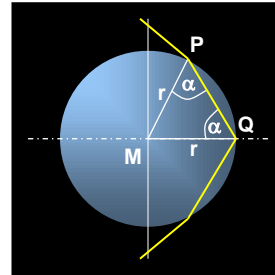
17 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wir betrachten einen Strahl, der an einem Punkt P in den Tropfen eintritt, bei Q in der Wasserkugel (Mittelpunkt M) reflektiert wird und **symmetrischen Strahldurchgang** haben soll, d. h. die Fortsetzung nach Reflexion bei Q ergibt sich durch Spiegelung an der strich-punktierten Linie durch den Kugelmittelpunkt.

Das Dreieck MQP ist gleichschenkelig; daher sind die Winkel bei P und Q gleich groß (α). Der Winkel α bei P ist aber gleich dem Brechungswinkel ϵ_1' , weil in einer Kugel die Gerade vom Mittelpunkt zum Punkt P das Einfallslot für die hier erfolgende Brechung ist.



Technische Optik 04

18 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Gezeichnet wurde soeben ein **symmetrischer Strahldurchgang**. Alle symmetrischen Strahldurchgänge liegen in Ebenen, die den Mittelpunkt des Tropfens enthalten. Für diese Strahldurchgänge gibt es ein Extremum des Ablenkungswinkels.

Das Auftreten extremer Ablenkungswinkel haben wir schon einmal im Zusammenhang mit dem Strahldurchgang durch ein Prisma kennengelernt: Im Prisma mit zwei brechenden Ebenen ist der Ablenkungswinkel für den symmetrischen Strahldurchgang minimal.

Wie hängt der Ablenkungswinkel δ_1 von dem Einfallswinkel an der ersten Oberfläche ϵ_1 und von dem Brechungswinkel ϵ_1' ab?

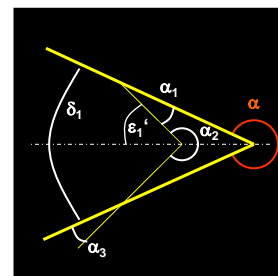
Lassen wir den Wassertropfen weg und konzentrieren wir uns auf die Strahlablenkungen.

Es gilt: $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$

Für die einzelnen Winkel bekommen wir:

$$\alpha_1 = \epsilon_1 - \epsilon_1' = \alpha_3 \quad \alpha_2 = 360^\circ - 2 * \epsilon_1'$$

Für δ_1 ergibt sich daher: $\delta_1 = 360^\circ - \alpha = 2 * \epsilon_1' - 2 * (\epsilon_1 - \epsilon_1') = \underline{\underline{4 * \epsilon_1' - 2 * \epsilon_1}}$



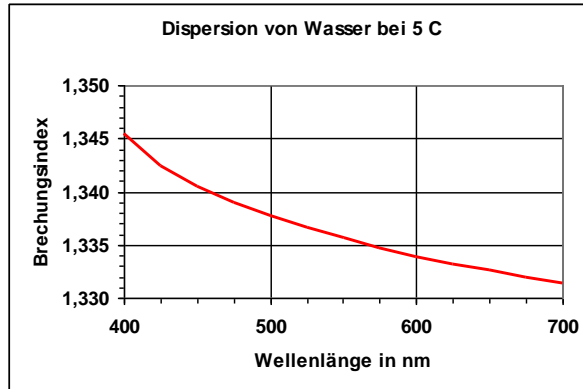
Technische Optik 04

19 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Um für einen Einfallswinkel ε_1 den Brechungswinkel ε_1' zu berechnen, müssen wir das Snelliussche Brechungsgesetz anwenden. Dafür brauchen wir den Brechungsindex n für Wasser als Funktion der Wellenlänge (hier für $\theta = 5^\circ\text{C}$).



