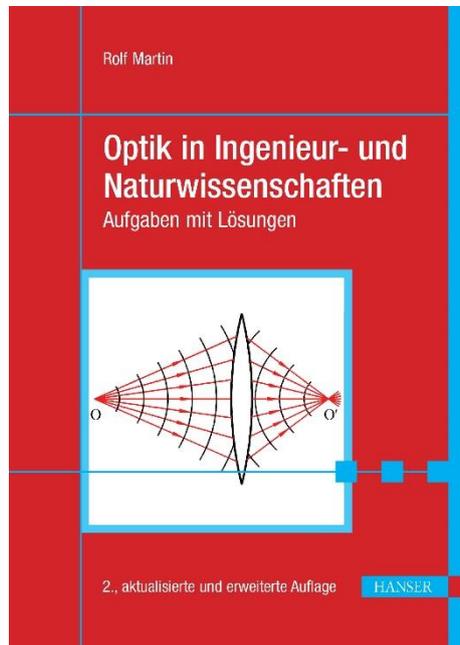


HANSER



Leseprobe

zu

Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften

von Rolf Martin

Print-ISBN: 978-3-446-47873-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-47878-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446478732>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das vorliegende Übungsbuch mit Aufgaben zur Optik sowie deren Lösungen ist gedacht als Ergänzung zum Lehrbuch „Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften“, herausgegeben 2023 von E. Hering und R. Martin. Die ersten sieben Grundlagenkapitel des Lehrbuchs enthalten bereits eine große Zahl von Beispielen, die durch das Aufgabenbuch wesentlich erweitert werden.

Mit dieser Aufgabensammlung und den ausführlichen Lösungen wird ein Leserwunsch erfüllt. Die Aufgaben sind von verschiedenen Schwierigkeitsgraden; sie reichen von einfachen und leicht zu beantwortenden Fragen bis zu sehr komplexen Problemen, die mitunter nur mithilfe eines Rechners gelöst werden können. Mit vielen Abbildungen werden die Aufgaben und deren Lösungen veranschaulicht.

Die Zielgruppe, die mit diesem Buch angesprochen werden soll, sind Studierende, die ihre Kenntnisse und Fertigkeiten bei der Lösung optischer Fragestellungen vertiefen und festigen und sich auf Prüfungen dieses Fachgebiets vorbereiten wollen. Darüber hinaus ist die Beschäftigung mit optischen Fragen sicher auch interessant für Ingenieure und Naturwissenschaftler, die bereits mit optischen Technologien befasst sind oder aber sich einen Zugang erarbeiten wollen.

Das Aufgabenbuch ist genauso gegliedert wie sein großer Bruder, das Lehrbuch. Zu allen sieben Grundlagenkapiteln desselben wurden passende Übungsaufgaben formuliert und auf das Lehrbuch abgestimmt. Sämtliche Verweise auf Kapitel, Gleichungen, Bilder und Tabellen des Lehrbuches werden zur Unterscheidung kursiv dargestellt. Die Verweise innerhalb dieses Buches bleiben in Standardschrift.

Ich bedanke mich für die hervorragende Betreuung durch meine Lektorin, Frau Natalia Silakova im Carl Hanser Verlag. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau, die wieder einmal viel Geduld aufgebracht hat während der Entstehungszeit des Werks.

Meinen Leserinnen und Lesern wünsche ich nützliche Erkenntnisse auf dem Gebiet der Optik und Photonik. Vor allem aber hoffe ich, dass sie dieselbe Faszination erfahren wie ich, der ich als 13-jähriger Schüler erstmals mit optischen Phänomenen Bekanntschaft machte und seither davon begeistert bin.

Für Hinweise und Verbesserungsvorschläge bin ich stets dankbar.

Köngen, im Frühjahr 2023

Rolf Martin

Inhalt

| | |
|----------------------|---|
| Vorwort | 7 |
|----------------------|---|

| | |
|-------------------------|----|
| Zum Geleit | 21 |
|-------------------------|----|

Teil I Aufgaben

| | |
|---------------------------|----|
| 1 Einleitung | 25 |
|---------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| 1.1 Lichtwellenlängen | 25 |
| 1.2 Welleneigenschaften | 25 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 2 Geometrische Optik | 27 |
|-----------------------------------|----|

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung | 27 |
| 2.2 Fermat'sches Prinzip | 27 |
| 2.3 Reflexion von Lichtstrahlen | 27 |
| 2.3.1 Reflexionsgesetz aus Fermat'schem Prinzip | 27 |
| 2.3.2 Winkelspiegel | 27 |
| 2.3.3 Rotierende Flüssigkeit als Parabolspiegel | 28 |
| 2.3.4 Konstruktive Verfolgung eines schiefen Strahls bei einem Spiegel .. | 28 |
| 2.3.5 Abbildung eines weit entfernten Gegenstands durch einen Hohlspiegel | 28 |
| 2.3.6 Newton'sche Abbildungsgleichung beim Hohlspiegel | 29 |
| 2.3.7 Abbildung durch Hohl- und Wölbspiegel | 29 |
| 2.3.8 Vergrößerung eines Kosmetikspiegels | 29 |
| 2.4 Brechung des Lichts | 30 |
| 2.4.1 Brechungsgesetz aus Fermat'schem Prinzip | 30 |
| 2.4.2 Codenummern optischer Gläser | 30 |
| 2.4.3 Brechung an einem Glaswürfel | 30 |
| 2.4.4 Brechung und Totalreflexion an einem Prisma | 30 |
| 2.4.5 Brechzahlbestimmung | 31 |
| 2.4.6 Numerische Apertur einer Glasfaser | 31 |
| 2.4.7 Minimaler Ablenkwinkel am Prisma | 31 |
| 2.4.8 Bauernfeind-Prisma | 31 |
| 2.4.9 Abbe-Refraktometer | 32 |

