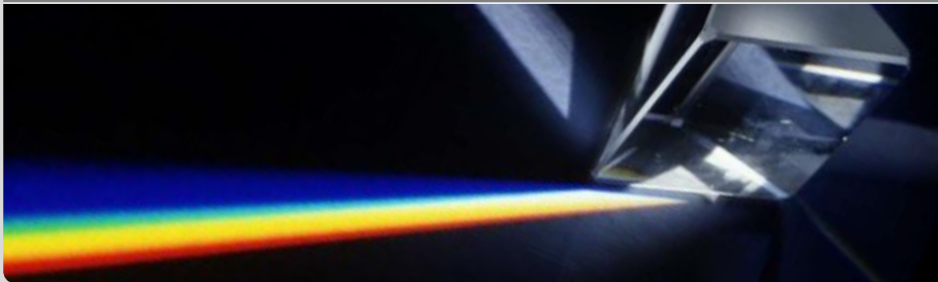


Optoelektronische Messtechnik

Vorlesung | 3 Prisma | Spektrometer

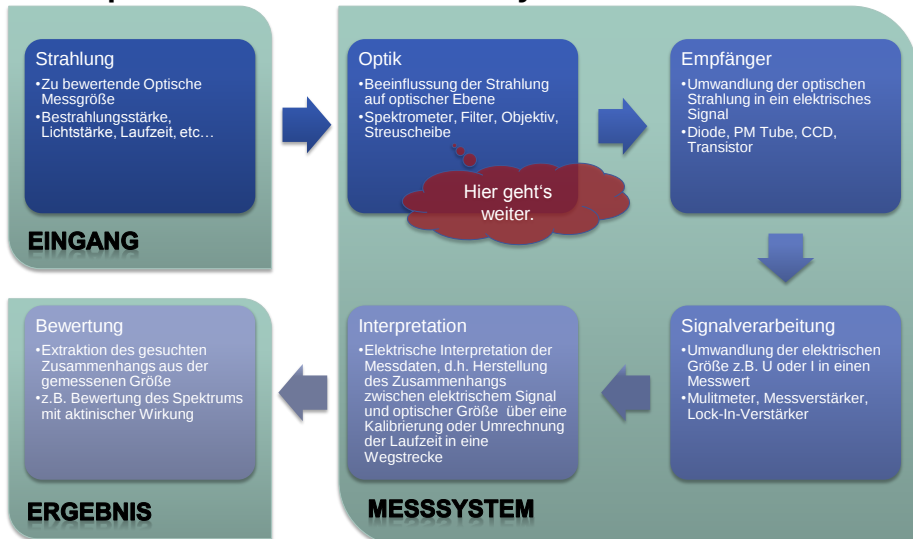
LTI | Lichttechnisches Institut

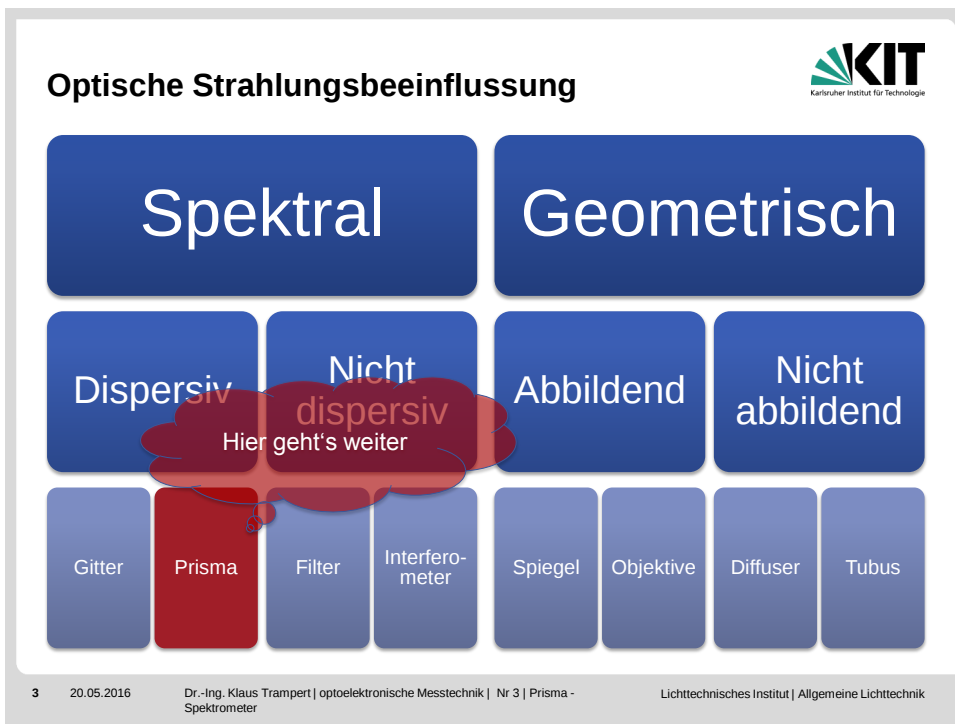


KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

www.kit.edu

Prinzipieller Aufbau eines Messsystems





Dispersion - Prisma

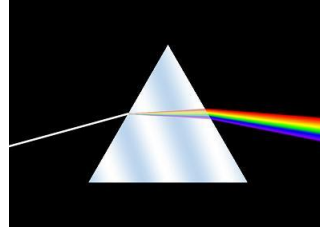
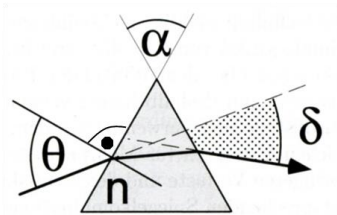


Prisma (plural: *Prismen*)
Geometrischer Körper, der ein Vieleck als Grundfläche hat und dessen Seitenkanten parallel und gleich lang sind.

- Spezialfall der Optik
 - Dreieck beschrieben durch den Brechungswinkel α

4 20.05.2016 Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma - Spekrometer Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Prismengleichung



- Brechungsgesetz und Geometrieüberlegungen liefern Ablenkungswinkel δ

$$\delta = \theta - \alpha + \arcsin(\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} - \cos \alpha \sin \theta)$$

- Da $n = n(\lambda)$ folgt, dass $\delta = \delta(\lambda)$
- Minimaler δ ergibt sich bei symmetrischen Durchgang zu

$$\delta_{min} = 2 \left(\arcsin(n \sin \frac{\alpha}{2}) \right) - \alpha$$

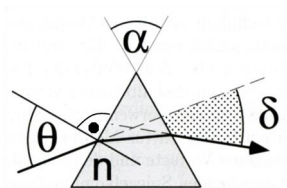
5

20.05.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma - Spektrometer

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Winkeldispersion am Prisma



- Durch Ableitung nach $d\lambda$ ergibt sich die Winkeldispersion zu

$$\frac{d\delta_{min}}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

- Daraus folgt, dass die Aufspaltung des Spektrums vom Brechwinkel α des Prismas und der Brechzahländerung pro λ abhängt.
