

Kurzfragensammlung Experimentalphysik 3

Thomas Maier, Carsten Rohr

Stand: 19. Oktober 2023

(Falls Fehler auffallen, bitte Mail an uebung-exphys@nat.tum.de)

Inhaltsverzeichnis

I	Elektromagnetische Wellen	8
1	Lichtwellen	8
1.1	Maxwellgleichungen	8
1.2	Definitionen	8
1.3	Eigenschaften des Vakuums	8
1.4	Vakuumlichtgeschwindigkeit	9
1.5	Allgemeine Form Wellengleichung	9
1.6	Dreidimensionale Wellen	9
1.7	Fotografie	9
1.8	Auge (ähnlich zu 1.7)	9
1.9	Poynting-Vektor 2	10
1.10	Poynting-Vektor	10
1.11	Wellenfront	10
1.12	Huygensches Prinzip	10
1.13	Huygensches Prinzip 2	10
1.14	Dipolschwingung	10
1.15	Energieerhaltung Welle in Medium	11
1.16	Atmosphäre auf Venus	11
1.17	Kohärente Streuung	11
1.18	Planeten mit Atmosphäre	11
1.19	Sonnenuntergangshimmel	11
1.20	Blauer Himmel	12
1.21	Wahrscheinlichkeit Rayleigh-Streuung	12
1.22	Himmelsgrau	12
1.23	Farbe von Gegenständen	12
1.24	Gruppengeschwindigkeit vs. Phasengeschwindigkeit	13
1.25	Longitudinal- vs. Transversalwellen	13
1.26	Phasengeschwindigkeit größer als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum?	13
1.27	Gruppengeschwindigkeit	13
1.28	Naturphänomene Strahlungsdruck	13
1.29	Messung der Entfernung zum Mond	14

1.30	Experimenteller Nachweis nichtruhender Äther	14
2	Fouriertransformation	14
2.1	Fundamentale Aussage Fourieranalysis	14
2.2	Beschreibung Wellenpaket	14
3	Dispersion	14
3.1	Definition Dispersion (ähnlich zu 3.9)	14
3.2	Mikroskopische Ursache für Dispersion von Licht in Materie	15
3.3	Arten von Dispersion (ähnlich zu 3.9)	15
3.4	Metalle undurchsichtig	15
3.5	Metalle Reflexion sichtbares Licht	15
3.6	Wellenpaket in dispersiven Medien	15
3.7	Isotrope vs. anisotrope Medien	15
3.8	Dielektrizitätstensor optisch isotrope Medien	16
3.9	Normale und anomale Dispersion	16
3.10	Dispersionslose vs. dispersionsbehaftete Wellen	16
3.11	Komplexer Brechungsindex bei anomaler Dispersion	16
3.12	Zeitliches Verhalten Einhüllende Wellenpaket	17
3.13	Plasmafrequenz	17
3.14	Dispersierende Medien	17
II	Elektromagnetische Wellen an Grenzflächen	18
4	Brechung	18
4.1	Sonnenuntergang	18
4.2	Phasensprung	18
4.3	Totalreflexion	18
4.4	Definition evaneszente Welle	18
4.5	Realteil und Imaginärteil im Brechungsindex	19
4.6	Phasensprung 2	19
4.7	Glasfaserkabel	19
4.8	Frequenzabhängiger Brechungsindex	19
4.9	Sehen unter Wasser	19
4.10	Rein imaginärer Brechungsindex	20
4.11	Fata Morgana	20
4.12	Farbreihenfolge Regenbogen	20
4.13	Rotes Licht aus Luft in Wasser	20
4.14	Negative Brechungsindizes	20
4.15	Frequenz und Brechung	21
4.16	Brechungsindex Resonanzen IR und UV Bereich	21
4.17	Brechungsindex verdünnte Medien	21
4.18	Brechungsindex Metamaterialien	21
4.19	Brechungsindex Antireflexionsschicht	22
5	Fresnelsche Formeln	22
5.1	Flurboden als Spiegel	22
5.2	Eigenschaften von Wellen beim Übergang zwischen Medien	22
5.3	Strahlungsdruck	22

5.4	Farbe von Bäumen	22
5.5	Lampe unter Wasser	23
III Polarisation und Doppelbrechung		24
6	Polarisation	24
6.1	Optische Aktivität	24
6.2	3D-Kino	24
6.3	Orientierungspolarisation sichtbares Licht	24
6.4	Elektronenpolarisation sichtbares Licht	24
6.5	Polarisation durch Reflexion	25
6.6	Licht polarisieren	25
6.7	Absorption vom E-Feld Metallgitter	25
6.8	Dichroismus	25
6.9	Arten der Polarisation	25
6.10	Reflektierter und transmittierter Strahl	26
6.11	Brechungsindex-Ellipse	26
6.12	Uniaxialer Kristall	26
6.13	Uniaxiales Medium	26
6.14	$\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Plättchen	27
6.15	Natur des Lichts	27
6.16	Experiment zur Demonstration optischer Aktivität	27
6.17	Polarisationsfilter	27
6.18	Messung von polarisiertem Licht	27
6.19	Zirkular polarisiertes Licht	27
6.20	Linear polarisiertes Licht (ähnlich zu 6.6)	28
6.21	Vektoren in isotropen und anisotropen Medien	28
6.22	Brewster-Winkel Glasscheibe	28
6.23	Sonnenlicht ist...	28
6.24	Möglichkeiten zur Drehung der Polarisationsebene	28
6.25	3D-Brille 2	29
6.26	3D-Brille	29
6.27	Funktionsweise 3D-Brille für 3D-Film (ähnlich zu 6.25)	29
6.28	Definition polarisiertes Licht	29
6.29	Polarisationsarten (Richtungen)	30
6.30	Polarisation durch Reflexion	30
6.31	Funktionsweise und Wirkung $\lambda/4$ - und $\lambda/2$ -Plättchen	30
6.32	Polarisation des Lichts des Himmels	30
6.33	Optische Aktivität 2	31
6.34	Gase, Flüssigkeiten und kubische Kristalle als optische Medien	31
6.35	Superposition rechts- und linkszirkular polarisierte Welle	31
6.36	Änderung Drehsinn zirkular-polarisierte Welle	31
6.37	Energiestromdichten linear und zirkular polarisiertes Licht	31
7	Doppelbrechung	32
7.1	Außerordentlicher und ordentlicher Strahl	32
7.2	Außerordentlicher und ordentlicher Strahl 2	32
7.3	Außerordentlicher und ordentlicher Strahl 3	32

7.4	Doppelbrechung Kristall	32
7.5	Sichtbarmachen von Spannungen	32
7.6	Experimenteller Hinweis auf Doppelbrechung	33
7.7	Doppelbrechung induzieren	33
IV	Geometrische Optik	34
8	Geometrische Optik Allgemein	34
8.1	Grundannahmen der geometrischen Optik	34
8.2	Lichtbündelnäherung	34
8.3	Eigenschaften Lichtbündel	34
8.4	Entspanntes Sehen	34
8.5	Sichtbarmachen virtueller Bilder	35
8.6	Reales und virtuelles Bild in Sammellinse	35
8.7	Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit	35
8.8	Brechungsindex Linse	35
8.9	Fermatsches Prinzip	35
8.10	Linsenfehler	36
8.11	Reduzierung sphärische Aberration	36
8.12	Sphärische Aberration	36
8.13	Chromatische Aberration	36
8.14	Chromatische Aberration Spiegel	37
8.15	Linsenfehler und deren Korrektur	37
8.16	Definition und Entstehung sphärische Aberration (ähnlich zu 8.12)	37
8.17	Astigmatismus in Augenmedizin	37
8.18	Weitsichtigkeit Bewegung Auge	38
8.19	Problem Weitsichtigkeit	38
8.20	Linse bei Kurzsichtigkeit	38
8.21	Dünne Linsen	38
8.22	Aperturblende	38
8.23	Tiefenschärfe	38
8.24	Virtuelles Bild Sammellinse	39
8.25	Fermatsches Prinzip 2	39
8.26	Vernachlässigung in der geometrischen Optik	39
8.27	Verzerrtes Bild Blende	39
8.28	Definition virtuelle Abbildung	39
8.29	Definition reelle Abbildung	39
8.30	Schwinkel	40
8.31	Kontinuierliche Vergrößerung der Gegenstandsweite Sammellinse	40
8.32	Unschärfe Abbildung durch Linse	40
8.33	Brennpunkt, Brennweite und Brennebene	40
8.34	Lateralvergrößerung	41
8.35	Abbildung durch Sammellinse	41
8.36	Pointillistische Gemälde	41
8.37	Parabolspiegel vs. Kugelspiegel	41
8.38	Bild mit Blende	41
8.39	Fermatsches Prinzip 3 (ähnlich zu 8.9)	42
8.40	Reelle Abbildung mit konkaver Linse	42

8.41	Definition optischer Weg	42
8.42	Paralleles Strahlenbündel aus Punktlichtquelle	42
8.43	Punkt mit Schweif	42
8.44	Linsenabbildung	43
8.45	Linsensystem	43
8.46	Position Gegenstand Linse	43
8.47	Superpositionsgesetz Lichtstrahlen	43
8.48	Definition Gegenstandsweite und Bildweite	43
8.49	Spiegelhöhe	43
9	Prismen	44
9.1	Strahlengang monochromatisches Licht	44
9.2	Weißes Licht fällt auf Prisma	44
10	Matrixmethode	44
10.1	Translation	44
10.2	Linsenmatrix	44
11	Optische Instrumente	45
11.1	Lupe	45
11.2	Mikroskop	45
11.3	Vorteil von Spiegeln gegenüber Linsen	45
11.4	Begrenzung Auflösung Mikroskop	45
V	Welleneigenschaften des Lichts	46
12	Beugung	46
12.1	Rayleigh-Kriterium	46
12.2	Komplementäre Beugungsöffnungen	46
12.3	Fresnel-Beugung und Fraunhofer-Beugung	46
12.4	Intensitätsverteilung Beugung am Spalt	46
12.5	Zusammenhang Blende und Beugungsmuster im Fernfeld	47
12.6	Beugungsphänomene aus dem Alltag	47
12.7	Beugungsmuster verringerte Spaltbreite	47
12.8	Beugungsbilder bei Nah- und Fernfeldnäherung	47
12.9	Fourier-Transformierte Spaltfunktion	48
13	Interferenz	48
13.1	Kohärenz	48
13.2	Kohärenzlänge	48
13.3	Räumliche Kohärenz	48
13.4	“Dicke” Schichten	48
13.5	Antireflexionsschichten	48
13.6	Youngscher Doppelspaltversuch	49
13.7	Doppelspalt	49
13.8	Doppelspaltexperiment	49
13.9	Dielektrischer Spiegel	49
13.10	Michelson-Morley-Experiment	49
13.11	Seifenblasen	50

13.12	Ölschicht auf Wasser	50
13.13	Eigenschaften von Licht - Interferenz	50
13.14	Entspiegelung von Oberflächen	50
13.15	Fresnelsche Zonenplatte	50
13.16	Beugung vs. Interferenz	51
13.17	Bedingung für konstruktive Interferenz	51
13.18	Planparallele Platte als Spektralfilter	51
13.19	Interferenz vs. Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (mathematisch)	51
13.20	Beugungseffekte im Alltag	51
13.21	Winkel Hauptmaxima Doppelspalt	52
14	Gitter	52
14.1	Chamäleon	52
14.2	Interferenzmuster Gitter	52
14.3	Interferenzmuster Gitter 2	52
14.4	Intensitätsverteilung Beugung am Gitter	52
14.5	Doppelspalt vs. Gitter	53
14.6	Intensitätsverlauf gebeugtes Licht an Gitter	53
VI	Quantenphänomene	54
15	Quanten	54
15.1	Photonen	54
15.2	Photonen 2	54
15.3	2-Niveau-Laser	54
15.4	Eigenschaften Laser	54
15.5	Absorption nach Einstein	54
15.6	Induzierte Emission	55
15.7	Spontane Emission	55
15.8	Absorption hochenergetischer elektromagnetischen Wellen	55
15.9	Voraussetzungen Laser	55
15.10	Größe Absorption von Licht in Material	55
15.11	Lichtverstärkung Laser	55
16	Comptoneffekt	56
16.1	Compton-Wellenlänge	56
16.2	Compton-Streuung vs. Rayleigh-Streuung	56
16.3	Erhaltungssätze Compton-Streuung	56
16.4	Compton-Wellenlänge Elektron	56
16.5	Definition Compton-Effekt	56
16.6	Winkel mit größter Energieübertragung	57
17	Photoeffekt	57
17.1	Unterschied Laser und Photoeffekt	57
17.2	Inverser Photoeffekt	57
17.3	Photostrom	57
17.4	Geschwindigkeitsverteilung Photoeffekt	58
17.5	Photostrom 2 (ähnlich zu 17.3)	58
17.6	Entladung eines Gegenstandes	58

17.7	Proportionalitätskonstante Photoeffekt	58
17.8	Bechreibung Photoeffekt	58
17.9	Einsteins Erklärung	59
17.10	Innerer vs. äußerer Photoeffekt	59
18	Schwarzkörperstrahlung	59
18.1	Sternfarben	59
18.2	Schwarzer Strahler	59
18.3	Farbe und Temperatur von Sternen	60
18.4	Planksches Gesetz	60
18.5	Ultraviolett-Katastrophe	60
18.6	Wiensches Verschiebungsgesetz	60
18.7	Thermisches Gleichgewicht	60
18.8	Rotverschiebung	61
18.9	Reale Körper als schwarze Strahler	61
18.10	Ursprung Stefan-Boltzmann-Gesetz und Wiensches Verschiebungsgesetz	61
18.11	Expansion des Universums	61
18.12	Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	61
18.13	Chemische Zusammensetzung Sonnenatmosphäre	62
18.14	<i>Scherzfrage</i>	62
18.15	Definition schwarzer Körper	62
18.16	Frequenzbereiche Rayleigh-Jeans, Wien und Planck	62
18.17	Temperaturverdreifachung schwarzer Körper	62
18.18	Lösung	62
18.19	Kosmische Hintergrundstrahlung	63
19	Sonstiges	63
19.1	Quanten-Effekte 2	63
19.2	Glanz von Metallen	64
19.3	Experimentelle Befunde Entwicklung Quantenphysik	64
19.4	Erzeugung freier Elektronen	64
19.5	Freie Elektronen Photonenabsorption	64
19.6	Klassische Herleitung Elektronenradius	64
VII	Grundlagen der Quantenmechanik	65
20	Allgemeines	65
20.1	Absorption von Licht durch freie Elektronen	65
20.2	Bohrsche Postulate	65
20.3	Betragsquadrat quantenmechanische Wellenfunktion	65
20.4	Beugung und Interferenz im Teilchenmodell	65
20.5	Wellen- und Teilchencharakter von Licht (Experiment)	66
20.6	Heisenbergsche Unschärferelation	66
20.7	Gemeinsamkeiten Linien Wasserstoffserie	66
20.8	Eigenschaften von Licht als Welle und als Teilchen	66

Teil I

Elektromagnetische Wellen

1 Lichtwellen

1.1 Maxwellgleichungen

Erläutern Sie die allgemeinste Form aller vier Maxwell-Gleichungen näher.