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------------|----|
| 2.5 | Brechung an gekrümmten Flächen. | 32 |
| 2.5.1 | Kartesisches Ovaloid. | 32 |
| 2.5.2 | Vergleich Kartesisches Ovaloid und Kugelfläche | 33 |
| 2.5.3 | Stablinse mit Abbe'scher Invariante | 33 |
| 2.5.4 | Kugellinse mit Abbe'scher Invariante. | 34 |
| 2.5.5 | Kugelförmiges Aquarium. | 34 |
| 2.6 | Abbildung durch Linsen | 34 |
| 2.6.1 | Linse an Luft und Wasser. | 34 |
| 2.6.2 | Brennweite in Abhängigkeit vom umgebenden Medium | 34 |
| 2.6.3 | Linsenschleifergleichung | 34 |
| 2.6.4 | Linsenschleifergleichung | 35 |
| 2.6.5 | Bessel-Verfahren zur Brennweitenbestimmung | 35 |
| 2.6.6 | Abbildungsfälle bei einer Sammellinse | 35 |
| 2.6.7 | Abbildungsfälle bei einer Zerstreuungslinse. | 35 |
| 2.6.8 | Abbildung eines weit entfernten Gegenstandes | 36 |
| 2.6.9 | Linsensystem mit drei Linsen | 36 |
| 2.6.10 | Dicke Linse, Fermat'sches Prinzip | 36 |
| 2.6.11 | Abbildung durch eine dicke Plankonvexlinse | 37 |
| 2.6.12 | Brennweite einer dicken Plankonvexlinse | 37 |
| 2.6.13 | Brennweite und Hauptebenen einer dicken Meniskuslinse. | 37 |
| 2.6.14 | Brechkraft einer dicken Bikonvexlinse. | 37 |
| 2.6.15 | Stablinse. | 37 |
| 2.6.16 | Anamorphotische Abbildung. | 38 |
| 2.6.17 | Linsensystem aus zwei Sammellinsen | 38 |
| 2.6.18 | Linsensystem aus Sammel- und Zerstreuungslinse | 38 |
| 2.6.19 | Achromat | 39 |
| 2.6.20 | Hauptebenen dicker Linsen | 39 |
| 2.7 | Matrixmethoden der Gauß'schen Optik | 40 |
| 2.7.1 | Laserschneidkopf | 40 |
| 2.7.2 | Dreilinsiges System | 40 |
| 2.7.3 | Systemmatrix | 41 |
| 2.7.4 | Kollimation mit GRIN-Linse. | 41 |
| 2.7.5 | Abbildung mit GRIN-Linse. | 41 |
| 2.7.6 | Unterwasserlampe | 41 |
| 2.7.7 | Dünne Linse in verschiedenen Medien | 42 |
| 2.7.8 | Kombination aus Zerstreuungslinse und Hohlspiegel | 42 |
| 2.7.9 | Kameraobjektiv. | 42 |
| 2.8 | Strahlbegrenzungen. | 43 |
| 2.8.1 | Pupillen | 43 |
| 2.8.2 | Pupillenlagen und Öffnungswinkel. | 43 |
| 2.8.3 | Pupillen und Öffnungswinkel eines Systems. | 44 |
| 2.8.4 | Luken | 44 |
| 2.8.5 | Luken und Pupillen. | 44 |
| 2.8.6 | Fernrohr mit Feldblende und Feldlinse | 44 |
| 2.8.7 | Blendenlage. | 45 |
| 2.9 | Abbildungsfehler | 45 |
| 2.9.1 | Fehlerarten | 45 |

- 2.9.2 Farbfehler 45
- 2.9.3 Linsenordnung für minimalen Öffnungsfehler 45
- 2.9.4 Linse bester Form 45
- 2.9.5 Reduktion der Koma 46
- 2.9.6 Beseitigung des Astigmatismus 46
- 2.9.7 Achromatisches Dublett 46
- 2.10 Optische Instrumente 46
 - 2.10.1 Augenmodell mit Matrizenmethoden 46
 - 2.10.2 Akkomodation der Augenlinse 47
 - 2.10.3 Korrektur der Kurzsichtigkeit mit Kontaktlinse 48
 - 2.10.4 Lupenvergrößerung 48
 - 2.10.5 Huygens-Okular 48
 - 2.10.6 Mikroskopvergrößerung 48
 - 2.10.7 Förderliche Vergrößerung eines Mikroskops 49
 - 2.10.8 Astronomisches Fernrohr 49
 - 2.10.9 Galilei'sches Fernrohr 49
 - 2.10.10 Auflösungsvermögen einer Digitalkamera 49
 - 2.10.11 Schärfentiefe bei Nahaufnahmen 50

3 Radio- und Fotometrie 51

- 3.1 Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie 51
 - 3.1.1 Kollimationsausbeute bei Kugelstrahler 51
 - 3.1.2 Kollimationsausbeute bei Lambert-Strahler 51
 - 3.1.3 Abstrahlung einer LED 52
 - 3.1.4 Ebene Fläche strahlt auf Detektor 52
 - 3.1.5 Strahldichte einer diffus reflektierenden Fläche 53
 - 3.1.6 Wien'sches Verschiebungsgesetz 53
 - 3.1.7 Stefan-Boltzmann-Gesetz 53
 - 3.1.8 Lichtleitwert 53
- 3.2 Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen 54
 - 3.2.1 Kenngrößen 54
 - 3.2.2 Ulbrichtkugel 54
 - 3.2.3 Bestrahlungsstärke in der Ulbrichtkugel 54
- 3.3 Lichttechnische Größen, Fotometrie 55
 - 3.3.1 Lichtstrom einer roten LED 55
 - 3.3.2 Lichtstrom einer Wolfram-Halogen-Lampe 55
 - 3.3.3 Hellempfindlichkeitsgrad 56
 - 3.3.4 Abstrahlcharakteristik einer LED 56
 - 3.3.5 Straßenbeleuchtung 57
 - 3.3.6 Leuchtdichte der Sonne 57
- 3.4 Lichttechnische Größen, Fotometrie 58
 - 3.4.1 Farbwertanteile eines schwarzen Strahlers 58
 - 3.4.2 Farbwertanteile einer LED 58
 - 3.4.3 Farbwertanteile einer Wolfram-Halogen-Lampe 60
 - 3.4.4 Farbmischung 60