λ	n
400	1,34551
425	1,34235
450	1,34055
475	1,33903
500	1,33772
525	1,33659
550	1,33560
575	1,33472
600	1,33393
625	1,33322
650	1,33257
675	1,33197
700	1,33141

Literaturquelle: "International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)", hier zitiert aus dem Internet: www.philiplaven.com

Technische Optik 04

20 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wir lassen einen Strahl mit dem Einfallswinkel ε_1 einfallen und berechnen mit einer Tabellenkalkulation (MSExcel) den Ablenkwinkel

$$\delta_1 = 4 \cdot \varepsilon_1' - 2 \cdot \varepsilon_1$$

als Funktion dieses Einfallswinkels.

Für $n = 1,33560$ ($\lambda = 550 \text{ nm}$; welche Farbe ist das?) bekommen wir die Daten in der folgenden Tabelle.

Die Ablenkwinkel zeigen ein Maximum für $\varepsilon_1 = 60^\circ$ mit $\delta_1 = 41,69^\circ$.

Für andere Wellenlängen (d. h. andere Werte für den Brechungsindex n) tritt dieses Maximum bei anderen Einfallswinkeln auf und führt zu anderen Werten für das Maximum des Ablenk winkels.

ε_1	ε_1'	δ
40	28,77	35,07
42	30,07	36,26
44	31,34	37,36
46	32,59	38,35
48	33,81	39,23
50	35,00	39,99
52	36,16	40,63
54	37,28	41,13
56	38,37	41,48
58	39,42	41,67
60	40,42	41,69
62	41,38	41,53
64	42,30	41,18
66	43,16	40,63
68	43,96	39,86
70	44,71	38,86
72	45,40	37,62
74	46,03	36,13
76	46,59	34,37
78	47,09	32,34
80	47,51	30,03

Technische Optik 04

21 von 29

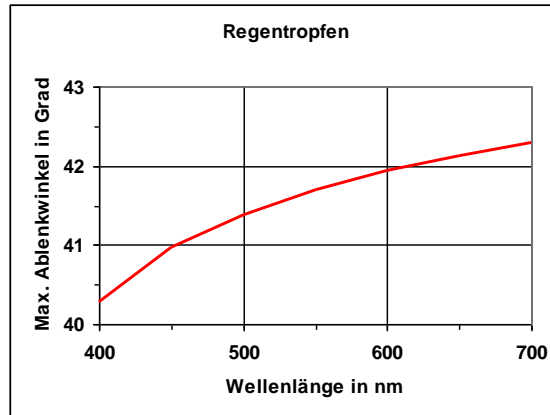
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Der maximal auftretende Ablenkungswinkel wird mit den bekannten Brechungsindizes als Funktion der Wellenlänge berechnet und grafisch aufgetragen.

Wir erkennen, dass außerhalb eines Winkels von $40,5^\circ$ die Lichtstrahlen nicht mehr die Wellenlänge 400 nm (= violett) enthalten können. Wenn weißem Licht die violetten Anteile entnommen werden, entsteht die **Komplementärfarbe**, und das ist gelb.

Außerhalb 42° treten nur noch Wellenlängen von mehr als 600 nm auf. Die sind rot, und nur diese sind „einfarbig“, d. h. nicht aus Wellenlängen zusammengesetzt, die wir als andere Farbe empfinden.



Technische Optik 04

22 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

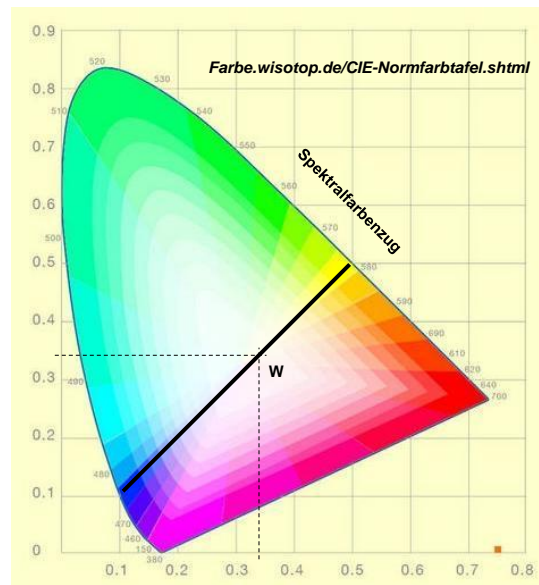
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wie erfährt man die Komplementärfarbe zu einer monochromatischen Lichtwelle?