Lösung

- (a) Die Quellen des E-Feldes entsprechen der Ladungsverteilung.

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

- (b) Es existieren keine Monopole und keine Quellen des magnetischen Feldes.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

- (c) Änderungen der magnetischen Flussdichte führen zu elektrischen Wirbelfeldern.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

- (d) Elektrische Ströme und Änderungen des elektrischen Feldes (Verschiebungsstrom) führen zu magnetischen Wirbelfeldern.

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

1.2 Definitionen

Erläutern Sie die Bedeutung der Begriffe isotrop, homogen, linear und dispersionsfrei in der Elektrodynamik.

Lösung

- isotrop ... Unabhängigkeit von der Richtung
- homogen ... Unabhängigkeit vom Ort
- linear ... die Polarisierung (bzw. Magnetisierung) steht im linearen Zusammenhang zum elektrischen Feld
- dispersionsfrei ... physikalische Größen (z. B. der Brechungsindex n) sind unabhängig von der Frequenz der Welle

1.3 Eigenschaften des Vakuums

Was sind die Eigenschaften des Vakuums (3 Stück)?

Lösung

Die Eigenschaften des Vakuums sind die Abwesenheit von Ladung ($\rho = 0$), Strömen ($j = 0$) und Materie ($\mu = 1$, $\epsilon = 1$).

1.4 Vakuumlichtgeschwindigkeit

Mit welchen zwei Konstanten der Elektrostatik bzw. Magnetostatik hängt die Vakuumlichtgeschwindigkeit zusammen? Nennen sie deren Namen und geben sie den Zusammenhang an.

Lösung

Dielektrizitätskonstante ϵ_0 und Permeabilitätskonstante μ_0 ;

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

1.5 Allgemeine Form Wellengleichung

Welche ist die allgemeinste Form der Funktion, die die Wellengleichung löst?

Lösung

$$f(x, t) = c \cdot h(x - vt) + d \cdot g(x + vt)$$

mit c, d aus \mathbb{R} .

1.6 Dreidimensionale Wellen

Begründen Sie, warum die Analyse dreidimensionaler Wellen nicht trivial ist und geben Sie ein Beispiel an.

Lösung

Begründung: Profil einer dreidimensionalen Welle ändert sich auch in dispersionsfreien Medien bei Ausbreitung.

Beispiel: Die Intensität einer Kugelwelle nimmt mit $\frac{1}{r^2}$ ab, die Amplitude mit $\frac{1}{r}$.

1.7 Fotografie

Welche Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen lassen sich auf Fotografien abbilden, welche gehen verloren?

Lösung

Fotografien geben lediglich das Intensitätsbild ohne Phaseninformation wieder.

1.8 Auge (ähnlich zu 1.7)

Welche Größe der EM-Welle wird vom Auge tatsächlich wahrgenommen?

Lösung

Die Intensität I .

1.9 Poynting-Vektor 2

Ist der über die Zeit gemittelte Poynting-Vektor abhängig von der Frequenz der EM Welle?

Lösung

Nein, er ist unabhängig von der Frequenz, $\sin^2 \omega t$ gemittelt ergibt 0,5.

1.10 Poynting-Vektor

Was beschreibt der Poynting - Vektor?

Lösung

Er beschreibt die Richtung und die Dichte des Energietransportes durch elektromagnetische Wellen.

1.11 Wellenfront

Was ist eine Wellenfront?

Lösung

Ebene konstanter Phase senkrecht zur Ausbreitungsrichtung \vec{k} .

1.12 Huygensches Prinzip

Was ist das Huygen'sche Prinzip?

Lösung

Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangsort einer neuen Kugelwelle (Elementarwelle). Die Überlagerung der Kugelwellen bildet die Wellenfront der fortschreitenden Welle.

1.13 Huygensches Prinzip 2

Wie ändert sich das Huygen'sche Prinzip, wenn man ein anisotropes Medium betrachtet?

Lösung

Aus den Kugelwellen werden Ellipsoiden.

1.14 Dipolschwingung

Was ist die Anforderung an eine elektromagnetische Welle, sodass diese Moleküle beim Streuen zu Dipolschwingungen anregt?

Lösung

Die Wellenlänge muss im Vergleich zum Durchmesser der Moleküle groß sein.

1.15 Energieerhaltung Welle in Medium

Eine EM-Welle treffe auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien. Die Wellenlänge ändere sich entsprechend. Wieso bleibt dennoch der Energiehaltungssatz gültig?

Lösung

Die Frequenz f bzw. ω bleibt gleich, dafür ändern sich die Wellenlänge λ und die Phasengeschwindigkeit v_{ph} .

1.16 Atmosphäre auf Venus

Wie wird der Himmel der Venus aussehen (Farbe), wenn bekannt ist, dass deren Atmosphäre dichter ist, als die der Erde? (mit kurzer Begründung)

Lösung

Da die Atmosphäre der Venus dichter ist als die der Erde, wird der blaue Lichtanteil, der bei uns auf der Erde tagsüber das Auge erreicht, schon im oberen Bereich der Atmosphäre gestreut. Somit erreicht er die Venusoberfläche nicht, weswegen dort rotes Licht dominiert.

1.17 Kohärente Streuung

Was gilt für die Gesamtintensität bei kohärenter Streuung zweier oder mehrerer Wellen?

Lösung

Die Gesamtintensität für die kohärente Streuung ist die Summe der Amplituden, welche anschließend quadriert werden.

1.18 Planeten mit Atmosphäre

Warum erscheinen die Planeten, die eine Atmosphäre haben, heller?

Lösung

Ein Teil des einfallenden Lichts wird auch zurück in den Weltraum gestreut, da das Licht bei der Streuung nicht absorbiert wird.

1.19 Sonnenuntergangshimmel

Warum erscheint der Himmel rot bei Sonnenuntergang?

Lösung

Blaues Licht wird im Mittel stärker gestreut als rotes (Faktor 10 in der mittleren Eindringtiefe). Da in der Abenddämmerung das Licht einen weiteren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen muss, wurde ein Großteil des blauen Lichtes schon gestreut und der Himmel erscheint rot.

Alternativ: Das blaue Licht wird durch die Rayleigh-Streuung stärker senkrecht zur Lichtausbreitung gestreut, ein größerer Rotanteil bleibt übrig.

1.20 Blauer Himmel

Warum ist der Himmel (auf der Erde) blau?

Lösung

Die Lichtstrahlen der Sonne werden in der Erdatmosphäre u.a. von Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen gestreut. Da diese Streuung mit der Frequenz exponentiell steigt (f^4), wird blaues Licht am meisten gestreut. Diese frequenzabhängige Streuung heißt Rayleigh-Streuung.

1.21 Wahrscheinlichkeit Rayleigh-Streuung

Wovon hängt die Wahrscheinlichkeit einer Rayleigh-Streuung ab und was heißt das für sichtbares Licht? Nennen Sie ein Beispiel für Rayleigh-Streuung.

Lösung

Die Wahrscheinlichkeit einer Rayleigh-Streuung ist proportional zur vierten Potenz der Frequenz des Lichts. Also wird blaues Licht stärker gestreut als rotes Licht. Beispiele für Rayleigh-Streuung sind:

- Streuung von Licht am Himmel (Himmel ist blau)
- Streuung von Zigarettenrauch (Rauch ist bläulich)
- verdünnte Milch in Wasser

1.22 Himmelsgrau

Was ist Mie-Streuung? Wie hängt sie von der Wellenlänge ab? Welche Farben am Himmel kann man mit dieser erklären?

Lösung

Mie-Streuung findet statt, wenn die Partikelgröße sich in der Größenordnung der Wellenlänge befindet, also zum Beispiel bei regnerischem Wetter Wassertröpfchen. Die Rayleigh-Streuung ist ein Grenzfall der Mie-Streuung bei kleinen Teilchen. Die Mie-Streuung hängt kaum von der Wellenlänge ab. Man kann damit also z.B. das Weiß der Wolken erklären: alles Licht wird gestreut! Oder aber das Grau eines trüben Tages.

1.23 Farbe von Gegenständen

Was verursacht die Farbe eines Gegenstands?

Lösung

Die Farbe eines Gegenstands wird durch die Zusammensetzung des Lichts bestimmt, das von dem Material reflektiert oder ausgesendet wird.

1.24 Gruppengeschwindigkeit vs. Phasengeschwindigkeit

Erklären Sie den Unterschied zwischen Gruppengeschwindigkeit und Phasengeschwindigkeit in einem Wellenpaket.

Lösung

Die Gruppengeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit des Energietransports des Wellenpakets. Die Phasengeschwindigkeiten sind die Geschwindigkeiten, mit denen sich die Partialwellen, aus denen sich das Wellenpaket zusammensetzt, ausbreiten.

1.25 Longitudinal- vs. Transversalwellen

Beschreiben Sie den Unterschied zwischen longitudinalen und transversalen Wellen.

Lösung

Bei transversalen Wellen steht die Amplitude senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung. Hingegen bei longitudinalen Wellen schwingt die Welle parallel zur Ausbreitungsrichtung.

1.26 Phasengeschwindigkeit größer als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum?

Warum ist es physikalisch kein Widerspruch, dass $v_{ph} > c$ im Vakuum sein kann?

Lösung

Die Vakuumlichtgeschwindigkeit bildet das obere Limit für den Informationstransport. Information wird durch v_G transportiert und nicht durch v_{ph} .

1.27 Gruppengeschwindigkeit

Was beschreibt die Gruppengeschwindigkeit von Licht?

Lösung

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Einhüllenden eines Wellenpakets. In den meisten Fällen ist dies auch die Geschwindigkeit, mit der Informationen ausgetauscht werden.

1.28 Naturphänomene Strahlungsdruck

Nennen Sie ein Phänomen in der Natur, das durch den Strahlungsdruck des Lichts verursacht wird bzw. Anwendung findet.

Lösung

Größe der Sonne, Kometenschweif Biegung, Sonnensegel Raumsonden.
Lichtmühlendrehung basiert nicht auf Strahlungsdruck (Drehung in andere Richtung als erwartet)

1.29 Messung der Entfernung zum Mond

Wie kann man die Entfernung zum Mond präzise messen?

Lösung

Mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit, einem gepulsten Laserstrahl und einem Winkel-Reflektor auf dem Mond.

1.30 Experimenteller Nachweis nichtruhender Äther

Wie heißt das Experiment, bei dem festgestellt wurde, dass es keinen ruhenden Äther gibt?

Lösung

Michelson-Morley-Experiment

2 Fouriertransformation

2.1 Fundamentale Aussage Fourieranalysis

Was ist die fundamentale Aussage der Fourieranalysis?

Lösung

Laut dem Fourier-Theorem kann man jede Funktion durch eine Überlagerungen von periodischen Funktionen darstellen.

2.2 Beschreibung Wellenpaket

Auf welche zwei äquivalenten Arten lässt sich ein Wellenpaket beschreiben?

Lösung

Der Frequenzverlauf und der zeitliche Verlauf beschreiben das Wellenpaket gleichermaßen (Fourier-Transformation).

3 Dispersion

3.1 Definition Dispersion (ähnlich zu 3.9)

Was ist Dispersion?

Lösung

Dispersion bezeichnet die Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle von der Frequenz. (Dies kann sowohl für die Phasengeschwindigkeit als auch für die Gruppengeschwindigkeit gelten.)

Alternativ: Der Brechungsindex ist abhängig von der Wellenlänge; oder auch die Lichtgeschwindigkeit im Medium abhängig von der Frequenz.

3.2 Mikroskopische Ursache für Dispersion von Licht in Materie

Was ist die mikroskopische Ursache für die Dispersion von Licht in Materie?

Lösung

Die einfallende elektromagnetische Welle regt im Medium die Atomelektronen zu Schwingungen an. Die dadurch ausgestrahlten Sekundärwellen überlagern sich mit der Primärwelle. Aufgrund deren Phasenverschiebung resultiert eine kleinere Geschwindigkeit $c' = \frac{c}{n}$ (Dispersion).

3.3 Arten von Dispersion (ähnlich zu 3.9)

Welche zwei Arten von Dispersion gibt es und wie unterscheiden sie sich?

Lösung

Normale und anomale Dispersion. Bei normaler Dispersion verringert sich ω mit steigendem λ und damit n , bei anormaler nicht unbedingt.

3.4 Metalle undurchsichtig

Warum sind alle Metalle für sichtbares Licht undurchsichtig?

Lösung

Weil die Elektronen im Metall ungebunden sind. Dadurch ergibt sich, dass der Brechungsindex rein imaginär ist für Frequenzen des sichtbaren Lichtes. Das bedeutet es gibt keine sichtbare Dispersion.

3.5 Metalle Reflexion sichtbares Licht

Warum reflektieren Metalle sichtbares Licht?

Lösung

Leitende Rückstellkraft der Elektronen ist fast null. Plasmafrequenz im UV-Bereich.

3.6 Wellenpaket in dispersiven Medien

Wie verändert sich ein Wellenpaket in dispersiven Medien bei Ausbreitung?

Lösung

Das Wellenpaket läuft auseinander.

3.7 Isotrope vs. anisotrope Medien

Was ist der Unterschied zwischen (optisch) isotropen und anisotropen Medien?

Lösung

isotropes Medium: Rückstellkraft unabhängig von der Richtung des äußeren Feldes

anisotropes Medium: Rückstellkraft abhängig von der Richtung des äußeren Feldes

Allgemeiner: In optisch isotropen Medien sind Eigenschaften unabhängig von der Richtung, in anisotropen Medien besteht eine Richtungsabhängigkeit.

Alternativ: In isotropen Medien ist der Vektor des Dipolmoments parallel zum Vektor des elektrischen Feldes. In anisotropen Medien ist das nicht der Fall.

3.8 Dielektrizitätstensor optisch isotrope Medien

Wie sieht der Dielektrizitätstensor für optisch isotrope Medien aus?

Lösung

Der Tensor ist in Matrixschreibweise die Einheitsmatrix multipliziert mit einem Skalar, welcher die Dielektrizitätskonstante ist.

3.9 Normale und anomale Dispersion

Erläutern Sie die Begriffe 'Dispersion', 'normale Dispersion' und 'anomale Dispersion'.

Lösung

Dispersion ist die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge. Es gilt die Dispersionsrelation $k^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c^2}$.

Bei normaler Dispersion ist $\frac{dn'}{d\omega} > 0$ und $|n''| < 1$, die Absorption ist also meist vernachlässigbar (optisch durchlässig/transparent).