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 4 | Wellenoptik | 61 |
| 4.1 | Elektromagnetische Wellen | 61 |
| 4.1.1 | Sichtbares Spektrum | 61 |
| 4.1.2 | Wellengleichung in Abhängigkeit von der Laufrichtung | 61 |
| 4.1.3 | Laufrichtung einer Welle | 61 |
| 4.1.4 | Kugelwelle | 61 |
| 4.1.5 | Ebene Wellen in verschiedenen Richtungen | 62 |
| 4.1.6 | Feldstärken solarer Strahlung | 62 |
| 4.2 | Polarisation des Lichts | 62 |
| 4.2.1 | Polarisationsformen | 62 |
| 4.2.2 | Jones-Vektoren | 62 |
| 4.2.3 | Interpretation von Jones-Vektoren | 63 |
| 4.2.4 | Gesetz von Malus | 63 |
| 4.2.5 | Viertel- und Halbwellenplatte | 63 |
| 4.2.6 | Jones Matrizen | 63 |
| 4.2.7 | Polarisation durch Reflexion | 63 |
| 4.2.8 | Polarisationsfolien | 64 |
| 4.2.9 | Gesetz von Malus mit realen Polarisatoren | 64 |
| 4.2.10 | Tripel-Polarisator | 64 |
| 4.2.11 | Indexellipsoid in einachsigen Kristallen | 65 |
| 4.2.12 | Glan-Taylor-Prisma | 65 |
| 4.2.13 | Rochon-Prisma | 65 |
| 4.2.14 | $\lambda/2$ -Platte nullter Ordnung | 66 |
| 4.2.15 | Licht-Modulator | 66 |
| 4.3 | Lichtwellen an Grenzflächen | 66 |
| 4.3.1 | Fresnel'sche Gleichungen | 66 |
| 4.3.2 | Fresnel-Rhombus | 66 |
| 4.3.3 | Totalreflexion | 67 |
| 4.3.4 | Reflexion an einer Metalloberfläche | 67 |
| 4.4 | Interferenz | 67 |
| 4.4.1 | Gangunterschied | 67 |
| 4.4.2 | Zweistrahlinterferenz | 68 |
| 4.4.3 | Laser-Array | 68 |
| 4.4.4 | Doppelspalt | 68 |
| 4.4.5 | Kohärenzeigenschaften eines Halbleiterlasers | 69 |
| 4.4.6 | Kohärenzeigenschaften einer Spektrallampe | 69 |
| 4.4.7 | Gruppenindex | 69 |
| 4.4.8 | Gruppenindex von Quarzglas | 69 |
| 4.4.9 | Holografisches Gitter | 70 |
| 4.4.10 | Stehende Wellen im Laser-Resonator | 70 |
| 4.4.11 | Farbreflexe einer Seifenlamelle | 71 |
| 4.4.12 | Fizeau-Streifen | 71 |
| 4.4.13 | Reflexvermindernde Einzelschicht | 71 |
| 4.4.14 | Reflexvermindernde Einzelschicht für Unterwasserkamera | 72 |
| 4.4.15 | Dielektrischer Spiegel | 72 |
| 4.4.16 | Michelson-Interferometer | 72 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------|----|
| 4.4.17 | Wärmeausdehnung mit Michelson-Interferometer | 72 |
| 4.4.18 | Fabry-Perot-Interferometer | 73 |
| 4.4.19 | Fabry-Perot-Interferometer - Auflösungsvermögen | 73 |
| 4.5 | Beugung. | 73 |
| 4.5.1 | Huygens'sches Prinzip | 73 |
| 4.5.2 | Spaltbeugung. | 74 |
| 4.5.3 | Beugung am Rechteckspalt | 74 |
| 4.5.4 | Intensitätsverhältnisse bei der Spaltbeugung | 75 |
| 4.5.5 | Linsefokus | 75 |
| 4.5.6 | Auflösungsvermögen des Auges und Pixelbilder | 75 |
| 4.5.7 | Airy-Scheibchen | 76 |
| 4.5.8 | Doppelspalt | 76 |
| 4.5.9 | Auflösung eines Gitters | 76 |
| 4.5.10 | Spektrometer mit Reflexionsgitter | 77 |
| 4.5.11 | Lineare Dispersion | 77 |
| 4.6 | Gauß'sche Strahlen. | 77 |
| 4.6.1 | Strahlradius | 77 |
| 4.6.2 | Lunar Laser Ranging | 77 |
| 4.6.3 | Gaußstrahl | 78 |
| 4.6.4 | Laserfokussierung | 78 |
| 4.6.5 | Laser mit geringer Divergenz | 79 |
| 4.7 | Holografie | 79 |
| 4.7.1 | Weißlichthologramm | 79 |
| 4.7.2 | Intensitätsverlauf bei Hologramm-Belichtung | 80 |

5 Quantenoptik.81

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 | Lichtquanten | 81 |
| 5.1.1 | Äußerer Fotoeffekt | 81 |
| 5.1.2 | Innerer Fotoeffekt | 81 |
| 5.1.3 | Lichtdruck | 81 |
| 5.1.4 | Druck solarer Photonen | 82 |
| 5.1.5 | Photonenenergien und -impulse | 83 |
| 5.1.6 | Elektron-Photon-Stoß | 83 |
| 5.2 | Welle-Teilchen-Dualismus | 83 |
| 5.2.1 | Antreffwahrscheinlichkeit gebeugter Photonen | 83 |
| 5.3 | Absorption und Emission von Licht | 84 |
| 5.3.1 | Photonabsorption | 84 |
| 5.3.2 | Impuls- und Energieerhaltung bei der Emission | 84 |
| 5.3.3 | Lebensdauer angeregter Elektronen und spektrale Linienbreite | 85 |
| 5.4 | Laser. | 85 |
| 5.4.1 | Verstärkung eines Lasers. | 85 |
| 5.4.2 | Reflexionsgrad von Laserspiegeln. | 85 |
| 5.4.3 | Frequenzänderung infolge von Längenänderung | 85 |
| 5.4.4 | Monomode-Laser. | 85 |
| 5.4.5 | Laser-Pulse. | 86 |
| 5.4.6 | Femtosekundenlaser. | 86 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------|-----------|
| 6 | Optoelektronik | 87 |
| 6.1 | Halbleiter-Sender | 87 |
| 6.1.1 | Temperaturdrift der LED-Farbe | 87 |
| 6.1.2 | Wirkungsgrade einer LED | 87 |
| 6.1.3 | Plastik-Vergusskörper einer LED | 87 |
| 6.1.4 | Modulation einer IRED | 88 |
| 6.1.5 | Temperaturabhängigkeit der Laserschwelle | 89 |
| 6.1.6 | Abstand longitudinaler Moden | 89 |
| 6.1.7 | Modensprünge | 89 |
| 6.1.8 | Modulation eines Halbleiterlasers | 90 |
| 6.1.9 | Laserschwelle | 90 |
| 6.1.10 | DFB-Laser | 90 |
| 6.2 | Halbleiter-Detektoren | 90 |
| 6.2.1 | Eindringtiefe von Photonen | 90 |
| 6.2.2 | Quantenausbeute und Empfindlichkeit | 91 |
| 6.2.3 | Detektivität von pin-Fotodioden | 91 |
| 6.2.4 | Lawinenfotodiode | 91 |
| 6.2.5 | Silicium-Fotodiode | 91 |
| 7 | Führung von Licht in Lichtwellenleitern | 93 |
| 7.1 | Einleitung | 93 |
| 7.1.1 | Eigenschaften von Lichtwellenleitern | 93 |
| 7.2 | Schichtwellenleiter | 93 |
| 7.2.1 | Doppelheterostruktur | 93 |
| 7.3 | Wellen in zylindrischen Fasern | 93 |
| 7.3.1 | Stufenindex-Faser | 93 |
| 7.3.2 | Monomode-Faser | 94 |
| 7.3.3 | Zusammensetzung des Faserkerns | 94 |
| 7.4 | Dämpfung in Lichtwellenleitern | 94 |
| 7.4.1 | Dämpfungskoeffizient | 94 |
| 7.4.2 | Dämpfung in PMMA | 95 |
| 7.4.3 | Abschneidemethode | 95 |
| 7.4.4 | Wechsel des Sendelasers | 95 |
| 7.4.5 | Nachrichtenübertragung auf POF | 95 |
| 7.5 | Dispersion im Lichtwellenleiter | 96 |
| 7.5.1 | Bitrate einer Stufenindex-Faser | 96 |
| 7.5.2 | Bitrate einer Plastikfaser | 96 |
| 7.5.3 | Kombination von Dispersionsmechanismen | 96 |
| 7.5.4 | Dispersion einer Multimodefaser | 96 |