- Achtung die Gleichung gilt nur bis zum Totalreflektionswinkel

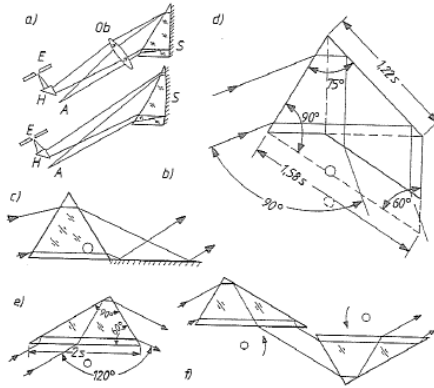
6

20.05.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma - Spektrometer

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Prismen Anordnungen konstanter Ablenkung



- a) Littrow-Prisma
Autokollimation
- b) Fery-Prisma
mit gekrümmten Flächen
- c) Wadsworth-Anordnung
- d) Prisma nach Abbe
aus einem Halbwürfel und zwei
30°-Prismen zusammengesetzt
oder aus einem Stück (untere
Begrenzungslinie, gestrichelt)
- e) Prisma nach Baume & Mercier
- f) Anordnung nach Løwe
aus zwei im Gegensinn
drehbaren Prismen nach
Baume & Mercier

7

20.05.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma -
Spektrometer

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Optische Strahlungsbeeinflussung

Spektral

Geometrisch

Anwendung
dispersiver Elemente

Abbildend

Nicht
abbildend

Gitter

Prisma

Filter

Interfero-
meter

Spiegel

Objektive

Diffuser

Tubus

8

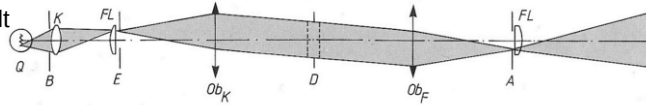
20.05.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma -
Spektrometer

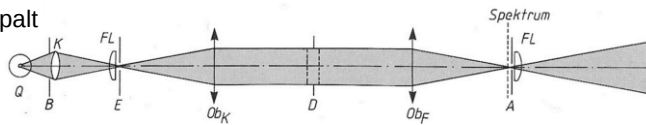
Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Prinzip des Monochromators

Parallel zum Spalt



Senkrecht zum Spalt

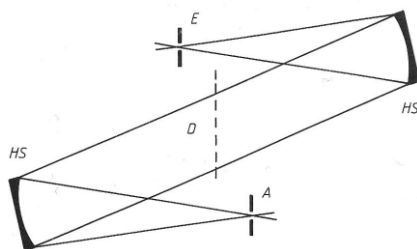


Aufbau eines Monochromators

- Leuchtfeld Q wird mit Feldlinse FL auf Kollimatorebene ObK abgebildet.
- ObK kollimiert den Strahl auf Dispersionselement D
- Dispersionselement D wird homogen ausgeleuchtet.
- Fernrohr ObF bildet das Strahlenbündel auf Ausgangsspaltebene ab.