Bei anomaler Dispersion ist $\frac{dn'}{d\omega} < 0$ und für $\omega \approx \omega_0$ ist n'' (und somit die Absorption) nicht vernachlässigbar. Stoffe sind im Absorptionsband also optisch undurchlässig.

3.10 Dispersionslose vs. dispersionsbehaftete Wellen

Wo liegt der Unterschied zwischen dispersionslosen und dispersionsbehafteten Wellen?

Lösung

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_{ph} von dispersionsbehafteten Wellen hängt von der Frequenz der Welle ab: $v_{ph} = v_{ph}(f)$. Hingegen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von dispersionslosen Wellen unabhängig von der Frequenz der Welle.

3.11 Komplexer Brechungsindex bei anomaler Dispersion

Wie verhält sich der komplexe Brechungsindex bei anomaler Dispersion?

Lösung

Der reelle Brechungsindex ist für Frequenzen knapp unterhalb der Resonanzfrequenz besonders groß und fällt dann mit zunehmender Frequenz rasch auf Werte unterhalb von 1 ab. Im Bereich anomaler Dispersion gilt also $\frac{dn'}{d\omega} < 0$. Der imaginäre Teil von n kann nicht vernachlässigt werden, da n'' für $\omega = \omega_0$ den betragsmäßig größten Wert aufweist. Es kommt zur Absorption.

3.12 Zeitliches Verhalten Einhüllende Wellenpaket

Wie verhält sich die Einhüllende einer Wellengruppe im Verlauf der Zeit?

Lösung

Aufgrund von Dispersion nimmt die Breite der Einhüllenden zu!

3.13 Plasmafrequenz

Was geschieht mit Licht, dessen Frequenz größer als die Plasmafrequenz ist, beim Auftreffen auf eine Metallschicht?

Lösung

Für Licht mit einer Frequenz, die größer als die Plasmafrequenz ist, wird Metall durchsichtig. Der Lichtstrahl wird transmittiert.

3.14 Dispergierende Medien

Was sind dispergierende Medien?

Lösung

Medien mit frequenzabhängigen Eigenschaften.

Teil II

Elektromagnetische Wellen an Grenzflächen

4 Brechung

4.1 Sonnenuntergang

Warum ist die Sonne kurz vor Sonnenuntergang ellipsenförmig und nicht kreisförmig?

Lösung

Das vom unteren Sonnenrand kommende Licht wird beim Eintritt in die Erdatmosphäre stärker gebrochen als das vom oberen Sonnenrand kommende Licht.

4.2 Phasensprung

Wann kommt es an einer Grenzfläche zu einem Phasensprung?

Lösung

An einem Übergang von einem optisch dünneren zu einem optisch dichteren Medium kommt es beim senkrechten reflektierten Anteil zu einem Phasensprung um 180 Grad. Beim parallelen Anteil findet der Phasensprung nur bis zum Brewsterwinkel statt.

Alternativ: Bei der Reflexion an einem optisch dichteren Medium.

4.3 Totalreflexion

Was sind die Voraussetzungen für Totalreflexion?

Lösung

Der Lichtstrahl muss vom optisch dichteren ins optisch weniger dichte Medium übergehen und für den Winkel zwischen Lot und einfallendem Strahl muss gelten: $\sin \theta = \frac{n_2}{n_1}$ oder θ größer als dieser Winkel.

4.4 Definition evaneszente Welle

Was sind evaneszente Wellen?

Lösung

Evaneszente Welle treten an Grenzflächen auf und haben in einem Medium nur eine exponentiell abfallende Lösung.

Alternativ: Bei Totalreflexion wird der Lichtstrahl komplett reflektiert, dennoch ist eine exponentiell abklingende Welle im Grenzmedium eine Lösung. Diese abklingende Welle wird evaneszente Welle genannt.

4.5 Realteil und Imaginärteil im Brechungsindex

Welche qualitative Bedeutung haben der Imaginärteil n_i und der Realteil n_r der Brechungszahl n ?

Lösung

Der Imaginärteil n_i der Brechungszahl n ist verantwortlich für die Abnahme der Amplitude einer EM-Welle beim Durchgang durch ein Medium.

Der Realteil n_r der Brechungszahl n führt zu einer Phasenverschiebung der Welle, er verändert also die Phasengeschwindigkeit.

4.6 Phasensprung 2

Licht treffe auf ein optisch dichteres Medium. Wann kommt zu einem Phasensprung?

Lösung

beim senkrechten reflektierten Anteil kommt es zu einem Phasensprung um 180 Grad. Beim parallelen Anteil findet der Phasensprung nur bis zum Brewsterwinkel statt. Der transmittierte Anteil hat keinen Phasensprung.

4.7 Glasfaserkabel

Welches physikalische Phänomen macht man sich bei Glasfaserkabeln (Lichtwellenleiter) zu Nutze?

Lösung

Die Totalreflexion macht man sich bei Glasfaserkabeln zu Nutze.

4.8 Frequenzabhängiger Brechungsindex

Welchen Einfluss hat ein frequenzabhängiger Brechungsindex auf ein Wellenpaket, dass sich in einem solchen Medium ausbreitet?

Lösung

Die verschiedenen Teilwellen, aus denen sich das Wellenpaket zusammensetzt, bewegen sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit fort. Dadurch "zerläuft" das Wellenpaket.

4.9 Sehen unter Wasser

Wo entsteht im Auge das scharfe Bild beim Sehen unter Wasser ohne Taucherbrille. Brechungsindex der Augenlinse ca. 1,33.

Lösung

Der Unterschied der Brechzahlen der Linse und des Wassers sind kleiner als der Unterschied zwischen Linse und Luft. Dementsprechend wird das Licht weniger stark gebrochen und das scharfe Bild entsteht erst hinter der Netzhaut.

4.10 Rein imaginärer Brechungsindex

Welche Auswirkung hat ein imaginärer Brechungsindex auf eine Welle, die in das Material (mit diesem Brechungsindex) eindringt?

Lösung

Die Funktion der Welle, eine Exponentialfunktion mit imaginärem Argument, erhält wegen des imaginären Brechungsindex einen exponentiell abfallenden Faktor. Daher wird die Welle während des Eindringens in das Material absorbiert.

4.11 Fata Morgana

Wie entsteht eine Luftspiegelung (Fata Morgana)?

Lösung

Durch die räumliche Änderung des Brechungsindex wird ein hindurchgehender Lichtstrahl gebogen. Bei Erwärmung einer bodennahen Luftschicht verringern sich deren Dichte und Brechungsindex. In Luft mit geringerer Dichte breiten sich Lichtwellen schneller aus ($v = \frac{c}{n}$), sodass ein Lichtstrahl beim Übergang in die wärmere Luft gebogen wird.

Alternativ: Durch die Erwärmung des Bodens hat die dünnere Luft in Bodennähe einen kleineren Brechungsindex. Dadurch wird das vom Himmel kommende Licht in Bodennähe umgelenkt/gebogen. Das Auge projiziert das Bild des Himmels damit in den Boden.

4.12 Farbreihenfolge Regenbogen

Geben Sie die Farbreihenfolge (rot/blau) des Regenbogens für einen Regenbogen bzw. zwei Regenbögen an.

Lösung

primärer Regenbogen: innen blau, außen rot;
sekundärer Regenbogen: innen rot, außen blau

4.13 Rotes Licht aus Luft in Wasser

Monochromatisches rotes Licht der Wellenlänge 700 nm tritt aus Luft in Wasser ein ($n_{\text{Wasser}} = 1,33$). In welcher Farbe sieht ein Taucher im Wasser das Licht?

Lösung

Die Farbe, die der Taucher wahrnimmt, hängt lediglich von der Frequenz und nicht von der Wellenlänge ab. Daher hat das Licht für den Taucher dieselbe Farbe.

4.14 Negative Brechungsindizes

Unter welchen Bedingungen sind negative Brechungsindizes möglich?

Lösung

In Meta-Materialien werden negative Brechungsindizes durch negative/komplexwertige Werte von ϵ_r oder/und μ_r erreicht.

4.15 Frequenz und Brechung

Wie wirkt sich in dispersiven Medien die Frequenz auf die Brechung aus?

Lösung

Licht höherer Frequenz (bzw. kürzerer Wellenlänge) wird in dispersiven Medien stärker gebrochen als Licht niedriger Frequenz.

4.16 Brechungsindex Resonanzen IR und UV Bereich

Der Frequenzverlauf des Brechungsindex zeigt Resonanzen im infrarot- und im ultraviolett-Bereich. Auf welche Vorgänge im Material sind diese zurück zu führen?

Lösung

Die Resonanzen im Infrarot-Bereich sind durch Schwingungen der Moleküle, die im Ultraviolett-Bereich durch elektronische Bewegungen bestimmt.

4.17 Brechungsindex verdünnte Medien

Für verdünnte Medien ist $\epsilon(\omega)$ nahe bei 1. Zur Bestimmung des Realteils und des Imaginärteils vom Brechungsindex n nutzt man die Beziehung $(\epsilon - 1) \approx 2(n - 1)$. Wie kommt diese Beziehung zustande?

Lösung

$$(\epsilon - 1) = (n^2 - 1) = (n + 1)(n - 1) \approx 2(n - 1)$$

Da n nahe bei 1 liegt, nähert man $(n + 1) \approx 2$.

4.18 Brechungsindex Metamaterialien

Licht fällt auf ein Material mit negativen Brechungsindex (sog. Metamaterial). In welche Richtung läuft die Welle? Steht ein kleinerer Brechungsindex als -1 im Widerspruch zur Lichtgeschwindigkeit als Obergrenze für Informationstransport?

Lösung

Der negative Brechungsindex führt dazu, dass Phasen- und Gruppengeschwindigkeit entgegen der Richtung des Poynting-Vektors laufen.

Nein, da der Brechungsindex nur die Phasengeschwindigkeit beeinflusst, nicht die Gruppengeschwindigkeit. Nur diese ist an die obere Schranke der Lichtgeschwindigkeit gebunden.

4.19 Brechungsindex Antireflexionsschicht

Muss der Brechungsindex einer Antireflexschicht zwischen Luft und Glas kleiner oder größer sein, als der Brechungsindex von Glas?

Lösung

Er muss kleiner sein, denn:

$$n_F = \sqrt{n_{Luft} \cdot n_{Glas}}$$

5 Fresnelsche Formeln

5.1 Flurboden als Spiegel

Warum wirkt der Boden eines Flurs aus einem flachen Blickwinkel wie ein Spiegel?

Lösung

Für einen flachen Blickwinkel hat man einen Einfallswinkel von ungefähr 90° . Für $\alpha \rightarrow 90^\circ$ erhält man die Reflexionskoeffizienten $r_P \rightarrow 1$ und $r_S \rightarrow -1$, also $R \rightarrow 1$, d.h. das Licht wird nahezu vollständig reflektiert und der Flurboden wirkt wie ein Spiegel.

5.2 Eigenschaften von Wellen beim Übergang zwischen Medien

Beim Übergang zwischen Medien ändern sich manche Eigenschaften der Welle während andere gleich bleiben. Beschreiben Sie, wie sich drei charakteristische Eigenschaften der Welle verhalten.

Lösung

Beim Übergang zwischen Medien ändert sich die **Frequenz** einer Welle nicht. Die **Ausbreitungsrichtung** ändert sich gemäß dem **Snellius'schen Gesetz** abhängig von den Brechungsindizes sowie dem Einfallswinkel. Die **Amplitude** der transmittierten Welle wird durch die **Transmissionskoeffizienten** - also ebenfalls durch Brechungsindizes und Einfallswinkel - bestimmt. Die **Geschwindigkeit** der Welle ändert sich je nach Brechungsindex.

5.3 Strahlungsdruck

Wann ist der Strahlungsdruck größer? Bei Absorption oder Reflexion und warum?

Lösung

Der Strahlungsdruck ist bei Reflexion doppelt so hoch wie bei Absorption wegen der Impulserhaltung.

5.4 Farbe von Bäumen

Warum sehen wir Blätter im Baum als grün, wenn sie beleuchtet werden?

Lösung

Weil Chlorophyll grünes Licht reflektiert und den Rest absorbiert.

5.5 Lampe unter Wasser

Ist es unter Wasser möglich, mit einer Lampe so nach oben zu scheinen, dass ein außen stehender Betrachter das Licht nicht sieht?

Lösung

Ab dem Totalreflexionswinkel wird das Licht der Lampe komplett gespiegelt und dringt nicht mehr durch die Wasseroberfläche.

Teil III

Polarisation und Doppelbrechung

6 Polarisation

6.1 Optische Aktivität

Was ist optische Aktivität?

Lösung

Optische Aktivität bezeichnet einen Effekt in manchen Materialien (z.B. Quarz), bei dem die Polarisationsebene einer einfallenden, linear polarisierten Welle um den Drehwinkel $\alpha = \alpha_S \cdot d$ (mit α_S dem spezifischen, optischen Drehvermögen und d der Schichtdicke) gedreht wird.

6.2 3D-Kino

In modernen 3D-Kinos werden Filme mithilfe von zirkular polarisiertem Licht gezeigt. Wieso muss dabei die Leinwand dafür eine metallische Oberfläche haben?

Lösung

Damit das Licht, in der selben Art polarisiert, beim Zuschauer ankommt, muss diese Polarisation bei der Reflexion an der Leinwand erhalten bleiben. Im Gegensatz zu anderen Leinwänden ist dies bei metallischen Oberflächen gegeben.

6.3 Orientierungspolarisation sichtbares Licht

Wieso spielt Orientierungspolarisation keine Rolle für Frequenzen im Bereich des sichtbaren Lichts?

Lösung

In polaren Medien rotieren die Moleküle, um sich dem zeitlich veränderlichen elektrischen Feld anzupassen. Sichtbares Licht hat eine zu hohe Schwingungsfrequenz, bei der die Moleküle nicht dem Feld folgen können.

6.4 Elektronenpolarisation sichtbares Licht

Warum dominiert die Elektronenpolarisation im Wellenbereich des sichtbaren Lichts?

Lösung

Die Masse der Elektronen ist i.A. deutlich geringer als die von permanenten elektrischen Dipolen, Molekülen und Ionen.

6.5 Polarisation durch Reflexion

Durch Reflexion eines Lichtstrahls kann man diesen polarisieren oder seine Polarisationsart ändern. Was kann man mit dem Brewster- und Totalreflexion-Winkel bewirken?

Lösung

Mit dem Brewster-Winkel kann man Licht linear polarisieren. Und mit dem Winkel unter Totalreflexion kann man lineares Licht zirkular polarisieren (Fresnelsches Parallelepiped).

6.6 Licht polarisieren

Nennen Sie drei Möglichkeiten, wie kann man Licht polarisieren kann.