Teil II Lösungen

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 1 | Einleitung | 99 |
| 1.1 | Lichtwellenlängen | 99 |
| 1.2 | Welleneigenschaften | 99 |
| 2 | Geometrische Optik | 101 |
| 2.1 | Lichtstrahlen, optische Abbildung | 101 |
| 2.3 | Reflexion von Lichtstrahlen | 101 |
| 2.3.1 | Reflexionsgesetz aus Fermat'schem Prinzip | 101 |
| 2.3.2 | Winkelspiegel | 101 |
| 2.3.3 | Rotierende Flüssigkeit als Parabolspiegel | 102 |
| 2.3.4 | Konstruktive Verfolgung eines schiefen Strahls bei einem Spiegel | 103 |
| 2.3.5 | Abbildung eines weit entfernten Gegenstands durch einen Hohlspiegel | 103 |
| 2.3.6 | Newton'sche Abbildungsgleichung beim Hohlspiegel | 103 |
| 2.3.7 | Abbildung durch Hohl- und Wölbspiegel | 104 |
| 2.3.8 | Vergrößerung eines Kosmetikspiegels | 104 |
| 2.4 | Brechung des Lichts | 105 |
| 2.4.1 | Brechungsgesetz aus Fermat'schem Prinzip | 105 |
| 2.4.2 | Codenummern optischer Gläser | 106 |
| 2.4.3 | Brechung an einem Glaswürfel | 106 |
| 2.4.4 | Brechung und Totalreflexion an einem Prisma | 106 |
| 2.4.5 | Brechzahlbestimmung | 107 |
| 2.4.6 | Numerische Apertur einer Glasfaser | 107 |
| 2.4.7 | Minimaler Ablenkwinkel am Prisma | 107 |
| 2.4.8 | Bauernfeind-Prisma | 109 |
| 2.4.9 | Abbe-Refraktometer | 110 |
| 2.5 | Brechung an gekrümmten Flächen | 111 |
| 2.5.1 | Kartesisches Ovaloid | 111 |
| 2.5.2 | Vergleich Kartesisches Ovaloid und Kugelfläche | 112 |
| 2.5.3 | Stablinse mit Abbe'scher Invariante | 112 |
| 2.5.4 | Kugellinse mit Abbe'scher Invariante | 112 |
| 2.5.5 | Kugelförmiges Aquarium | 113 |
| 2.6 | Abbildung durch Linsen | 113 |
| 2.6.1 | Linse an Luft und Wasser | 113 |
| 2.6.2 | Brennweite in Abhängigkeit vom umgebenden Medium | 114 |
| 2.6.3 | Linsenschleifergleichung | 114 |
| 2.6.4 | Linsenschleifergleichung | 115 |
| 2.6.5 | Bessel-Verfahren zur Brennweitenbestimmung | 115 |
| 2.6.6 | Abbildungsfälle bei einer Sammellinse | 116 |
| 2.6.7 | Abbildungsfälle bei einer Zerstreuungslinse | 116 |
| 2.6.8 | Abbildung eines weit entfernten Gegenstandes | 116 |
| 2.6.9 | Linsensystem mit drei Linsen | 117 |
| 2.6.10 | Dicke Linse, Fermat'sches Prinzip | 118 |
| 2.6.11 | Abbildung durch eine dicke Plankonvexlinse | 118 |

| | | |
|---------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6.12 | Brennweite einer dicken Plankonvexlinse | 119 |
| 2.6.13 | Brennweite und Hauptebenen einer dicken Meniskuslinse | 119 |
| 2.6.14 | Brechkraft einer dicken Bikonvexlinse | 119 |
| 2.6.15 | Stablinse | 120 |
| 2.6.16 | Anamorphotische Abbildung | 121 |
| 2.6.17 | Linsensystem aus zwei Sammellinsen | 122 |
| 2.6.18 | Linsensystem aus Sammell- und Zerstreuungslinse | 123 |
| 2.6.19 | Achromat | 123 |
| 2.6.20 | Hauptebenen dicker Linsen | 124 |
| 2.7 | Matrixmethoden der Gauß'schen Optik | 126 |
| 2.7.1 | Laserschneidkopf | 126 |
| 2.7.2 | Dreilinsiges System | 127 |
| 2.7.3 | Systemmatrix | 128 |
| 2.7.4 | Kollimation mit GRIN-Linse | 129 |
| 2.7.5 | Abbildung mit GRIN-Linse | 130 |
| 2.7.6 | Unterwasserlampe | 131 |
| 2.7.7 | Dünne Linse in verschiedenen Medien | 133 |
| 2.7.8 | Kombination aus Zerstreuungslinse und Hohlspiegel | 134 |
| 2.7.9 | Kameraobjektiv | 135 |
| 2.8 | Strahlbegrenzungen | 136 |
| 2.8.1 | Pupillen | 136 |
| 2.8.2 | Pupillenlagen und Öffnungswinkel | 136 |
| 2.8.3 | Pupillen und Öffnungswinkel eines Systems | 138 |
| 2.8.4 | Luken | 139 |
| 2.8.5 | Luken und Pupillen | 139 |
| 2.8.6 | Fernrohr mit Feldblende und Feldlinse | 140 |
| 2.8.7 | Blendenlage | 142 |
| 2.9 | Abbildungsfehler | 143 |
| 2.9.1 | Fehlerarten | 143 |
| 2.9.2 | Farbfehler | 143 |
| 2.9.3 | Linsenanordnung für minimalen Öffnungsfehler | 143 |
| 2.9.4 | Linse bester Form | 143 |
| 2.9.5 | Reduktion der Koma | 144 |
| 2.9.6 | Beseitigung des Astigmatismus | 144 |
| 2.9.7 | Achromatisches Dublett | 144 |
| 2.10 | Optische Instrumente | 145 |
| 2.10.1 | Augenmodell mit Matrizenmethoden | 145 |
| 2.10.2 | Akkommodation der Augenlinse | 147 |
| 2.10.3 | Korrektur der Kurzsichtigkeit mit Kontaktlinse | 148 |
| 2.10.4 | Lupenvergrößerung | 149 |
| 2.10.5 | Huygens-Okular | 149 |
| 2.10.6 | Mikroskopvergrößerung | 151 |
| 2.10.7 | Förderliche Vergrößerung eines Mikroskops | 151 |
| 2.10.8 | Astronomisches Fernrohr | 152 |
| 2.10.9 | Galilei'sches Fernrohr | 153 |
| 2.10.10 | Auflösungsvermögen einer Digitalkamera | 154 |
| 2.10.11 | Schärfentiefe bei Nahaufnahmen | 154 |