Alle sichtbaren Farbtöne sind in der **Normfarbtafel** zu erkennen. Sie sind in einem zweidimensionalen Bereich von der Form einer Schuhsohle angeordnet.

Den Rand bildet der Spektralfarbenzug. Dort liegen die „reinen“ Farben, die aus einer einzigen Wellenlänge bestehen. Wenn sich alle Wellenlängen in ihrer Wirkung überlagern, entsteht weiß (W). Wird aus dem Weiß eine bestimmte Wellenlänge entfernt, entsteht als Komplementärfarbe der Farbton der durch den Weißpunkt W erreichten, gegenüberliegenden Seite.

So ist ein bestimmter Farbton von **gelb** die Komplementärfarbe eines Farbtons von **blau**.



Technische Optik 04

23 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	



Foto: G. Sowada

Die gelbe Farbe am inneren Rand des primären Regenbogens ist also kein einfarbiges Licht aus einer Wellenlänge, sondern aus allen Wellenlängen mit $\lambda > 425 \text{ nm}$ zusammengesetzt; sie ist die Komplementärfarbe zu dem, was unter diesem Winkel fehlt (blau).

Das darf man nicht einfarbig = monochromatisch nennen, denn monochromatisches Licht besteht aus nur einer Wellenlänge.

Das Bild zeigt deutlich, dass bei Ablenkswinkeln kleiner als 40° noch alle Wellenlängen vorhanden sein können, d. h. dort finden wir weißes Streulicht vor.

Nun kümmern wir uns um den sekundären Regenbogen.

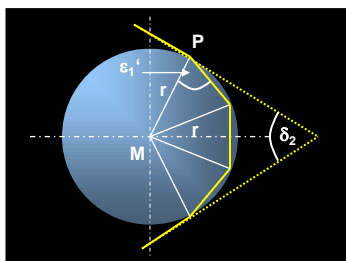
Technische Optik 04

24 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Auch beim Strahldurchgang für den sekundären Regenbogen gibt es gleichschenklige Dreiecke. Der Ablenkswinkel δ_2 beträgt hier:



$$\delta_2 = 360^\circ - (2 * (\epsilon_1 - \epsilon_1') + 2 * (180^\circ - 2 * \epsilon_1'))$$

Das lässt sich noch vereinfachen:

$$\delta_2 = 180^\circ - 6 * \epsilon_1' + 2 * \epsilon_1$$

Die Tabelle zeigt den berechneten Ablenkswinkel δ_2 als Funktion des Einfallswinkels ϵ_1 für $\lambda = 700 \text{ nm}$.

ϵ_1	δ
60	56,54
62	54,75
64	53,24
66	52,04
68	51,17
70	50,64
72	50,47
74	50,69
76	51,30
78	52,32
80	53,78