Lösung

- Streuung (Brewster-Winkel, Rayleigh-Streuung)
- Reflexion
- richtungsselektive Absorption (Dichroismus)
- Doppelbrechung
- Polarisationsfilter

6.7 Absorption vom E-Feld Metallgitter

Welche Richtung vom E-Feld wird beim Durchgang durch ein Metallgitter absorbiert und warum?

Lösung

Die Richtung parallel zu den Stäben, da die freien Metallelektronen kräftefrei im Gitter schwingen und so diesen Feldanteil absorbieren.

6.8 Dichroismus

Was versteht man unter Dichroismus?

Lösung

Unterschiedliche, richtungsabhängige Absorption in einem Medium.

Alternativ: Der Dichroismus ist die Eigenschaft eines anisotropen Mediums, Licht in Abhängigkeit seiner Polarisation unterschiedlich stark zu absorbieren.

6.9 Arten der Polarisation

Welche Arten der Polarisation eines Mediums kennen Sie? Beschreiben Sie zwei davon kurz.

Lösung

- Orientierungspolarisation (Ausrichtung permanenter elekt. Dipole)
- Verschiebungspolarisation (Bildung/Induzierung elekt. Dipole durch ein äußeres elekt. Feld),
- Ionenpolarisation (relative Verschiebung von pos. Ionen zu den neg. Ionen in einem Ionen-gitter)
- Elektronenpolarisation (Elektronen eines Atoms werden so verschoben, dass der neg. Ladungsschwerpunkt nicht mehr mit dem pos. übereinstimmt → betrachtetes klassisches Modell, wichtig für Frequenzen im Bereich des optischen Lichts)

6.10 Reflektierter und transmittierter Strahl

Wie verhält sich die Polarisierung vom reflektierten bzw. transmittierten Strahl in Bezug auf die Einfallsebene?

Lösung

Bei Reflexion wird die Polarisierungsebene von der Einfallsebene weggedreht und die transmittierte Welle wird zur Einfallsebene gedreht.

6.11 Brechungsindex-Ellipse

Wie viele charakteristische Wellen hat eine Brechungsindex-Ellipse, und weshalb nicht mehr (oder weniger)?

Lösung

Zwei:

Es sind genau zwei, da es nur zwei Möglichkeiten gibt, wie auf der Ellipsoidenschnittfläche senkrecht zu \vec{k} , die \vec{D} , \vec{E} und \vec{k} Vektoren in einer Ebene liegen können.

6.12 Uniaxialer Kristall

Was versteht man unter einem uniaxialem Kristall?

Lösung

Der dielektrische Tensor hat zwei unterschiedliche Einträge, der Brechungsindex-Ellipsoid ist rotationssymmetrisch zu einer Achse. $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$

6.13 Uniaxiales Medium

Warum kann sich Licht in einem uniaxialem Medium senkrecht zur optischen Achse nicht in beliebige Richtungen polarisiert ausbreiten?

Lösung

Laut Maxwell müssen \vec{k} , \vec{D} und \vec{E} in einer Ebene liegen. Dies ist im Ellipsoid nur möglich, falls die Polarisierung (\vec{D}) entlang der beiden Hauptachsen des Ellipsenschnitts liegt.

6.14 $\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Plättchen

Was macht ein $\lambda/2$ -Plättchen und was ein $\lambda/4$ -Plättchen mit links-zirkular-polarisiertem Licht?

Lösung

$\lambda/2$: aus links zirkular wird rechts zirkular polarisiert

$\lambda/4$: es wird linear polarisiert

6.15 Natur des Lichts

Was sagt uns die Polarisation über die Natur des Lichts?

Lösung

Die Polarisation sagt uns, dass Licht eine Transversalwelle ist. Longitudinalwellen können nicht polarisiert werden.

6.16 Experiment zur Demonstration optischer Aktivität

Beschreiben Sie kurz ein Experiment mit dem sich die optische Aktivität eines Mediums demonstrieren lässt.

Lösung

Man positioniere zwei Polfilter, mit gekreuzten Durchlassrichtungen und platziere eine Probe dazwischen. Lässt sich hinter dem zweiten Polfilter Licht wahrnehmen, wurde die die Polarisationsrichtung vom optisch aktiven Medium gedreht.

6.17 Polarisationsfilter

Was ist ein Polarisationsfilter?

Lösung

Ein Polarisationsfilter (kurz auch Polfilter) ist ein Polarisator für Licht, der auf Dichroismus beruht, also komplementär polarisiertes Licht absorbiert.

6.18 Messung von polarisiertem Licht

Zu welcher Zeit am Tag kann man das meiste polarisierte Licht messen, wenn man gerade nach oben schaut?

Lösung

Bei Sonnenauf- oder untergang, da man das meiste im 90° gestreuten Licht sieht.

6.19 Zirkular polarisiertes Licht

Welche Bedingungen müssen zwei aufeinander senkrecht stehende Teilwellen erfüllen, damit man zirkular polarisiertes Licht erhält?

Lösung

Phasenunterschied von 90° , gleiche Amplitude, gleiche Frequenz und gleiche Ausbreitungsrichtung.

6.20 Linear polarisiertes Licht (ähnlich zu 6.6)

Welche Möglichkeiten zur linearen Polarisation von Licht gibt es? Nennen Sie drei.

Lösung

Licht kann durch Streuung, Reflexion unter Brewster-Winkel, Reflexion an metallischen Oberflächen, Doppelbrechung oder mithilfe eines richtungsselektiven Brechungsindex (Dichroismus) polarisiert werden.

6.21 Vektoren in isotropen und anisotropen Medien

Wie stehen der \vec{k} -vektor, \vec{E} , \vec{B} , \vec{D} und \vec{S} in einem isotropen, bzw anisotropen Medium zueinander?

Lösung

Isotrop: \vec{k} -vektor, \vec{B} und \vec{E} stehen paarweise senkrecht aufeinander. \vec{D} ist parallel zu \vec{E} , \vec{k} ist parallel zu \vec{S} .

Anisotrop: \vec{k} -vektor, \vec{D} und \vec{B} stehen paarweise senkrecht aufeinander. \vec{D} und \vec{E} sind nicht parallel, \vec{k} und \vec{S} sind nicht parallel. \vec{E} und \vec{S} stehen senkrecht aufeinander, und liegen in der Ebene, die von \vec{D} und \vec{k} aufgespannt wird.

6.22 Brewster-Winkel Glasscheibe

Eine Welle (in Luft) trifft unter dem Brewster-Winkel auf eine Glasscheibe. Was kann man über die Polarisation der reflektierten Welle aussagen?

Lösung

Die reflektierte Welle ist vollständig senkrecht zur Einfallsebene polarisiert.

6.23 Sonnenlicht ist...

Wenn man direkt Richtung Sonne schaut, ist das Licht ...

Lösung

unpolarisiert.

6.24 Möglichkeiten zur Drehung der Polarisationsebene

Nennen Sie zwei Möglichkeiten, mit denen man die Polarisationsebene drehen kann.

Lösung

- Polarisationsfilter
- $\lambda/2$ -Plättchen
- optisch aktive Lösungen (Zucker)
- Faraday-Effekt

6.25 3D-Brille 2

Aus welchen Bestandteilen besteht eine moderne 3D-Brille, bei der man ohne Probleme den Kopf neigen kann?

Lösung

Einem $\lambda/4$ -Plättchen und einem linearen Polarisationsfilter.

6.26 3D-Brille

Was passiert, wenn man durch eine 3D-Brille eine andere Person anschaut, die ebenfalls eine 3D-Brille trägt, und sich selbst ein Auge zuhält?

Lösung

Das Brillenglas direkt gegenüber erscheint schwarz, weil genau der Anteil nicht mehr durch den Filter kommt.

6.27 Funktionsweise 3D-Brille für 3D-Film (ähnlich zu 6.25)

Überlegen Sie sich, wie die Brillen in einem moderneren 3D-Film, funktionieren, bei dem der 3D-Effekt auch dann erhalten bleibt wenn der Betrachter seinen Kopf zur Seite neigt.

Lösung

Auf die Leinwand werden zwei Bilder mit gegensätzlich polarisiertem Licht (Rechts-,Linkszirkular oder Lineares Licht im 90° -Winkel) projiziert. Die 3D Brillen sind letztendlich Polarisationsfilter (zusammengesetzte), die jeweils nur eine Bildsorte ins Auge lassen, die dann im Gehirn in ein 3D-Bild zusammengeführt wird. Beim zirkular polarisierten Licht wird das Licht durch $\lambda/4$ Plättchen in lineares Licht umgewandelt und dann durch Linearfilter gefiltert, deshalb kann man seinen Kopf drehen.

6.28 Definition polarisiertes Licht

Was ist (polarisiertes) Licht?

Lösung

Licht ist wie alle elektromagnetischen Wellen eine Transversalwelle. Bei einer transversalen Welle steht die Schwingungsebene immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Man kann ihr eine eindeutige Polarisation zuordnen.

6.29 Polarisationsarten (Richtungen)

Welche verschiedenen Arten von Polarisation (Licht) gibt es?

Lösung

Wir betrachten \vec{E} . Bei einer linear polarisierten Welle liegt \vec{E} immer parallel zu einer bestimmten Richtung, die natürlich senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung liegt. Eine zirkular polarisierte Welle ist eine Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen, die zueinander senkrecht schwingen und eine Phasenverschiebung von $\pi/2$ aufweisen. Anders: \vec{E} rotiert mit der Kreisfrequenz ω um die Ausbreitungsrichtung der Welle (an einem festen Ort). Bei elliptisch polarisiertem Licht sind die Amplituden der beiden linearen Wellen auch noch unterschiedlich.

6.30 Polarisation durch Reflexion

Erklären Sie, wie man mit Hilfe von Reflexion aus unpolarisiertem Licht linear polarisiertes Licht machen kann.

Lösung

Beim sogenannten Brewster-Winkel wird die parallele Komponente des E-Feldes vollständig transmittiert. Somit wird ausschließlich die senkrechte Komponente und damit linear polarisiertes Licht reflektiert.

6.31 Funktionsweise und Wirkung $\lambda/4$ - und $\lambda/2$ -Plättchen

Erklären Sie die Funktionsweise und Wirkung eines $\lambda/4$ bzw. $\lambda/2$ -Plättchens.

Lösung

Das $\lambda/4$ -Plättchen ist ein anisotroper, einachsiger Kristall, mit einer gewählten Dicke, sodass der ordentliche und unordentliche Strahl, die den Kristall mit unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten durchlaufen, danach eine Phasenverschiebung von $\pi/2$ haben.

Das $\lambda/2$ -Plättchen ist ein $\lambda/4$ -Plättchen mit doppelter Dicke. Dadurch wird der Drehsinn von zirkular polarisiertem Licht umgekehrt oder linear polarisiertes Licht um 90° gedreht.

6.32 Polarisation des Lichts des Himmels

Sie blicken in den Zenit des Himmels. Erklären Sie, warum ein Teil des beobachtbaren Lichts des Himmels polarisiert ist. Wann ist dieser Effekt am stärksten und warum?

Lösung

Das Licht des Himmels ist polarisiert, da es in der Atmosphäre gestreut wird. Induzierte Dipole schwingen senkrecht zur Einstrahlrichtung der Sonne, dabei strahlen sie Licht ab, das in Schwingungsrichtung polarisiert ist. Bei Sonnenauf- oder Sonnenuntergang ist dieser Effekt am stärksten, da andere Polarisationsrichtungen das Auge nicht erreichen, da die durch diese Richtungen angeregten Dipole nicht senkrecht zur Erdoberfläche abstrahlen.

6.33 Optische Aktivität 2

Was ist der Unterschied zwischen (nicht induzierter) optischer Aktivität und dem magneto-optischen Effekt beim doppelten Durchlaufen des Mediums (hin und zurück)?

Lösung

Sei α der Winkel nach einfachem Durchlaufen des Mediums und β nach doppeltem Durchlaufen. Bei nicht induzierter optischer Aktivität ist der Strahl nach dem doppelten Durchlaufen wieder so polarisiert wie vorher $\beta = 0$. Die Drehrichtung hängt bei diesen Medien nicht von der Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls ab. Dadurch dreht sich der Strahl beim ersten Durchlauf um α und beim Rücklauf um $-\alpha$.

Beim magneto-optischen Effekt hängt die Drehrichtung davon ab, ob der Wellenvektor parallel zum angelegten Magnetfeld verläuft. Das Licht wird dadurch doppelt so weit gedreht wie beim einfachen Durchlauf $\beta = 2\alpha$.

6.34 Gase, Flüssigkeiten und kubische Kristalle als optische Medien

Bei Gasen, Flüssigkeiten und kubischen Kristallen ist ϵ ein Skalar und die Lichtausbreitung ist unabhängig von der Richtung. Wie bezeichnet man in diesem Fall das optische Medium?

Lösung

Es handelt sich um ein optisch isotropes Medium.

6.35 Superposition rechts- und linkszirkular polarisierte Welle

Wenn man eine rechts- und eine linkszirkular polarisierte Welle superpositioniert (alle anderen Parameter der Wellen sind gleich), wie ist die resultierende Welle polarisiert?

Lösung

Wenn man eine rechts- und eine linkszirkular polarisierte Welle superpositioniert, erhält man eine linear polarisierte Welle.

6.36 Änderung Drehsinn zirkular-polarisierte Welle

Womit kann der Drehsinn einer zirkular-polarisierten Welle umgekehrt werden?

Lösung

Mit einem $\lambda/2$ -Plättchen

6.37 Energiestromdichten linear und zirkular polarisiertes Licht

Wie unterscheiden sich die Energiestromdichten von linear und zirkular polarisiertem Licht?

Lösung

Linear polarisiert: Die Energiestromdichte oszilliert

Zirkular polarisiert: Die Energiestromdichte ist konstant

7 Doppelbrechung

7.1 Außerordentlicher und ordentlicher Strahl

Wie sind außerordentlicher und ordentlicher Strahl in optisch einachsigen Medien definiert?

Lösung

ordentlich: Anteil des einfallenden Strahls, senkrecht zum Hauptschnitt (Ebene, die von optischer Achse und Ausbreitungsrichtung des einfallenden Strahls aufgespannt wird) steht

außerordentlich: Anteil des E-Feldes, das im Hauptschnitt schwingt

7.2 Außerordentlicher und ordentlicher Strahl 2

Wie unterscheiden sich ordentliche und außerordentliche Strahlen bezüglich der Richtungen der \vec{k} - und \vec{S} -Vektoren zueinander?

Lösung

Für den ordentlichen Strahl gilt $\vec{k} \parallel \vec{S}$, bei dem außerordentlichen Strahl sind \vec{k} und \vec{S} nicht parallel.

7.3 Außerordentlicher und ordentlicher Strahl 3

Was ist der Unterschied zwischen einem ordentlichen und außerordentlichen Strahl im anisotropen Medium?

Lösung

Der ordentliche ist senkrecht zur optischen Achse polarisiert. Der außerordentliche Strahl ist parallel zur optischen Achse polarisiert.