| | | |
|----------|------------------------------------------------------|------------|
| 3 | Radio- und Fotometrie | 157 |
| 3.1 | Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie | 157 |
| 3.1.1 | Kollimationsausbeute bei Kugelstrahler | 157 |
| 3.1.2 | Kollimationsausbeute bei Lambert-Strahler | 157 |
| 3.1.3 | Abstrahlung einer LED | 158 |
| 3.1.4 | Ebene Fläche strahlt auf Detektor | 159 |
| 3.1.5 | Strahldichte einer diffus reflektierenden Fläche | 160 |
| 3.1.6 | Wien'sches Verschiebungsgesetz | 161 |
| 3.1.7 | Stefan-Boltzmann-Gesetz | 161 |
| 3.1.8 | Lichtleitwert | 162 |
| 3.2 | Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen | 163 |
| 3.2.1 | Kenngößen | 163 |
| 3.2.2 | Ulbrichtkugel | 164 |
| 3.2.3 | Bestrahlungsstärke in der Ulbrichtkugel | 165 |
| 3.3 | Lichttechnische Größen, Fotometrie | 166 |
| 3.3.1 | Lichtstrom einer roten LED | 166 |
| 3.3.2 | Lichtstrom einer Wolfram-Halogen-Lampe | 167 |
| 3.3.3 | Hellempfindlichkeitsgrad | 168 |
| 3.3.4 | Abstrahlcharakteristik einer LED | 169 |
| 3.3.5 | Straßenbeleuchtung | 169 |
| 3.3.6 | Leuchtdichte der Sonne | 170 |
| 3.4 | Lichttechnische Größen, Fotometrie | 172 |
| 3.4.1 | Farbwertanteile eines schwarzen Strahlers | 172 |
| 3.4.2 | Farbwertanteile einer LED | 172 |
| 3.4.3 | Farbwertanteile einer Wolfram-Halogen-Lampe | 173 |
| 3.4.4 | Farbmischung | 174 |
| 4 | Wellenoptik | 177 |
| 4.1 | Elektromagnetische Wellen | 177 |
| 4.1.1 | Sichtbares Spektrum | 177 |
| 4.1.2 | Wellengleichung in Abhängigkeit von der Laufrichtung | 177 |
| 4.1.3 | Laufrichtung einer Welle | 177 |
| 4.1.4 | Kugelwelle | 177 |
| 4.1.5 | Ebene Wellen in verschiedenen Richtungen | 178 |
| 4.1.6 | Feldstärken solarer Strahlung | 179 |
| 4.2 | Polarisation des Lichts | 179 |
| 4.2.1 | Polarisationsformen | 179 |
| 4.2.2 | Jones-Vektoren | 179 |
| 4.2.3 | Interpretation von Jones-Vektoren | 181 |
| 4.2.4 | Gesetz von Malus | 182 |
| 4.2.5 | Viertel- und Halbwellenplatte | 183 |
| 4.2.6 | Jones Matrizen | 184 |
| 4.2.7 | Polarisation durch Reflexion | 186 |
| 4.2.8 | Polarisationsfolien | 187 |
| 4.2.9 | Gesetz von Malus mit realen Polarisatoren | 187 |
| 4.2.10 | Tripel-Polarisator | 188 |

| | | |
|--------|--------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.11 | Indexellipsoid in einachsigen Kristallen | 189 |
| 4.2.12 | Glan-Taylor-Prisma | 190 |
| 4.2.13 | Rochon-Prisma | 190 |
| 4.2.14 | $\lambda/2$ -Platte nullter Ordnung | 191 |
| 4.2.15 | Licht-Modulator | 192 |
| 4.3 | Lichtwellen an Grenzflächen | 194 |
| 4.3.1 | Fresnel'sche Gleichungen | 194 |
| 4.3.2 | Fresnel-Rhombus | 195 |
| 4.3.3 | Totalreflexion | 196 |
| 4.3.4 | Reflexion an einer Metalloberfläche | 196 |
| 4.4 | Interferenz | 197 |
| 4.4.1 | Gangunterschied | 197 |
| 4.4.2 | Zweistrahlinterferenz | 198 |
| 4.4.3 | Laser-Array | 198 |
| 4.4.4 | Doppelspalt | 199 |
| 4.4.5 | Kohärenzeigenschaften eines Halbleiterlasers | 200 |
| 4.4.6 | Kohärenzeigenschaften einer Spektrallampe | 200 |
| 4.4.7 | Gruppenindex | 200 |
| 4.4.8 | Gruppenindex von Quarzglas | 201 |
| 4.4.9 | Holografisches Gitter | 201 |
| 4.4.10 | Stehende Wellen im Laser-Resonator | 202 |
| 4.4.11 | Farbreflexe einer Seifenlamelle | 202 |
| 4.4.12 | Fizeau-Streifen | 203 |
| 4.4.13 | Reflexvermindernde Einzelschicht | 203 |
| 4.4.14 | Reflexvermindernde Einzelschicht für Unterwasserkamera | 204 |
| 4.4.15 | Dielektrischer Spiegel | 204 |
| 4.4.16 | Michelson-Interferometer | 205 |
| 4.4.17 | Wärmeausdehnung mit Michelson-Interferometer | 205 |
| 4.4.18 | Fabry-Perot-Interferometer | 205 |
| 4.4.19 | Fabry-Perot-Interferometer – Auflösungsvermögen | 207 |
| 4.5 | Beugung | 208 |
| 4.5.1 | Huygens'sches Prinzip | 208 |
| 4.5.2 | Spaltbeugung | 209 |
| 4.5.3 | Beugung am Rechteckspalt | 209 |
| 4.5.4 | Intensitätsverhältnisse bei der Spaltbeugung | 210 |
| 4.5.5 | Linsenfokus | 211 |
| 4.5.6 | Auflösungsvermögen des Auges und Pixelbilder | 211 |
| 4.5.7 | Airy-Scheibchen | 212 |
| 4.5.8 | Doppelspalt | 212 |
| 4.5.9 | Auflösung eines Gitters | 213 |
| 4.5.10 | Spektrometer mit Reflexionsgitter | 214 |
| 4.5.11 | Lineare Dispersion | 214 |
| 4.6 | Gauß'sche Strahlen | 215 |
| 4.6.1 | Strahlradius | 215 |
| 4.6.2 | Lunar Laser Ranging | 215 |
| 4.6.3 | Gaußstrahl | 216 |
| 4.6.4 | Laserfokussierung | 217 |