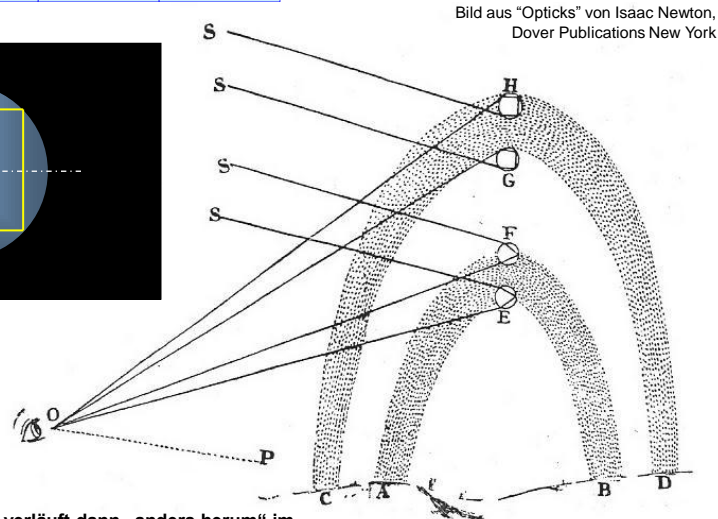
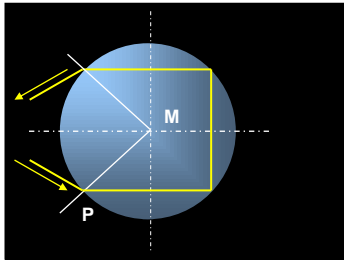
Man erkennt, dass es für den sekundären Regenbogen ein Minimum des Ablenkswinkels δ_2 gibt; für die Wellenlänge von 700 nm hat Wasser die Brechzahl $n = 1,33141$. Daraus folgt für ϵ_1' ein Wert von ca. 45° . Daraus folgt, dass die Ablenkung nach Reflexion im Tropfen 90° beträgt.

Technische Optik 04

25 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bild aus "Opticks" von Isaac Newton,
Dover Publications New York

Der Strahldurchgang verläuft dann „anders herum“ im Tropfen. Genauso hat es Newton in seinem Bild für den sekundären Bogen gezeichnet! Respekt, Herr Kollege!!!

FIG. 15.

Technische Optik 04

26 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

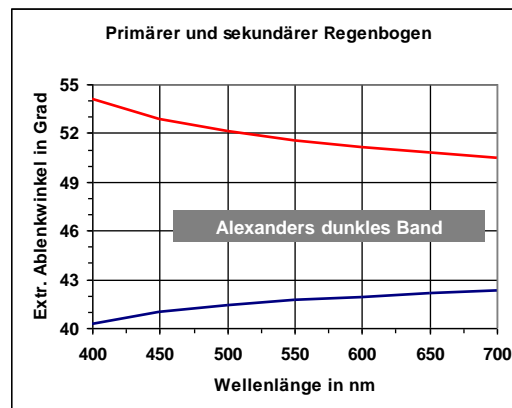
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Fassen wir zusammen:

Die Ablenkung für den **primären Regenbogen** hat für jede Wellenlänge einen anderen maximalen Ablenkwinkel.

Die Ablenkung für den **sekundären Regenbogen** hat für jede Wellenlänge einen anderen minimalen Ablenkwinkel. Alle diese Ablenkwinkel sind größer als für den primären Regenbogen.

Zwischen beiden ist eine Lücke, aus der selbst bei dort vorhandenen Regentropfen kein Lichtstrahl zum Beobachter kommen kann.



Damit sind die oberflächlichen Erscheinungen am Regenbogen erklärt. Die auftretenden Farben sind aus vielen Wellenlängen zusammengesetzt, also kein einfarbiges Licht. Das ist der entscheidende Unterschied zu den Farben, wenn mit einem Prisma Licht zerlegt wird.

Technische Optik 04

27 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	



Technische Optik 04

28 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wenn Sie nun glauben, Sie wüssten alles über Regenbogen, dann machen Sie sich auf Überraschungen gefasst. Zum weiteren Studium sei empfohlen: www.atoptics.co.uk



Technische Optik 04

29 von 29

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel



1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Auf einer sehr empfehlenswerten Website sind täglich neue Bilder mit Himmelserscheinungen zu sehen. Am 07.05.2010 konnte man einen bei Abendrot aufgenommenen Regenbogen sehen, der keinen Ring, sondern eine Scheibe in nur noch einer einzigen Farbe zeigte: www.spaceweather.com