7.4 Doppelbrechung Kristall

In welcher Art von Kristallen tritt Doppelbrechung auf?

Lösung

Anisotrope Kristalle. Kristalle mit unterschiedlichen Brechungsindizes entlang verschiedenen Kristallachsen.

7.5 Sichtbarmachen von Spannungen

Wie kann man mit Hilfe von Optik Spannungen in einem Werkstück sichtbar machen (physikalischer Effekt und verwendetes Licht)?

Lösung

Spannungsinduzierte Doppelbrechung, polarisiertes Licht

7.6 Experimenteller Hinweis auf Doppelbrechung

Woran erkennt man Doppelbrechung im Allgemeinen experimentell und was ist der Grund dahinter?

Lösung

Ein Lichtstrahl, der ein optisch anisotropes Medium durchläuft, spaltet im Allgemeinen in einen ordentlichen und einen außerordentlichen Strahl auf. Dies geschieht aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes entlang der verschiedenen Achsen des Kristalls.

7.7 Doppelbrechung induzieren

Durch welchen Effekt kann Doppelbrechung induziert werden?

Lösung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein zunächst isotropes Medium durch äußere Einflüsse anisotrop zu machen, also eine Doppelbrechung zu induzieren:

- Elektrische Felder (Kerr-Effekt)
- Magnetische Felder
- Mechanische Spannung im Material

Teil IV

Geometrische Optik

8 Geometrische Optik Allgemein

8.1 Grundannahmen der geometrischen Optik

Was sind die Grundannahmen der geometrischen Optik für Lichtstrahlen?

Lösung

- (a) In einem homogenen Medium breiten sich Lichtstrahlen geradlinig aus
- (b) An der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 wird der Lichtstrahl gemäß des Snellius'schen Brechungsgesetzes gebrochen und gemäß des Reflexionsgesetzes reflektiert.
- (c) Mehrere Lichtstrahlen, die sich durchdringen, beeinflussen sich nicht.

8.2 Lichtbündelnäherung

Wann ist in der geometrischen Optik die Näherung des Lichtbündels erlaubt?

Lösung

Die Näherung ist erlaubt, wenn der Querschnitt des Lichtbündels viel größer ist als die Wellenlänge des Lichts im Lichtbündel.

8.3 Eigenschaften Lichtbündel

Nennen Sie zwei physikalische Größen, die einem Lichtbündel zugeordnet werden können.

Lösung

Es können die folgenden Größen zugeordnet werden:

- Querschnitt
- Wellenlänge λ
- Ausbreitungsrichtung
- Ausbreitungsgeschwindigkeit $c' = \frac{c}{n}$
- Intensität $I = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 \cdot E^2$
- Polarisation

8.4 Entspanntes Sehen

Bei welchem Abstand eines Objektes fokussiert das Auge entspannt?

Lösung

Das Objekt muss 25 cm vom Auge entfernt sein.

8.5 Sichtbarmachen virtueller Bilder

Wie können virtuelle Bilder sichtbar gemacht werden?

Lösung

Man benötigt eine zusätzliche Bildverarbeitung, z.B. das Auge. Direkt am Schirm ist dies nicht möglich.

8.6 Reales und virtuelles Bild in Sammellinse

Man beobachtet eine Katze durch eine Sammellinse. Unter welchen Umständen (wenn überhaupt) ist das Bild ihrer Nase virtuell und das Bild des Schwanzes reell?

Lösung

Steht der Körper der Katze im Brennpunkt, befindet sich die Nase vor dem Brennpunkt und das Bild der Nase ist virtuell, während sich der Schwanz hinter dem Brennpunkt befindet und das Bild damit reell ist.

8.7 Kurzsichtigkeit und Weitsichtigkeit

Ein Kurzsichtiger und ein Weitsichtiger stranden auf einer Insel. Wer von ihnen kann mit seiner Brille am ehesten Feuer entfachen?

Lösung

Der Weitsichtige, da er eine bikonvexe Linse als Brillengläser trägt und somit über eine Sammellinse verfügt, mit dieser die Strahlen der Sonne im Brennpunkt bündeln kann und somit ausreichende Intensität zum entzünden leicht entzündlicher Materialien "erzeugen" kann.

8.8 Brechungsindex Linse

Betrachten Sie eine Linse mit dem Brechungsindex 1.2, die sich in Wasser mit dem Brechungsindex $n_W = 1.33$ befindet. Welche Form muss die Linse haben, damit sie als Sammellinse funktioniert?

Lösung

Anders als beim Übergang in ein optisch dünneres Medium muss die Linse in diesem Fall bikonkav sein, um eine Sammellinse zu sein.

8.9 Fermatsches Prinzip

Das Fermatsche Prinzip besagt, dass Licht den zeitlich extremalen Weg wählt. Warum ist dies äquivalent zum optisch extremalen Weg?

Lösung

Die optische Weglänge von A nach B ist durch $l_{opt} = \int_{A_\gamma}^B n(\vec{x}) ds$ gegeben und mit $\frac{ds}{dt} = \frac{c}{n}$ folgt die Gleichheit zur extremalen Laufzeit des Lichts $l_{opt} = \int_{t_A}^{t_B} c dt = c(t_B - t_A)$.

8.10 Linsenfehler

Nennen Sie zwei Linsenfehler.

Lösung

- monochromatische Aberration
- sphärische Aberration
- Astigmatismus
- Koma
- Bildfeldwölbung
- Verzerrung/Verzeichnung
- chromatische Aberration
- Tonnenverzerrung, Kofferverzerrung

8.11 Reduzierung sphärische Aberration

Nennen Sie zwei Möglichkeiten, sphärische Aberration zu verringern.

Lösung

Beispiele:

- Verwendung einer Plan-Konvex-Linse mit konvexer Seite dem Strahlenbündel zugewandt
- Verwendung von asphärisch geschliffenen Linsen
- Kombination von Sammell- und Zerstreuungslinsen
- Einsatz von Blenden

8.12 Sphärische Aberration

Was versteht man unter sphärischer Aberration?

Lösung

Bei sphärischen Linsen hängt der Abstand des Brennpunktes vom Abstand der Strahlen von der Achse ab: $f = f(h)$. Randnahe Strahlen werden stärker gebrochen, als (paraxiale) Strahlen nahe der Achse.

8.13 Chromatische Aberration

Was versteht man unter chromatischer Aberration?

Lösung

Der Brechungsindex n hängt von der Wellenlänge ab, wobei blaues Licht stärker gebrochen wird, als rotes. Die unterschiedlichen Wellenlängen bilden also nicht im gleichen Punkt ab.

8.14 Chromatische Aberration Spiegel

Warum kommt es bei einem Spiegel (Reflexion) zu keiner chromatischen Aberration?

Lösung

Da dieser Abbildungsfehler von der Dispersion (Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge) herrührt und bei Spiegeln f unabhängig von n ist.

8.15 Linsenfehler und deren Korrektur

Nennen Sie 2 Linsenfehler und sagen Sie kurz wie diese korrigiert werden können.

Lösung

- Durch einen Achromaten werden primär chromatische Aberrationen korrigiert.
- Die sphärische Aberration kann man verringern, wenn man durch eine Blende die achsenfernen Strahlen unterdrückt oder z.B. durch Verwenden einer Plan-Konvex-Linse, wobei die konvexe Seite dem parallel einfallenden Lichtbündel zugewandt ist.
- Koma (Fehler bei schrägem Lichteinfall auf die Linse) lässt sich durch hinreichendes Abblenden der Linse unterdrücken.
- Tonnen-/kissenförmige Verzeichnung kann durch eine Erweiterung der Blendenöffnung verringert werden.
- Astigmatismus kann man korrigieren, indem man Zylinderlinsen mit sphärischen Linsen kombiniert. Dies kann z.B. dadurch realisiert werden, dass eine sphärische Linse zusätzlich eine zylindrische Krümmung erhält.

8.16 Definition und Entstehung sphärische Aberration (ähnlich zu 8.12)

Was ist eine sphärische Aberration und wie entsteht sie?

Lösung

Sphärische Aberration bedeutet, dass nicht alle parallelen Strahlen im Brennpunkt gebündelt werden. Achsenferne Strahlen werden bei sphärischen und elliptischen Flächen anders abgelenkt.

8.17 Astigmatismus in Augenmedizin

In der Augenmedizin wird Astigmatismus auch als Stabsichtigkeit bezeichnet. Wodurch kommt diese Bezeichnung zustande?

Lösung

Durch diesen Linsenfehler wird ein punktförmiger Gegenstand stabförmig (im Auge) abgebildet.

8.18 Weitsichtigkeit Bewegung Auge

Welche Bewegung kann die Linse des Auges bei Weitsichtigkeit schlecht machen?

Lösung

Die Linse kann sich nicht mehr so stark zusammenziehen und nicht mehr so stark brechen.

8.19 Problem Weitsichtigkeit

Welches Problem liegt bei Weitsichtigkeit vor und wie kann es behoben werden?

Lösung

Bei Weitsichtigkeit liegt der Brennpunkt des optischen Systems des Auges hinter der Retina. Dieses Problem lässt sich durch eine Sammellinse beheben.

8.20 Linse bei Kurzsichtigkeit

Was für eine Linse benötigt die Brille eines Kurzsichtigen?

Lösung

Eine Zerstreuungslinse (konkav)

8.21 Dünne Linsen

Ab wann spricht man von einer dünnen Linse?

Lösung

Wenn der Abstand d der beiden Grenzflächen viel kleiner als g oder b ist.

8.22 Aperturblende

Was ist die Aperturblende?

Lösung

Die Aperturblende ist die Blende, die die Bildhelligkeit, also den Öffnungswinkel des eintretenden Lichtkegels bestimmt.

8.23 Tiefenschärfe

Was versteht man unter Tiefenschärfe und welchen Einfluss hat die Größe der Blendenöffnung auf diese?

Lösung

Tiefenschärfe beschreibt die Größe des Bereichs, innerhalb dessen ein Objekt noch scharf abgebildet werden kann. Je kleiner die Blendenöffnung, desto größer ist die Tiefenschärfe.

8.24 Virtuelles Bild Sammellinse

Unter welchen Umständen erzeugt eine Sammellinse ein virtuelles Bild?

Lösung

Die Sammellinse erzeugt ein virtuelles Bild, wenn der Abstand des Gegenstands g zur Linse kleiner gewählt wird als die Brennweite f der Linse.

8.25 Fermatsches Prinzip 2

Nennen Sie zwei Folgerungen aus dem Fermatschen Prinzip.

Lösung

Strahlengang muss umkehrbar sein, Reflexionsgesetz, Snellius Gesetz, geradlinige Ausbreitung des Lichtes.

8.26 Vernachlässigung in der geometrischen Optik

Welcher Effekt wird in der geometrischen Optik vernachlässigt aufgrund der Annahme, dass die Strahldicke viel größer als λ ist?

Lösung

Beugung (bzw. Interferenz)

8.27 Verzerktes Bild Blende

Vor eine Linse wird eine Blende gesetzt. Wie wird die Abbildung verzerrt?

Lösung

Die Abbildung wird tonnenförmig verzerrt. (Alternativ: Linse \rightarrow Blende: Kissenförmig)

8.28 Definition virtuelle Abbildung

Was definiert eine virtuelle Abbildung?

Lösung

- Abbildendes Instrument liegt zwischen Bildpunkt P' und Beobachter
- Lichtstrahlen schneiden sich nicht im Bildpunkt
- Bild kann nicht mit Schirm aufgefangen werden

8.29 Definition reelle Abbildung

Was definiert eine reelle Abbildung?

Lösung

- Abbildendes Instrument ist nicht zwischen Bildpunkt P' und Beobachter
- Lichtstrahlen schneiden sich im Bildpunkt
- Bild kann mit Schirm aufgefangen werden

8.30 Sehwinkel

Wodurch ist der Sehwinkel ϵ begrenzt?

Lösung

Durch Beugung an der Pupille und durch den Abstand der Rezeptoren auf der Netzhaut.

8.31 Kontinuierliche Vergrößerung der Gegenstandsweite Sammellinse

Gegeben sei eine Sammellinse, vor der ein Gegenstand G mit der Brennweite f und der Gegenstandsweite $g = f + \delta x$ steht. Die Gegenstandsweite wird nun kontinuierlich vergrößert. Wie ändert sich die Bildweite? Warum?

Lösung

Die Bildweite wird kleiner.

Erklärung: Der Brennstrahl durch den bildseitigen Brennpunkt bleibt konstant, während der Mittelpunktstrahl mit zunehmender Gegenstandsweite einen immer kleiner werdenden Winkel mit der optischen Achse einschließt und so der Bildpunkt längs der optischen Achse zum bildseitigen Brennpunkt hinwandert.

8.32 Unscharfe Abbildung durch Linse

Ein durch eine Linse abgebildeter (einfarbiger) Gegenstand erscheint unscharf auf dem Schirm. Woran kann dies liegen (Eine Möglichkeit angeben)?

Lösung

- Die vom Objekt ausgehenden Lichtstrahlen gehen auch durch Randbereiche der Linse und werden dort stärker gebrochen als achsennahe Strahlen, wodurch verschiedene Brennpunkte (je nach Abstand des Lichtstrahls zur Linsenachse) entstehen.
- Die Strahlen treffen schräg (nicht parallel zur Linsenachse) auf die Linse und werden abhängig von ihrem Eintrittswinkel unterschiedlich gebrochen, wodurch kein Brennpunkt zu finden ist.
- Der Schirm ist nicht im Brennpunkt.

8.33 Brennpunkt, Brennweite und Brennebene

Erklären Sie die Begriffe Brennpunkt, Brennweite und Brennebene.

Lösung

Der Brennpunkt ist jener Punkt, in dem sich parallel zur optischen Achse einfallende Strahlen schneiden. Er befindet sich im Abstand der Brennweite auf der optischen Achse. Die im Brennpunkt zur Achse senkrechte Ebene heißt Brennebene.

8.34 Lateralvergrößerung

Was ist Lateralvergrößerung?

Lösung

Die Lateralvergrößerung ist das Verhältnis zwischen Bilddurchmesser und Objektdurchmesser.

8.35 Abbildung durch Sammellinse

Ein Gegenstand steht zwischen dem Brennpunkt und der Mitte einer Sammellinse. Was kann man über das Bild sagen?

Lösung

Virtuell, aufrecht und vergrößert.

8.36 Pointillistische Gemälde

Welche physikalische Erscheinung tritt bei pointillistischen Gemälden auf?

Lösung

Pointillistische Gemälde bestehen aus Punkten reiner Farbe, wobei diese Farben ab einem bestimmten Abstand zum Gemälde im Auge des Betrachters nicht mehr auflösbar sind, sie vermischen sich. Grund ist das beugungslimitierte Auflösungsvermögen des Auges.