4.6.5 Laser mit geringer Divergenz 217

4.7 Holografie 218

4.7.1 Weißlichthologramm 218

4.7.2 Intensitätsverlauf bei Hologramm-Belichtung..... 219

5 Quantenoptik..... 221

5.1 Lichtquanten..... 221

5.1.1 Äußerer Fotoeffekt 221

5.1.2 Innerer Fotoeffekt..... 222

5.1.3 Lichtdruck 222

5.1.4 Druck solarer Photonen 222

5.1.5 Photonenenergien und -impulse 223

5.1.6 Elektron-Photon-Stoß 223

5.2 Welle-Teilchen-Dualismus 225

5.2.1 Antreffwahrscheinlichkeit gebeugter Photonen 225

5.3 Absorption und Emission von Licht 227

5.3.1 Photonabsorption 227

5.3.2 Impuls- und Energieerhaltung bei der Emission..... 227

5.3.3 Lebensdauer angeregter Elektronen und spektrale Linienbreite ... 228

5.4 Laser..... 229

5.4.1 Verstärkung eines Lasers..... 229

5.4.2 Reflexionsgrad von Laserspiegeln..... 229

5.4.3 Frequenzänderung infolge von Längenänderung 229

5.4.4 Monomode-Laser..... 230

5.4.5 Laser-Pulse..... 230

5.4.6 Femtosekundenlaser..... 231

6 Optoelektronik 233

6.1 Halbleiter-Sender 233

6.1.1 Temperaturdrift der LED-Farbe 233

6.1.2 Wirkungsgrade einer LED 233

6.1.3 Plastik-Vergusskörper einer LED..... 234

6.1.4 Modulation einer IRED..... 234

6.1.5 Temperaturabhängigkeit der Laserschwelle 235

6.1.6 Abstand longitudinaler Moden 235

6.1.7 Modensprünge..... 236

6.1.8 Modulation eines Halbleiterlasers..... 237

6.1.9 Laserschwelle 237

6.1.10 DFB-Laser..... 238

6.2 Halbleiter-Detektoren..... 238

6.2.1 Eindringtiefe von Photonen 238

6.2.2 Quantenausbeute und Empfindlichkeit 238

6.2.3 Detektivität von pin-Fotodioden..... 239

6.2.4 Lawinenfotodiode 239

6.2.5 Silicium-Fotodiode..... 239

| | | |
|----------|------------------------------------------------------|------------|
| 7 | Führung von Licht in Lichtwellenleitern | 241 |
| 7.1 | Einleitung | 241 |
| 7.1.1 | Eigenschaften von Lichtwellenleitern..... | 241 |
| 7.2 | Schichtwellenleiter..... | 241 |
| 7.2.1 | Doppelheterostruktur..... | 241 |
| 7.3 | Wellen in zylindrischen Fasern..... | 242 |
| 7.3.1 | Stufenindex-Faser..... | 242 |
| 7.3.2 | Monomode-Faser..... | 243 |
| 7.3.3 | Zusammensetzung des Faserkerns..... | 244 |
| 7.4 | Dämpfung in Lichtwellenleitern | 245 |
| 7.4.1 | Dämpfungskoeffizient | 245 |
| 7.4.2 | Dämpfung in PMMA..... | 246 |
| 7.4.3 | Abschneidemethode | 247 |
| 7.4.4 | Wechsel des Sendelasers | 247 |
| 7.4.5 | Nachrichtenübertragung auf POF..... | 248 |
| 7.5 | Dispersion im Lichtwellenleiter | 248 |
| 7.5.1 | Bitrate einer Stufenindex-Faser..... | 248 |
| 7.5.2 | Bitrate einer Plastikfaser | 249 |
| 7.5.3 | Kombination von Dispersionsmechanismen | 249 |
| 7.5.4 | Dispersion einer Multimodefaser | 250 |

1

Einleitung

■ 1.1 Lichtwellenlängen

In welchem Wellenlängen- und Frequenzbereich liegt das sichtbare Spektrum (VIS)?

■ 1.2 Welleneigenschaften

Um welche Art Welle handelt es sich bei Lichtwellen?

2

Geometrische Optik

■ 2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung

Wie entsteht eine reelle und eine virtuelle Abbildung?

■ 2.2 Fermat'sches Prinzip

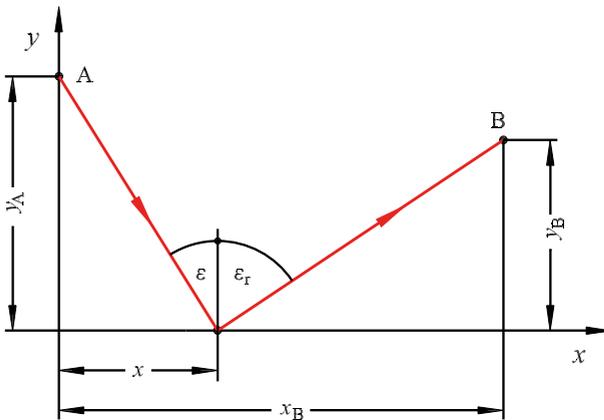
Siehe Aufgaben 2.3.1, 2.4.1 und 2.6.10.

■ 2.3 Reflexion von Lichtstrahlen

2.3.1 Reflexionsgesetz aus Fermat'schem Prinzip

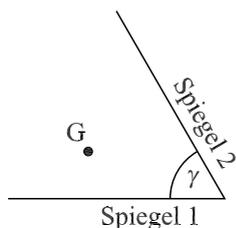
Leiten Sie mithilfe des Fermat'schen Prinzips (Gl. (2.2)) das Reflexionsgesetz (Gl. (2.3)) her.

Hinweis: Berechnen Sie den Weg l zwischen den Punkten A und B in Abhängigkeit von x und bestimmen Sie x so, dass l minimal wird. Damit lässt sich zeigen, dass $\varepsilon = \varepsilon_r$ ist.



2.3.2 Winkelspiegel

Wie viele Bilder sieht man von einem leuchtenden Gegenstandspunkt G, der vor einem Winkelspiegel mit dem Öffnungswinkel $\gamma = 60^\circ$ steht?



2.3.3 Rotierende Flüssigkeit als Parabolspiegel

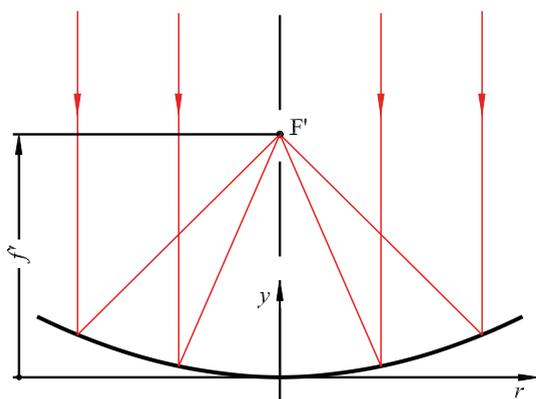
Die Oberfläche einer rotierenden Flüssigkeit hat die Form eines Paraboloids. Dabei gilt

$$y = \frac{\omega^2 r^2}{2g},$$

mit ω : Winkelgeschwindigkeit der Rotation, g : Fallbeschleunigung.

Große Parabolspiegel für astronomische Fernrohre werden beispielsweise hergestellt, indem flüssige Glasmasse in eine langsam rotierende Form gegossen wird. Nach der Erkalting hat die Oberfläche die gewünschte Paraboloidform.

Welche Brennweite hat ein Parabolspiegel, wenn die Drehzahl des Karussells $n = 6 \text{ min}^{-1}$ betrug?



2.3.4 Konstruktive Verfolgung eines schiefen Strahls bei einem Spiegel

Konstruieren Sie den Weg eines schief auf einen Hohl- bzw. Wölbspiegel fallenden Strahls.

2.3.5 Abbildung eines weit entfernten Gegenstands durch einen Hohlspiegel

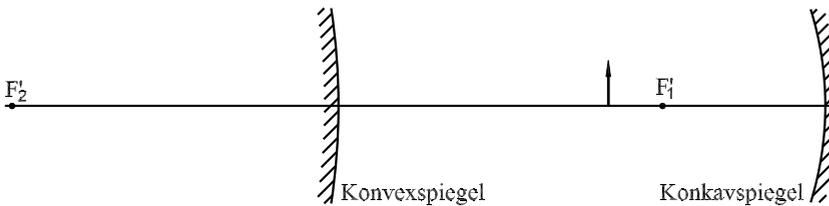
Der 200-Zoll-Spiegel auf dem Mt. Palomar (Kalifornien) hat eine Brennweite von $|f'| = 16,8 \text{ m}$. Wird er auf den Mond gerichtet, so entsteht in seiner Brennebene ein Bild des Mondes mit $d' = 151,5 \text{ mm}$ Durchmesser. Unter welchem Winkel erscheint der Mond von der Erde aus?

2.3.6 Newton'sche Abbildungsgleichung beim Hohlspiegel

Bezeichnet man beim Hohlspiegel den Abstand des Gegenstands vom Brennpunkt mit z und die des Bildes mit z' , so gilt die Beziehung $z \cdot z' = f'^2$. Beweisen Sie diese *Newton'sche Abbildungsgleichung*.