8.37 Parabolspiegel vs. Kugelspiegel

Welchen Vorteil bietet ein Parabolspiegel gegenüber einem Kugelspiegel?

Lösung

Bei sphärischen Spiegeln schneiden sich nur die achsennahen Strahlen exakt im Brennpunkt. Bei einem Parabolspiegel durchlaufen auch die achsenfernen Strahlen den Brennpunkt.

8.38 Bild mit Blende

Warum ist ein Bild mit Blende schärfer als ohne?

Lösung

Weil achsenferne Strahlen nicht am Bildschirm auftreffen.

8.39 Fermatsches Prinzip 3 (ähnlich zu 8.9)

Was besagt das Fermatsche Prinzip?

Lösung

Die Lichtausbreitung erfolgt so, dass der optische Weg auf dem tatsächlich benutzten Pfad s_0 gegenüber den benachbarten Pfaden s_i einen Extremwert besitzt.

Alternativ: Das Fermatsche Prinzip sagt, dass Licht zwischen zwei Punkten den optischen Weg nimmt, auf dem seine Laufzeit bei kleinsten Variationen des Weges stationär ist und deshalb der Weg extremal wird.

8.40 Reelle Abbildung mit konkaver Linse

Kann man mit einer konkaven Linse an Luft eine reelle Abbildung erzeugen?

Lösung

Nein. Das Bild ist virtuell. (Außer die Linse hätte einen kleineren Brechungsindex als die Umgebung, was an Luft bzw. Vakuum aber nicht eintritt)

8.41 Definition optischer Weg

Was versteht man unter “optischer Weg”?

Lösung

Der optische Weg ist die Streckenlänge, für die Licht im Vakuum die gleiche Zeit benötigt wie für einen gegebenen Weg in einem Medium mit Brechungsindex.

8.42 Paralleles Strahlenbündel aus Punktlichtquelle

Nennen Sie zwei Möglichkeiten, wie Sie aus einer Punktlichtquelle ein paralleles Strahlenbündel machen können.

Lösung

Parabolspiegel, Konvexe Linse, weit von der Lichtquelle entfernt sein.

8.43 Punkt mit Schweif

Bei einem Experiment fällt ein Lichtstrahl durch eine Linse auf einen Schirm. Auf diesem ist ein Punkt mit einem Schweif abgebildet. Welcher Effekt liegt vor und wie kann man diesem entgegenwirken?

Lösung

Es liegt ein Koma-Fehler vor. Dieser kann behoben werden, indem man die Linse hinreichend abblendet oder den Einfallswinkel verringert.

8.44 Linsenabbildung

Welche Aussage kann man über das Bild einer Linsenabbildung machen, wenn die transversale Vergrößerung mit $\nu_t = -1/3$ angegeben ist?

Lösung

Das Bild steht auf dem Kopf und die Bildgröße entspricht einem Drittel der Gegenstandsgröße.

8.45 Linsensystem

Ein Linsensystem hat einen Vergrößerungsfaktor von 0,25. Ein Gegenstand wird um 8 cm senkrecht zur optischen Achse verschoben. Wie weit bewegt sich das Bild?

Lösung

2 cm.

8.46 Position Gegenstand Linse

Wo müssen Sie einen Gegenstand relativ zu einer Linse positionieren, damit Brenn- und Bildweite annähernd zusammenfallen?

Lösung

Sehr weit weg, möglichst ins Unendliche.

8.47 Superpositionsgesetz Lichtstrahlen

Was besagt das Superpositionsgesetz für Lichtstrahlen?

Lösung

Lichtstrahlen können sich gegenseitig durchdringen, ohne sich zu beeinflussen.

8.48 Definition Gegenstandsweite und Bildweite

Was ist die Gegenstandsweite? Was ist die Bildweite?

Lösung

Die Gegenstandsweite beschreibt den Abstand zwischen dem abzubildenden Objekt und dem optischen System. Die Bildweite ist die Entfernung des erzeugten Bildes zum optischen System.

8.49 Spiegelhöhe

Eine 1,80 m große Person möchte ihr gesamtes Bild in einem senkrecht stehenden ebenen Spiegel sehen. Wie hoch muss der Spiegel mindestens sein?

Lösung

Der Spiegel muss mindestens halb so hoch sein wie die Person, also 90 cm.

9 Prismen

9.1 Strahlengang monochromatisches Licht

Das monochromatische Licht einer Quelle im Punkt A erreicht B. Das Licht passiert dabei ein Prisma. In welche Richtung muss man von B aus den selben monochromatischen Lichtstrahl aussenden, damit dieser durch den Punkt A geht?

Lösung

In die entgegengesetzte Richtung: Der Lichtweg ist umkehrbar. Das bedeutet, dass jeder Strahlengang auch dann allen optischen Gesetzen genügen würde, wenn man die Ausbreitungsrichtung des Lichts umkehren würde.

9.2 Weißes Licht fällt auf Prisma

Weißes Licht fällt auf ein Prisma. Welcher Farbe entspricht die größte bzw. die kleinste Ablenkung?

Lösung

Da der reelle Brechungsindex bei normaler Dispersion mit steigender Wellenlänge abfällt, wird rotes Licht schwächer gebrochen als blaues und hat somit einen kleineren Ablenkwinkel, da die Wellenlänge von rotem Licht größer ist, als die von blauem.

10 Matrixmethode

10.1 Translation

Die Transformationsmatrix

$$T = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

beschreibt eine Translation eines einfallenden Lichtstrahls, der sich um $d > 0$ nach rechts bewegt. Wie ändert sich diese, wenn sich der Lichtstrahl nach links bewegt?

Lösung

Die Matrix

$$T = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

mit $d > 0$ bleibt gleich.

10.2 Linsenmatrix

Interpretieren Sie die Einträge m_{11} und m_{22} in der Linsenmatrix M für den Vektor $(y/n\alpha)$.

Lösung

Bei m_{11} handelt es sich um die transversale Vergrößerung V_T und für den zweiten Diagonaleintrag gilt $m_{22} = \frac{n_2}{n_1} V_W$ mit V_W der Winkelvergrößerung.

11 Optische Instrumente

11.1 Lupe

Wodurch kommt es bei einer Lupe zu der Vergrößerung des Bildes?

Lösung

Die Vergrößerung kommt durch eine Vergrößerung des Seh winkels zustande. Durch die Lupe wird dieser von $\varepsilon_0 = \frac{G}{S_0}$ auf $\varepsilon_{Lupe} = \frac{G}{f}$ erhöht, was zu einer Vergrößerung des Bildes um $V_{Lupe} = \frac{S_0}{f}$ führt.

Alternativ: Eine Lupe vergrößert den Seh winkel, da das Objekt auch näher als die 25 cm natürliche Sehweite scharf gestellt werden kann.

11.2 Mikroskop

Beschreiben Sie die Funktionsweise eines Mikroskops.

Lösung

Ein Mikroskop besteht aus zwei Linsen. Die 1. Linse (Objektiv) entwirft ein reelles Zwischenbild in der Brennebene der 2. Linse (Okular), die für das Zwischenbild als Lupe wirkt.

11.3 Vorteil von Spiegeln gegenüber Linsen

Welchen Vorteil haben große Spiegel gegenüber gleich großen Linsen bei Teleskopen?

Lösung

Große Linsen verformen sich unter der eigenen Schwerkraft so stark, dass das Bild unscharf abgebildet wird. Spiegel können an jedem Punkt fixiert werden, sodass sie sich nicht ungewünscht verformen und im Zweifel auch Störungen in der Atmosphäre angepasst werden können.

11.4 Begrenzung Auflösung Mikroskop

Durch welche absolute Grenze ist die Auflösung bei Mikroskopie begrenzt (Formel)?

Lösung

Durch das Abbe-Limit:

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}$$

Teil V

Welleneigenschaften des Lichts

12 Beugung

12.1 Rayleigh-Kriterium

Wann kann man nach dem Rayleigh-Kriterium zwei Quellen noch voneinander unterscheiden?

Lösung

Wenn das 1. Beugungsmaximum von Quelle 1 auf das 1. Beugungsminimum von Quelle 2 fällt.

12.2 Komplementäre Beugungsöffnungen

Wann bezeichnet man zwei Beugungsöffnungen als komplementär?

Lösung

Zwei Beugungsöffnungen heißen komplementär, wenn eine Öffnung auf die Fläche A_1 Licht absorbiert und die andere Öffnung Licht auf Fläche $A_2 = A_1$ durchlässt.

12.3 Fresnel-Beugung und Fraunhofer-Beugung

Welche Beziehung hat die Fresnel-Beugung zur Fraunhofer-Beugung?

Lösung

Der allgemeinere Fall der Fresnel-Beugung (quadratische Näherung der Phase im Beugungsintegral) geht für große Entfernungen in die Fraunhofer-Beugung über (lineare Näherung). Oder: Die Fresnel-Beugung geht für genügend kleine Blendendurchmesser in die Fraunhofer-Beugung über, da in diesem Fall nur die erste Fresnelzone zur Feldamplitude beiträgt.

12.4 Intensitätsverteilung Beugung am Spalt

Welche Intensitätsverteilung kann man bei der Beugung am Spalt beobachten, wenn die Spaltbreite b kleiner ist als die Wellenlänge? Was passiert, wenn b gegen Null geht?

Lösung

Für $b < \lambda$ gibt es kein Minimum mehr, zentrales Maximum dehnt sich über den gesamten Teilraum hinter dem Spalt aus.

Für $b \rightarrow 0$ ist die Intensität in alle Richtungen gleich der Gesamtintensität des Spaltes und der Spalt wirkt daher wie eine Punktquelle.

12.5 Zusammenhang Blende und Beugungsmuster im Fernfeld

Welchen Zusammenhang gibt es zwischen einer beliebig geformten Blende und ihrem Beugungsbild im Fernfeld?

Lösung

Das Beugungsbild im Fernfeld ist proportional zum Quadrat der Fouriertransformation der Blende.

12.6 Beugungsphänomene aus dem Alltag

Nennen Sie zwei Beugungsphänomene aus dem Alltag.

Lösung

- CD
- Hologramm (Geldschein)
- Stoffe (Gardinen)
- fein gearbeitete Metalloberflächen
- Spinnennetz
- Wasserdampf
- Wasserwellen (Kaimauern etc.)
- Schall (um Ecke hören)

12.7 Beugungsmuster verringerte Spaltbreite

Wie verändert sich das Beugungsmuster, wenn Sie die Spaltbreite verringern?

Lösung

Das Muster wird breiter und die Maxima/Minima wandern nach außen.

Alternativ: Das Beugungsbild lebt im reziproken Raum. Das bedeutet, dass ein verkleinerter Spalt zu größeren Abständen und breiteren Maxima führt.

12.8 Beugungsbilder bei Nah- und Fernfeldnäherung

Worin unterscheiden sich qualitativ die Beugungsbilder bei Nah- und Fernfeldnäherung des Beugungsintegrals?

Lösung

Im Nahfeld sind viele schmale Extrema dicht beieinander. Im Fernfeld dagegen sind die Extrema wenige breit und in größeren Abständen verteilt.

12.9 Fourier-Transformierte Spaltfunktion

Was ist die Fourier-Transformierte der Spaltfunktion (Rechteckfunktion)?

Lösung

$$F(x) = \frac{\sin x}{x}$$

13 Interferenz

13.1 Kohärenz

Erklären sie den Begriff der Kohärenz.

Lösung

In der Optik definiert man die Kohärenz als feste Phasenbeziehung zwischen zwei Wellen.

13.2 Kohärenzlänge

Welche physikalische Bedeutung hat die Kohärenzlänge?

Lösung

Die Kohärenzlänge beschreibt die Strecke bis zu der von einer Quelle ausgesandte Wellenzüge im Mittel eine feste Phasenbeziehung untereinander haben.

13.3 Räumliche Kohärenz

Wann werden zwei Teilwellen räumlich kohärent genannt?

Lösung

Zwei Teilwellen heißen “räumlich kohärent”, wenn sich ihre räumliche Phasendifferenz über eine Beobachtungszeit t um weniger als 2π ändert.

13.4 “Dicke” Schichten

Warum kann man bei “dicken” Schichten keine Interferenzfarben bei Reflexion mehr beobachten?

Lösung

Die Phasendifferenz der beiden reflektierten Teilwellen muss konstant sein, was bedingt, dass die doppelte Schichtdicke kleiner als die Kohärenzlänge sein muss.

13.5 Antireflexionsschichten

Was ist das Hauptphänomen welches verwendet wird um Antireflexionsschichten herzustellen?

Lösung

Man versieht die Oberfläche mit einem dielektrischen Material, welches eine destruktive Interferenz hervorruft.

Alternativ: Durch das Aufbringen einer dünnen Schicht wird bei den reflektierten Strahlen der ersten und der zweiten Schicht destruktive Interferenz erzeugt.

13.6 Youngscher Doppelspaltversuch

Welche Art von Kohärenz liegt beim Youngschen Doppelspaltversuch vor?

Lösung

Räumliche Kohärenz, da die Welle mit einer räumlich verschobenen Kopie ihrer selbst interferieren soll.

13.7 Doppelspalt

Wie verhält sich der Abstand zwischen den Maxima des Interferenzmusters am Doppelspalt, wenn der Abstand der beiden Spalte zueinander vergrößert wird?

Lösung

Größerer Spaltabstand führt zum Zusammenrücken der Maxima.

13.8 Doppelspaltexperiment

An einem Doppelspaltexperiment können die Intensitäten $|A + B|^2$ und $|A|^2 + |B|^2$ gemessen werden, wobei A die Amplitude einer Welle für Spalt A und B die Amplitude einer Welle für Spalt B ist. Jetzt wird der Doppelspalt mit Elektronen beschossen. Für welche Intensitätsverteilung wurde detektiert, durch welchen Spalt die Elektronen gekommen sind?

Lösung

Für die Intensität $|A|^2 + |B|^2$ wurde detektiert, durch welchen Spalt die Elektronen gekommen sind.

13.9 Dielektrischer Spiegel

Erklären Sie kurz die Funktionsweise eines dielektrischen Spiegels.

Lösung

Eine elektromagnetische Welle trifft auf eine Oberfläche, die aus mehreren, parallelen Schichten aus abwechselndem Material mit hohem und niedrigem Brechungsindex besteht. Diese sind so angeordnet, dass die an ihnen reflektierten Wellen konstruktiv interferieren.

13.10 Michelson-Morley-Experiment

Was war das zentrale Ergebnis des Michelson-Morley-Experiments?

Lösung

Dass die Lichtgeschwindigkeit für alle Richtungen gleich und unabhängig von der relativen Geschwindigkeit der Lichtquelle zum Beobachters ist.

13.11 Seifenblasen

Warum schillern Seifenblasen bunt?

Lösung

Die Dicke der Seifenhaut bestimmt spezifische Wellenlängen, die konstruktiv oder destruktiv interferieren. Dadurch werden bestimmte Farben verstärkt oder geschwächt.

13.12 Ölschicht auf Wasser

Ich stehe auf einer Ölschicht auf Wasser und sehe farbige Ringe um mich herum. Die Ölschicht verdampft langsam und wird dünner. Dann wandern die Ringe nach...? Und warum?

Lösung

Die Ringe wandern nach innen. Die Anzahl der Maxima nimmt ab, weil die dünner werdende Ölschicht nicht mehr so viele Winkel zulässt unter denen ganzzahlige Wellenlängenunterschiede möglich sind.

13.13 Eigenschaften von Licht - Interferenz

Welche Eigenschaften muss das Licht erfüllen, damit Interferenz auftritt (z.B. an einem Doppelspalt)?

Lösung

Zeitliche bzw. räumliche Kohärenz.

13.14 Entspiegelung von Oberflächen

Wie entspiegelt man Oberflächen (z.B. Brillen)? Geben Sie den physikalischen Effekt und die Eigenschaft des Materials an.

Lösung

Antireflexbeschichtung. Der Brechungsindex der Beschichtung muss sich zwischen den beiden begrenzenden Schichten befinden. Die Dicke wird so gewählt, dass destruktive Interferenz auftritt.

13.15 Fresnelsche Zonenplatte

Wie ist eine Fresnelsche Zonenplatte aufgebaut und auf welchem Prinzip beruht sie (ein Wort)?

Lösung

Eine Fresnelsche Zonenplatte verdunkelt ringförmig bestimmte Segmente eines Kreises. Sie funktioniert mittels konstruktiver Interferenz.

13.16 Beugung vs. Interferenz

Was ist der Unterschied zwischen Beugung und Interferenz?

Lösung

Interferenz bezeichnet die phasenstarre Überlagerung einer oder mehrerer Punktquellen, während Beugung die Überlagerung kontinuierlich verteilter Sender bezeichnet.

13.17 Bedingung für konstruktive Interferenz

Welche Bedingung ist bei konstruktiver Interferenz erfüllt?

Lösung

$$\Delta\phi = 2\pi n$$

wobei n eine ganze Zahl ist.

13.18 Planparallele Platte als Spektralfilter

Warum wirkt eine planparallele Platte wie ein Spektralfilter?

Lösung

Bei senkrechtem Lichteinfall werden auf Grund konstruktiver und destruktiver Interferenz nur bestimmte Wellenlängenbereiche durchgelassen.

13.19 Interferenz vs. Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (mathematisch)

Worin liegt der mathematische Unterschied zwischen Interferenz und einfacher Überlagerung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen?

Lösung

Bei der Überlagerung werden einfach die Verteilungen addiert:

$$I_U = I_1 + I_2 = |A_1|^2 + |A_2|^2$$

Bei der Interferenz werden die Amplituden addiert und dann der Betrag der Summe quadriert:

$$I_{Int} = |A + B|^2$$

13.20 Beugungseffekte im Alltag

Warum nehmen wir im Alltag keine Beugungseffekte bei Objekten wahr, obwohl diese Welleneigenschaften besitzen?

Lösung

Weil die Wellenlänge dieser Objekte oft viel kleiner ist als die typische Größenordnung eines Atoms. Beugung geschieht nur Objekten gleicher Größenordnung wie die Wellenlänge.

13.21 Winkel Hauptmaxima Doppelspalt

Bei welchen Winkeln liegen die Hauptmaxima eines Doppelspalts mit Spaltabstand a , wenn der Schirm in sehr großem Abstand d entfernt steht?

Lösung

Es gilt die Kleinwinkelnäherung:

$$\frac{x}{d} = \tan \alpha = \alpha = n \frac{\lambda}{a}$$

14 Gitter

14.1 Chamäleon

Ein Chamäleon ändert seine Farbe, indem es den Abstand zwischen den Netzebenen in seiner Haut verändert. Wie kommen die verschiedenen Farben dabei zustande?

Lösung

An den Gitterebenen findet Bragg-Reflexion statt. Durch die Veränderung des Abstandes zwischen den Schichten ändert sich der Gangunterschied der beiden einfallenden Strahlen. Weil der Einfallswinkel aber gleich bleibt, ändert sich die Wellenlänge, welche konstruktiv interferieren kann.

14.2 Interferenzmuster Gitter

Was passiert mit dem Interferenzmuster, wenn man die Spaltanzahl des Gitters erhöht?

Lösung

Es gibt immer mehr Nebenmaxima zwischen zwei Hauptmaxima, die aber mit steigender Spaltanzahl immer kleiner werden. Hauptmaxima werden schmaler.

14.3 Interferenzmuster Gitter 2

Betrachten Sie ein Gitter. Wie hängt die Wellenlänge des Lichts mit dem Abstand der Maxima zueinander zusammen?

Lösung

Je größer die Wellenlänge des Lichts, desto größer der Abstand zwischen den Maxima.

14.4 Intensitätsverteilung Beugung am Gitter

Durch welche drei Faktoren ist die Intensitätsverteilung bei Beugung am Gitter bestimmt?

Lösung

Sie ist bestimmt durch die Interferenz der Lichtbündel der verschiedenen Spalte und durch Beugung an jedem Spalt. Also durch die 1. Anzahl der Spalte 2. deren Abstand und 3. deren Breite.

14.5 Doppelspalt vs. Gitter

Wie verändert sich die Intensitätsverteilung wenn man anstatt eines Doppelspalts ein Gitter verwendet?

Lösung

Beim Doppelspalt erhält man durch Interferenz der beiden Spalte eine Verteilung von (Haupt-) Maxima. Beim Gitter entstehen zusätzlich zu den Hauptmaxima (Interferenz eines Spaltes mit seinem benachbarten) weitere Nebenmaxima (durch paarweise Interferenz der verschiedenen Spalte untereinander).

14.6 Intensitätsverlauf gebeugtes Licht an Gitter

Im Intensitätsverlauf von gebeugtem Licht an einem Gitter befinden sich zwischen zwei Hauptmaxima fünf Nebenmaxima. Wie viele Spalte weist das verwendete Gitter auf?

Lösung

Sieben (da zwei Hauptmaxima plus fünf Nebenmaxima)

Teil VI

Quantenphänomene

15 Quanten

15.1 Photonen

Photonen sind Lichtteilchen. Diese müssen eine Bedingung für ihre Masse besitzen. Was folgt aus dieser Bedingung für den Impuls des Photons?

Lösung

Für die Ruhemasse des Photons muss $m_0 = 0$ gelten. Damit folgt aus der Impuls-Energiebeziehung, dass $p = \frac{E}{c}$ ist.

15.2 Photonen 2

Welche Ruhemasse hat ein Photon?

Lösung

Photonen haben Ruhemasse 0, es gibt also keine ruhenden Photonen.

15.3 2-Niveau-Laser

Warum funktioniert kein 2-Niveau-Laser?

Lösung

Es bildet sich ein Gleichgewicht zwischen Elektronen auf dem angeregten und dem Grundzustand. Somit kann keine Ladungsinversion erreicht werden.

15.4 Eigenschaften Laser

Welche zwei Eigenschaften zeichnen besonders Laserlicht aus?

Lösung

Monochromatisch, Kohärent, linear polarisiert

15.5 Absorption nach Einstein

Wie lässt sich der Strahlungsübergang "Absorption" nach Einstein erklären?

Lösung

Bei Absorption geht das System von einem energetisch tieferen Zustand mit der Energie E_1 in einen energetisch höheren Zustand E_2 über. Die dazu notwendige Energie $E_2 - E_1$ wird dem Strahlungsfeld entzogen.

15.6 Induzierte Emission

Was versteht man unter induzierter Emission?

Lösung

Der Übergang von einem angeregten Zustand in einen energetisch niedrigeren Zustand wird durch ein resonantes Strahlungsfeld erzwungen. Das elektromagnetische Feld und das Atom schwingen in Phase, das emittierte Photon hat dieselben Eigenschaften wie das äußere Feld.

15.7 Spontane Emission

Was versteht man unter spontaner Emission?

Lösung

Den Übergang von einem angeregten Zustand in einen energetische niedrigeren Zustand durch Wechselwirkung mit dem Vakuumfeld unter Abgabe von Energie. Das Photon hat dabei eine zufällige Phase, Richtung und Polarisation

15.8 Absorption hochenergetischer elektromagnetischen Wellen

Warum werden hochenergetische elektromagnetische Wellen kaum von Materie absorbiert?

Lösung

Weil Materialien kaum so hochenergetische Übergänge haben. Um die Resonanzfrequenz von Materialien zu erhöhen müssten entweder die Bindungen der Elektronen stärker werden ("Feldkonstante erhöhen") oder die Massen geringer. Nur dann können sie auf die Anregung der einfallenden Welle reagieren.

15.9 Voraussetzungen Laser

Was sind die zwei Voraussetzungen innerhalb des Materials für die Funktion eines Lasers?

Lösung

min. 3-Niveau-System, Besetzungsinversion

15.10 Größte Absorption von Licht in Material

Bei welcher Frequenz ist die Absorption von Licht in einem Material am größten?

Lösung

Das globale Maximum der Absorption liegt bei der/den Resonanzfrequenz(en) der Übergänge der jeweiligen Atome.

15.11 Lichtverstärkung Laser

Was ist die Voraussetzung einer Lichtverstärkung im Laser?

Lösung

Die Besetzungszahl des angeregten Zustands N_2 muss größer sein als die des Grundzustandes N_1 . Für $N_2 > N_1$ (Besetzungsinversion) kann die Photonenzahl ansteigen und es kommt zur Lichtverstärkung.

16 Comptoneffekt

16.1 Compton-Wellenlänge

Was gibt die Compton-Wellenlänge an?

Lösung

Die Compton-Wellenlänge gibt die Zunahme der Wellenlänge eines gestreuten Photons an (unter einem Winkel von 90°).

16.2 Compton-Streuung vs. Rayleigh-Streuung

Was ist der Unterschied zwischen Compton-Streuung und Rayleigh-Streuung und wann kommt es zu Rayleigh-Streuung?

Lösung

Während die Compton-Streuung ein inkohärenter Prozess ist, bei dem sich die Wellenlänge des Photons ändert, ist die Rayleigh-Streuung ein kohärenter Prozess und lässt die Wellenlänge des Photons unverändert. Zur Rayleigh-Streuung kommt es, wenn der Energieübertrag kleiner ist, als die Bindungsenergie der Elektronen im Atom.

16.3 Erhaltungssätze Compton-Streuung

Welche sind die Erhaltungssätze die für die Compton-Streuung nötig sind?

Lösung

Die Energieerhaltung und die Impulserhaltung sind für die Streuung nötig.

16.4 Compton-Wellenlänge Elektron

Wie groß ist die Compton-Wellenlänge eines Elektrons?

Lösung

Die Compton-Wellenlänge beträgt $\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.

16.5 Definition Compton-Effekt

Was ist der Compton-Effekt?

Lösung

Bei einem Stoß eines Photons gegen ein als ruhend betrachtetes Elektron überträgt das Photon einen Teil seiner Energie auf das Elektron. Diesem Energieverlust entspricht eine Abnahme der Frequenz bzw. eine Zunahme der Wellenlänge.

16.6 Winkel mit größter Energieübertragung

Bei welchem Winkel wird bei der Compton-Streuung am meisten Energie übertragen?

Lösung

Bei der Rückstreuung, also 180° .

17 Photoeffekt

17.1 Unterschied Laser und Photoeffekt

Was ist der Unterschied zwischen Laser und Photoeffekt bezüglich der benötigten Photonenenergie?

Lösung

Beim Photoeffekt muss das Photon eine Mindestenergie haben, damit überhaupt Elektronen herausgelöst werden, höhere Energien sorgen nur für eine größere Geschwindigkeit des Elektrons, der Photoeffekt findet aber trotzdem statt. Beim Laser muss die Energie des Photons genau der Differenzenergie zwischen zwei Energieniveaus entsprechen, damit ein Übergang stattfinden kann. (Minimale Energieabweichungen sind möglich, weil Energieniveaus wegen Unschärferelation eher Bänder sind.)

17.2 Inverser Photoeffekt

Was passiert beim inversen Photoeffekt?

Lösung

Wenn Elektronen auf ein Material treffen und abgebremst werden, strahlen sie elektromagnetische Wellen ab, die nach dem Quantenbild quantisiert sind. Deshalb erzeugen die Elektronen beim Auftreffen auf die Anode Photonen bestimmter Energien. Zusätzlich wird noch eine materialspezifische, charakteristische Röntgenstrahlung erzeugt)

17.3 Photostrom

Nennen Sie zwei Eigenschaften bezüglich des Photostroms und dessen Kreisfrequenz.

Lösung

- ω_0 ist materialabhängig
- ω_0 ist unabhängig von der Intensität des Lichtes

- Der Photostrom setzt erst bei bestimmter Schwellfrequenz ω_0 ein.

17.4 Geschwindigkeitsverteilung Photoeffekt

Bei dem Photoelektrischen Effekt ist die Geschwindigkeitsverteilung abhängig von welcher Größe des einkommenden Lichts?

Lösung

Die Geschwindigkeitsverteilung ist nicht von der Lichtintensität, sondern von der Frequenz abhängig.

17.5 Photostrom 2 (ähnlich zu 17.3)

Wie hängt der Photostrom mit der Frequenz und Intensität des eingestrahlt Lichts zusammen?

Lösung

Nur ab der Grenzfrequenz kommt es zu einem Photostrom. Die Intensität erhöht den Photostrom, wenn die Grenzfrequenz erreicht ist.

17.6 Entladung eines Gegenstandes

Warum entlädt sich ein negativ geladener Gegenstand, wenn man Licht (mit genügend hoher Energie) auf ihn strahlt, aber nicht ein positiv geladener?

Lösung

Der Photoeffekt kann nur Elektronen (negativ) aus dem Gegenstand lösen. Deshalb entlädt sich ein negativ geladener, aber nicht ein positiv geladener.

17.7 Proportionalitätskonstante Photoeffekt

Was ist die Proportionalitätskonstante zwischen Frequenz und Energie beim Photoeffekt?

Lösung

Das Plancksche Wirkungsquantum h .

17.8 Beschreibung Photoeffekt

Beschreiben Sie kurz den Photoeffekt.

Lösung

Monochromatisches Licht fällt auf eine Metallplatte und löst Elektronen, bei denen die Bindungsenergie A kleiner ist als die Energie des Lichts, aus dem Metall. Der Rest der Energie wird in die kinetische Energie T der Elektronen umgewandelt:

$$T + A = E_{\text{Photon}} = h \cdot \nu$$

17.9 Einsteins Erklärung

Was war die entscheidende Idee, die Einsteins Erklärung des Photoeffekts von vorherigen Erklärungsversuchen unterschieden hat?