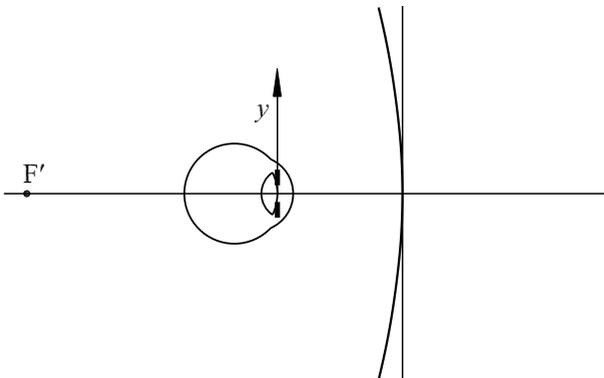
2.3.7 Abbildung durch Hohl- und Wölbspiegel

Vor einem Hohlspiegel der Brennweite $f'_1 = -50$ mm befindet sich im Abstand $a_1 = (4/3)f'_1$ ein Gegenstand. Die vom Hohlspiegel reflektierten Strahlen treffen auf einen Wölbspiegel mit der Brennweite $f'_2 = -2f'_1$. Beide Spiegel haben dieselbe optische Achse und den gegenseitigen Abstand $e = |3f'_1|$. Bestimmen Sie den Ort des Bildes sowie den Abbildungsmaßstab.



2.3.8 Vergrößerung eines Kosmetikspiegels

Vor einem Hohlspiegel (Kosmetikspiegel) der Brennweite $f' = -30$ cm steht eine Person und betrachtet ihr Spiegelbild. In welcher Gegenstandsweite a vor dem Spiegel muss sich das Gesicht befinden, wenn der Abstand vom Gesicht zum Bild hinter dem Spiegel 25 cm sein soll? Wie groß ist der Abbildungsmaßstab β' ? Zeichnen Sie den Weg eines Strahlenbündels, das von einem Objektpunkt ausgeht und in das Auge eintritt, das sich auf der optischen Achse befinden soll.



■ 2.4 Brechung des Lichts

2.4.1 Brechungsgesetz aus Fermat'schem Prinzip

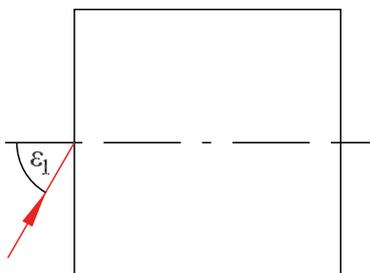
Leiten Sie das Snellius'sche Brechungsgesetz aus dem Fermat'schen Prinzip her.

2.4.2 Codenummern optischer Gläser

Welche Codenummer hat das Schwerkronglas SK 15 mit $n_d = 1,622990$ und $\nu_d = 58,06$?

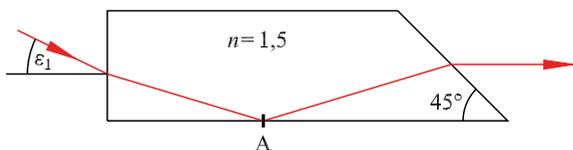
2.4.3 Brechung an einem Glaswürfel

Ein Lichtstrahl, der in der Zeichenebene verläuft, fällt unter dem Winkel $\varepsilon_1 = 60^\circ$ auf die Flächenmitte eines von Luft umgebenen Würfels aus Glas. Bestimmen Sie den Lichtweg im Würfel, wenn der Brechungsindex des Glases $n = 1,5$ beträgt. Unter welchem Winkel verlässt der Strahl den Würfel?



2.4.4 Brechung und Totalreflexion an einem Prisma

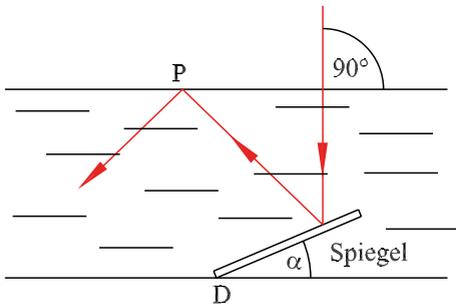
Ein Lichtstrahl fällt gemäß Skizze auf einen Glasblock der Brechzahl $n = 1,5$, der sich an Luft befindet.



- Wie groß muss der Einfallswinkel ε_1 sein, damit der Strahl den Block parallel zur Basislinie verlässt? Zeigen Sie, dass an der Stelle A Totalreflexion auftritt.
- Nun wird der Glasblock auf eine Flüssigkeitsoberfläche aufgesetzt, so dass die Flüssigkeit die Basisfläche benetzt. Wie groß muss der Brechungsindex der Flüssigkeit sein, damit die Totalreflexion im Punkt A verschwindet?

2.4.5 Brechzahlbestimmung

Die Brechzahl einer Zuckerlösung wird folgendermaßen bestimmt: Auf dem Boden eines Gefäßes befindet sich ein Spiegel, der um die Achse D drehbar ist. Ein Lichtstrahl, der senkrecht zur Oberfläche in die Lösung eintritt, wird im Punkt P gerade total reflektiert, wenn der Winkel $\alpha = 23,0^\circ$ ist. Wie groß ist der Brechungsindex der Zuckerlösung?



2.4.6 Numerische Apertur einer Glasfaser

Leiten sie die Gleichung (2.19) für die numerische Apertur einer Stufenindexfaser her.

2.4.7 Minimaler Ablenkwinkel am Prisma

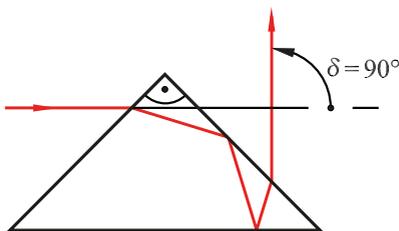
Bei einem Prisma nach Bild 2.18 mit brechendem Winkel $\alpha = 60^\circ$ und Brechungsindex $n = 1,5$ soll der Betrag des Ablenkwinkels δ in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ϵ'_1 aufgezeichnet werden. Das umgebende Medium ist Luft.

Verifizieren Sie anhand der Kurve die Aussage, dass der Ablenkwinkel bei symmetrischem Durchgang minimal wird.

Was passiert für Einfallswinkel $\epsilon'_1 < 27,92^\circ$?

2.4.8 Bauernfeind-Prisma

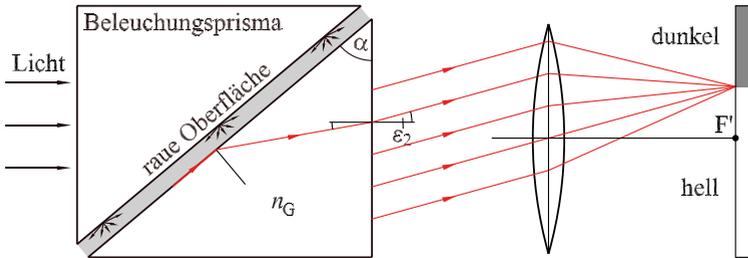
Das Bauernfeind-Prisma hat den Prismenwinkel $\alpha = 90^\circ$ und ist gleichschenkelig. Die Basis ist verspiegelt. Ein Strahl fällt parallel zur Basis in der Nähe der brechenden Kante auf das Prisma.



Zeigen Sie, dass der Ablenkwinkel δ stets 90° ist, unabhängig von der Höhe des Einfalls.

2.4.9 Abbe-Refraktometer

Das Abbe-Refraktometer dient der Bestimmung der Brechzahl von Flüssigkeiten und Festkörpern. Fällt Licht in das Beleuchtungsprisma, dann wird infolge der rauen Glasoberfläche der Basis in die Flüssigkeit (grau) diffuses Licht in allen denkbaren Richtungen eintreten. Der Weg eines streifend einfallenden Strahls ist in der Abbildung gezeichnet. In der Brennebene der Linse ergibt sich eine hell/dunkel-Grenze, aus deren Lage der Brechungsindex der Flüssigkeit bestimmt werden kann.



- a) Leiten Sie folgende Gleichung für den Brechungsindex n der Flüssigkeit in Abhängigkeit vom Prismenwinkel α , dem Austrittswinkel ε_2 sowie dem Brechungsindex n_G des Prismenglases her:

$$n = \cos \alpha \sin \varepsilon_2 + \sin \alpha \sqrt{n_G^2 - \sin^2 \varepsilon_2} .$$

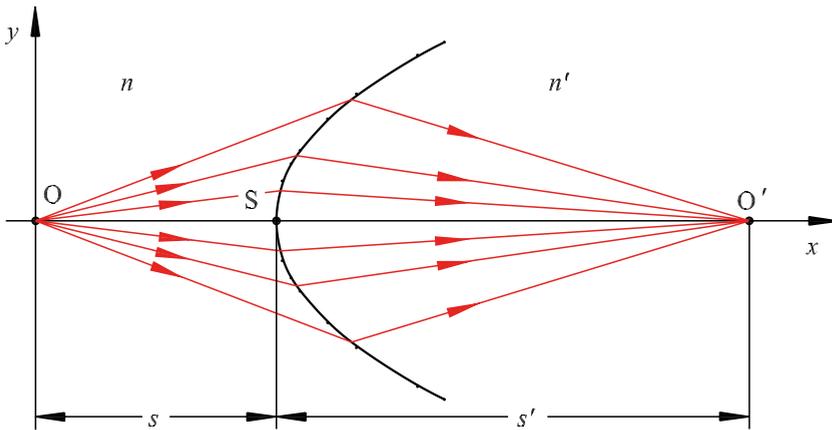
- b) Berechnen Sie den Brechungsindex für die Daten $\alpha = 50^\circ$, $\varepsilon_2 = 15,3^\circ$, $n_G = 1,55$ sowie $\alpha = 60^\circ$, $\varepsilon_2 = -8,6^\circ$, $n_G = 1,6$.

■ 2.5 Brechung an gekrümmten Flächen

2.5.1 Kartesisches Ovaloid

Welche mathematische Beziehung beschreibt die Form eines *kartesischen Ovaloids*, das sich dadurch auszeichnet, dass sich alle Strahlen, die von einem Objektpunkt O ausgehen, nach der Brechung an der Oberfläche im Bildpunkt O' treffen?

Konstruieren Sie ein Oval für die Schnittweiten $s = 60 \text{ mm}$ und $s' = 120 \text{ mm}$ mit den Brechzahlen $n = 1$ und $n' = 1,5$



2.5.2 Vergleich Kartesisches Ovaloid und Kugelfläche

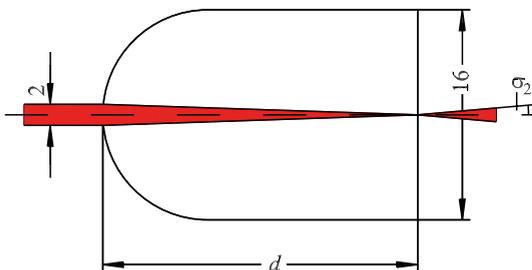
Die Abbildung eines Objektpunktes in einen Bildpunkt mit den Zahlenwerten von Aufgabe 2.5.1 soll nun durch eine sphärische Oberfläche im Paraxialgebiet durchgeführt werden. Berechnen Sie mithilfe der Abbe'schen Invariante den Krümmungsradius der erforderlichen Kugelfläche und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Kartesischen Ovaloid von Aufgabe 2.5.1.

2.5.3 Stablinse mit Abbe'scher Invariante

An ein Glasstäbchen mit 16 mm Durchmesser wird eine Halbkugel angeschmolzen (s. Skizze). Ein Laserstrahl mit 2 mm Durchmesser fällt parallel zur Symmetrieachse auf die Kugelfläche. Der Brechungsindex des Glases ist $n' = 1,5$; es ist von Luft umgeben.

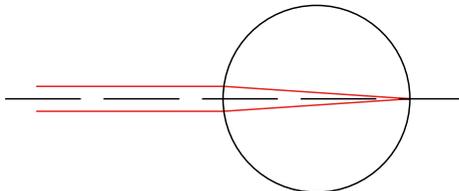
- Auf welche Länge d muss das Glasstäbchen abgeschnitten werden, damit der Laser genau am ebenen Ende fokussiert wird?
- Unter welchem Winkel σ_2 treten die Randstrahlen des Lichtbündels an der Planfläche aus?

Hinweis: Tatsächlich werden Laserstrahlen als Gauß'sche Strahlen beschrieben (s. *Ab-schn. 4.6*). Hier soll näherungsweise mit paraxialen Strahlen der geometrischen Optik gerechnet werden.



2.5.4 Kugellinse mit Abbe'scher Invariante

Welchen Brechungsindex müsste eine transparente Kugel haben, damit ein durch die Mitte gehendes paralleles Strahlenbündel auf einem gegenüber liegenden Punkt auf der Kugeloberfläche fokussiert würde? Die Kugel befindet sich an Luft.



2.5.5 Kugelförmiges Aquarium

Ein Fisch schwimmt in der Mitte eines kugelförmigen Aquariums mit dem Durchmesser 32 cm. Wo erscheint das Bild des Fisches, wenn der Einfluss des dünnen Glases auf die Brechung der Lichtstrahlen vernachlässigt wird?

■ 2.6 Abbildung durch Linsen

2.6.1 Linse an Luft und Wasser

Die Konkavseite einer dünnen Plankonvexlinse ($n_L = 1,6$) hat einen Krümmungsradius von $r = +120$ mm. Die Linse ist auf der Planseite von Wasser umgeben ($n_W = 1,333$) und auf der Konkavseite von Luft.

- Wie groß ist die Brennweite der Linse auf der Wasser- bzw. Luftseite?
- Wo entsteht das Bild eines Gegenstandes, der im Abstand $a = -300$ mm vor der Linse (in der Luft) steht? Wie groß ist der Abbildungsmaßstab?
- Konstruieren Sie die Abbildung.

2.6.2 Brennweite in Abhängigkeit vom umgebenden Medium

Welche Brennweite f'_W hat eine Glaslinse in Wasser ($n_W = 4/3$), wenn sie an Luft die Brennweite f'_L besitzt? Welche Rolle spielt die Brechzahl n_L des Linsenmaterials?

2.6.3 Linsenschleifergleichung

Eine Linse aus Flintglas hat den Krümmungsradius $r_1 = 400$ mm. Der Brechungsindex des Glases beträgt $n_L = 1,62$. Welchen Radius muss die zweite Fläche haben, damit die Brechkraft der Linse $D' = 2$ dpt beträgt? Welche Form hat die Linse?