Lösung

Einstein ging davon aus, dass die Energie des Lichts nur portionsweise (quantisiert) aufgenommen werden kann. Licht besteht somit aus Lichtquanten (Photonen). Dadurch konnte er erklären, wieso das Einsetzen des Photostroms zwar von der Frequenz des Lichts, nicht aber von dessen Intensität abhängt.

17.10 Innerer vs. äußerer Photoeffekt

Was unterscheidet den inneren vom äußeren Photoeffekt?

Lösung

Beim äußeren Photoeffekt werden Elektronen durch Photonen aus Metallen oder Halbleitern herausgelöst. Der innere Photoeffekt findet in Halbleitern statt. Hierbei kommt es zu der Erzeugung eines Elektronen-Loch-Paares innerhalb des Halbleiters.

18 Schwarzkörperstrahlung

18.1 Sternfarben

Warum gibt es rote Sterne, blaue Sterne, aber keine grünen Sterne?

Lösung

Die Veränderung der Farbe der Sterne wird durch die Lage des Maximums der Schwarzkörperstrahlung bestimmt. Bei roten und blauen Sternen liegt ein guter Teil der Strahlungsverteilung im nicht-sichtbaren Bereich des Spektrums (Infrarot- bzw. Ultraviolettbereich) deshalb ist der übrige Teil hauptsächlich rot bzw. blau. "Grüne Sterne" mit ihrem Maximum bei grün haben ihre Strahlungsverteilung im gesamten sichtbaren Spektrum und wirken daher für uns weiß.

Alternativ: Sterne die im grünen oder blauen Bereich das Maximum ihrer Farbtemperatur haben, strahlen auch in den anderen Bereichen stark, so dass sie weiß oder weißblau erscheinen.

18.2 Schwarzer Strahler

Was ist ein "schwarzer Strahler" und wie wird er experimentell realisiert?

Lösung

Ein Schwarzer Strahler absorbiert die gesamte einfallende Strahlungsenergie unabhängig von der Wellenlänge. Er wird realisiert durch einen Hohlraum mit einer extrem kleinen Öffnung. Dadurch gelangen die Strahlen in den Körper, werden absorbiert bzw. reflektiert, gehen aber praktisch nicht mehr nach draußen.

18.3 Farbe und Temperatur von Sternen

Ist ein bläulich leuchtender Stern heißer oder kälter als ein rötlich leuchtender? Warum?

Lösung

Der blau leuchtende Stern ist heißer, da die Wellenlänge des Strahlungsmaximums eines schwarzen Strahlers mit steigender Temperatur abnimmt.

18.4 Plancksches Gesetz

Wohin verschiebt sich das Maximum der emittierten Wellenlängen laut dem Planckschen Gesetz, wenn man die Temperatur erhöht?

Lösung

Das Maximum liegt für höhere Temperatur bei kleineren Wellenlängen.

18.5 Ultraviolett-Katastrophe

Was versteht man unter der “Ultraviolett-Katastrophe”?

Lösung

Der Begriff wird in Zusammenhang mit dem Rayleigh-Jeans-Gesetz genannt, welches die Abhängigkeit eines schwarzen Körpers von der Wellenlänge beschreibt. Dieses liefert bei kleinen Wellenlänge so große Werte, dass die Energie der Gesamtstrahlung gegen unendlich gehen lässt: Die so genannte “Ultraviolett-Katastrophe”.

18.6 Wiensches Verschiebungsgesetz

Was passiert nach dem Wien’schen Verschiebungsgesetz, wenn man die Temperatur variiert?

Lösung

Durch höhere Temperatur verschiebt sich das Maximum der Strahlung zu kürzeren Wellenlängen. Analog verschiebt sich das Maximum der Strahlung zu längeren Wellenlängen bei sinkender Temperatur.

18.7 Thermisches Gleichgewicht

Was versteht man unter thermischen Gleichgewicht?

Lösung

Beim thermischen Gleichgewicht ist die absorbierte Leistung gleich der emittierten Leistung. Daraus folgt für die Temperatur, dass die Temperatur der Strahlung gleich der Temperatur der Wände ist. (Er absorbiert pro Zeiteinheit genauso viel Energie wie er emittiert.)

18.8 Rotverschiebung

Erklären Sie die Rotverschiebung bei Emission von Strahlung von einem Himmelskörper in den Weltraum.

Lösung

Durchläuft ein Photon ein Gravitationsfeld, muss es Energie aufbringen, um dieses zu verlassen, das heißt es kommt zu einem Energieverlust des Photons. Da $E = mc^2$ gilt und das Photon weiterhin mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist, folgt daraus, dass die Masse kleiner werden muss, was zur Folge hat, dass die Frequenz des Photons geringer wird und es somit zu einer Rotverschiebung kommt.

18.9 Reale Körper als schwarze Strahler

Nennen Sie zwei Beispiele für reale Körper, die idealisiert als plancksche Strahler bzw. schwarze Strahler betrachtet werden können.

Lösung

Mehrere Möglichkeiten:

- Ruß (für einen bestimmten Wellenlängenbereich)
- Menschliche Haut bei Körpertemperatur
- Sterne bzw. die Sonne
- Ofenraum eines Brennofens

18.10 Ursprung Stefan-Boltzmann-Gesetz und Wiensches Verschiebungsgesetz

Aus welchem Gesetz lassen sich das Stefan-Boltzmann-Gesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz herleiten?

Lösung

Aus der Planckschen Strahlungsformel.

18.11 Expansion des Universums

Welchen Einfluss hat die Expansion unseres Universums auf elektromagnetische Strahlung?

Lösung

Dies führt zu einer Rotverschiebung der Strahlung.

18.12 Kirchhoffsches Strahlungsgesetz

Was besagt das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz?

Lösung

$\frac{\phi_1}{A_1} = \frac{\phi_2}{A_2}$, also die Verhältnisse zwischen abgestrahlter Leistung und Absorptionsvermögen sind im thermischen Gleichgewicht konstant.

18.13 Chemische Zusammensetzung Sonnenatmosphäre

Mit welcher Beobachtung kann man die chemische Zusammensetzung der Sonnenatmosphäre bestimmen?

Lösung

Charakteristische Absorptionslinien (Fraunhofer)

18.14 *Scherzfrage*

Welche Hosen trägt ein Physiker?

Lösung

Rayleigh-Jeans

18.15 Definition schwarzer Körper

Was ist ein schwarzer Körper?

Lösung

Das Absorptionsvermögen eines schwarzen Körpers hat den Wert 1, er absorbiert somit komplett die auf ihn einfallende Strahlung.

18.16 Frequenzbereiche Rayleigh-Jeans, Wien und Planck

In welchen Bereichen beschreiben das Rayleigh-Jeans, Wiensche und Plancksche Strahlungsgesetz die Abhängigkeit der Energiedichte von schwarzen Körpern von der Frequenz gut?

Lösung

Rayleigh Jeans ist für kleine Frequenzen gut,
Wiensche für große Frequenzen
und Planck beschreibt die Abhängigkeit genau

18.17 Temperaturverdreifung schwarzer Körper

Man verdreifacht die Temperatur eines schwarzen Körpers. Um welchen Faktor ändert sich die Strahlungsleistung?

18.18 Lösung

Um den Faktor 81.

18.19 Kosmische Hintergrundstrahlung

Als was kann man die kosmische Hintergrundstrahlung betrachten?

Lösung

Als Schwarzkörperstrahlung eines Körpers mit ca. 2,7 K.

19 Sonstiges

19.1 Quanten-Effekte 2

Nennen Sie 3 experimentelle Befunde, die nicht mit Hilfe der klassischen Physik erklärt werden können. Wählen Sie aus Ihren Antworten ein Experiment aus, und beschreiben Sie es kurz und die Beobachtungen. Geben Sie die Interpretation im Rahmen der Quantenphysik bzw. die Probleme bei der klassischen Interpretation an.

Lösung

- - spektrale Verteilung der Hohlraumstrahlung - photoelektrischer Effekt - Compton-Effekt - Franck-Hertz-Versuch
- Bei der Hohlraumstrahlung handelt es sich um die spektrale Dichte eines schwarzen Strahlers (Box mit kleinem Loch). Diese würde klassisch unendlich viel Energiedichte für hohen Frequenzen erreichen (Ultraviolett-Katastrophe). Durch Einführung der Quantenhypothese werden höherenergetische Zustände nur mit einer bestimmten (abnehmenden) Wahrscheinlichkeit angeregt.
- Beim Photoeffekt wird eine aufgeladene Kathode mit Licht bestrahlt. Man findet ein Entladen der Kathode ab einer Schwellfrequenz, instantan, unabhängig von der Intensität aber abhängig vom Material. Laut klassischer Theorie sollten die angeregten Dipolschwingungen bei jeder Frequenz auftauchen, nach einer Weile starten (abhängig von der Intensität des Lichtes) und für jedes Material funktionieren. Laut Quantentheorie soll jedes Photon mindestens genug Energie tragen um ein Elektron zu lösen(oder nicht). Dies geschieht sofort. Die Schwellfrequenz ist intensitätsunabhängig.
- Bei der Comptonstreuung wird Licht (z.B. Röntgenlicht) an Materie gestreut. Dabei erwartet man klassisch eine gleichbleibende Lichtfrequenz und zum anderen eine einheitliche Streuwinkelverteilung. Man findet, dass sich die Wellenlänge verlängert und ihre Frequenz dabei eine Abhängigkeit wie bei einem Stoßprozess zeigt. Dies lässt sich im Teilchenbild von Licht erklären, indem das Photon an einem Elektron streut und dabei Energie verliert die mit längerer Wellenlänge abgestrahlt wird.
- Im Franck-Hertz-Versuch werden Elektronen mit Hilfe eines E-Feldes beschleunigt und nach dem durchqueren von Hg-Gas ihre verbleibende Energie (Anzahl der in Gegenspannung ankommenden Elektronen) gemessen. Dabei wird ein Zu- und Abnehmender Restenergie der Elektronen beobachtet. Klassisch würde man ein stetiges Ansteigen der Elektronenenergie erwarten. Quantenmechanisch lässt sich die Situation durch die inelastische Streuung der Elektronen an den Elektronen des Hg-Gases erklären, sowie durch die Quantelung der Energieniveaus des Atoms.

(Für die Beschreibung/Beobachtung, die klassische und die quantenmechanische Sicht gibt es jeweils einen Punkt.)

19.2 Glanz von Metallen

Warum glänzen Metalle?

Lösung

Es kommt zu einer Wechselwirkung des Lichts mit den freien Elektronen. Die frei beweglichen Elektronen nehmen die elektromagnetische Strahlung auf und emittieren diese wieder. Dabei entsteht der für Metalle typische Glanz.

19.3 Experimentelle Befunde Entwicklung Quantenphysik

Nennen Sie zwei experimentelle Befunde, die Anstoß zur Entwicklung der Quantenphysik gaben.

Lösung

Spektralverteilung der Hohlraumstrahlung, Photoeffekt, Compton-Effekt, Franck-Hertz-Versuch

19.4 Erzeugung freier Elektronen

Nennen Sie zwei Möglichkeiten, freie Elektronen zu erzeugen

Lösung

Gasentladung, Photoeffekt, Glühemission aus Drähten, in radioaktiven Kernen: Beta-Strahlen (= Strahlen aus Elektronen)

19.5 Freie Elektronen Photonenabsorption

Warum können freie Elektronen keine Photonen absorbieren?

Lösung

Bei einem solchen Vorgang könnten nicht gleichzeitig die Energie- und Impulserhaltung erfüllt werden.

19.6 Klassische Herleitung Elektronenradius

Welche zwei Annahmen werden gemacht, um den klassischen Elektronenradius herzuleiten?

Lösung

- (a) Das Elektron sei eine Kugel mit dem Radius r_{el} und der Oberflächenladung e .
- (b) Seine Ruheenergie $E = m_0 c^2$ ist gleich seiner potentiellen elektrostatischen Energie, die sich aus der Oberflächenladung ergibt.

Teil VII

Grundlagen der Quantenmechanik

20 Allgemeines

20.1 Absorption von Licht durch freie Elektronen

Bei der Absorption von Licht durch freie Elektronen ändert jedes absorbierte Photon den Drehimpuls des Atoms um den Betrag $\frac{h}{2\pi}$. Was kann man daraus schließen?

Lösung

Aufgrund der Drehimpulserhaltung des Systems Photon-Atom muss das Photon (unabhängig von seiner Energie $h \cdot f$) einen Drehimpuls $\frac{h}{2\pi}$ haben.

20.2 Bohrsche Postulate

Nennen sie zwei der Bohrschen Postulate der Quantenmechanik.

Lösung

Mögliche Antworten:

- (a) Elektronen nehmen im Atom nur bestimmte Bahnen mit Energien E_n ein.
- (b) Beim Übergang zwischen Energieniveaus können Energiequanten mit $E = h \cdot f$ absorbiert oder emittiert werden.
- (c) Der Drehimpuls ist quantisiert mit $L = n \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right)$

20.3 Betragsquadrat quantenmechanische Wellenfunktion

Was sagt das Betragsquadrat der quantenmechanischen Wellenfunktion aus?

Lösung

Das Betragsquadrat der Wellenfunktion beschreibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte eines Teilchens.

20.4 Beugung und Interferenz im Teilchenmodell

Wie lassen sich Effekte wie Beugung und Interferenz im Teilchenmodell beschreiben?

Lösung

Die Feldstärke wird als Wahrscheinlichkeitsamplitude interpretiert, sodass das Quadrat eine Wahrscheinlichkeitsdichte repräsentiert.

20.5 Wellen- und Teilchencharakter von Licht (Experiment)

Nennen Sie jeweils ein Experiment, das den Wellen- und den Teilchencharakter des Lichtes verdeutlicht.

Lösung

Beugung, Interferenz (z.B. Doppelspaltexperiment) und Photoeffekt, Comptoneffekt

20.6 Heisenbergsche Unschärferelation

Nennen Sie zwei Paare von Messgrößen, die nach der Heisenbergschen Unschärferelation nicht gleichzeitig beliebig scharf messbar/definiert sein können.

Lösung

x zusammen mit p und E zusammen mit t .

20.7 Gemeinsamkeiten Linien Wasserstoffserie

Welche Gemeinsamkeit haben die Linien einer Serie des Wasserstoffes (Lyman, Balmer...)?

Lösung

Sie enden alle auf der selben Schale (Lyman: $n = 1, \dots$).

20.8 Eigenschaften von Licht als Welle und als Teilchen

Nennen Sie zwei Eigenschaften von Licht, die auf Welleneigenschaften und zwei, die auf Teilcheneigenschaften hindeuten.

Lösung

Teilcheneigenschaften: Ruhemasse $m_0 = 0$, Masse, Geschwindigkeit, Impuls, Energie, Drehimpuls
Welleneigenschaften: Frequenz, Wellenlänge, Phasengeschwindigkeit, Gruppengeschwindigkeit, Brechung, Beugung,...