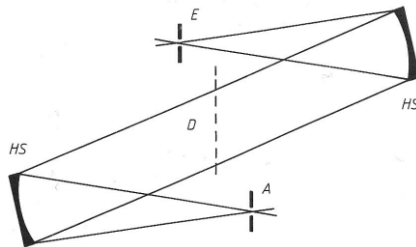
- Monochromator: Eingangsspalt wird auf Ausgangsspalt abgebildet.

Czerny-Turner Aufbau



- Eingangsspalt E steht im Fokus des Hohlspiegels HS
- HS parallelisiert Strahl auf D
- D führt Winkeldispersion durch
- HS fokussiert Teilstrahl auf Ausgangsspalt A

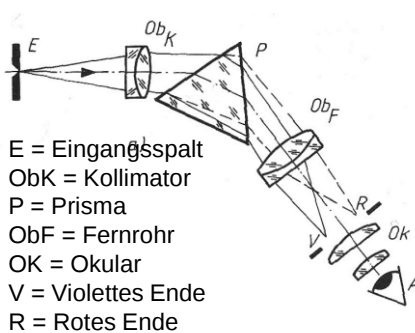
Abbildungseigenschaften



- Eingangsspalt E steht im Fokus des Hohlspiegels HS
- HS parallelisiert Strahl auf D
- D führt Winkeldispersion durch
- HS fokussiert Teilstrahl auf Ausgangsspalt A

Merke: Der Eingangsspalt wird auf den Ausgangsspalt abgebildet

Prismenspektrometer - Grundprinzip



E = Eingangsspalt
ObK = Kollimator
P = Prisma
ObF = Fernrohr
OK = Okular
V = Violettes Ende
R = Rotes Ende

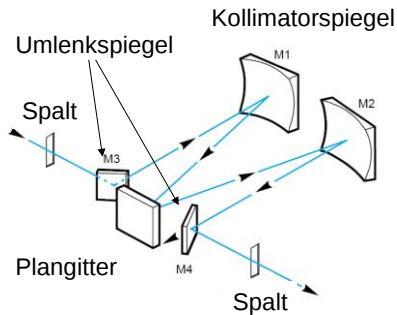
Spektroskop = Monochromator
mit Auge als Empfänger

- **Vorteil:** Eindeutige Zuordnung der Wellenlänge zur Position in der Bildebene
- **Nachteil:** Geringe Dispersion und damit geringe spektrale Auflösung

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = b \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

b = Basis des Prisma

Czerny-Turner Aufbau mit Gitter

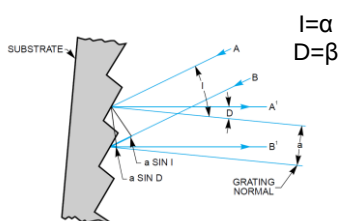


Die Kollimatorspiegel parallelisieren das Licht, sodass eine ebene Welle auf das Gitter fällt.

Die Focallänge f wird von den Kollimatorsiegeln bestimmt. Sie bestimmt die lineare Dispersion des Monochromators. Längere Wege entsprechen einer weiteren Auffächerung.

Vorteil des Czerny-Turner Aufbaus ist die Verwendung eines Plangitters, da kostengünstig und einfach, d.h. präzise herstellbar.

Winkel- & Lineare Dispersion



Hält man den Winkel α in der Gittergleichung konstant und leitet man nach der Wellenlänge ab, so erhält man:

$$d \cdot \cos \beta \cdot d\beta = m \cdot d\lambda$$

Am Spalt ist lineare Dispersion dann gegeben durch die Winkeldispersion und den optischen Weg, d.h. die Fokusslänge f .

Die spektrale Breite am Spalt ist somit gegeben durch das Produkt aus Spaltbreite s und der **reziproken linearen Dispersion** in nm/mm

Winkeldispersion

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos \beta}$$

Lineare Dispersion

$$\frac{dL}{d\lambda} = f \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{f \cdot m}{d \cdot \cos \beta}$$

Spektrale Breite am Spalt

$$\Delta\lambda_s = s \cdot \frac{d\lambda}{dL} = s \cdot \frac{d\lambda}{f \cdot d\beta} = \frac{s \cdot d \cdot \cos \beta}{f \cdot m}$$

<https://www.newport.com/Technische-Er%C3%A4uterungen-Gitterphysik/383720/1031/content.aspx>

Einfluss der Fokusslänge f auf Auflösung

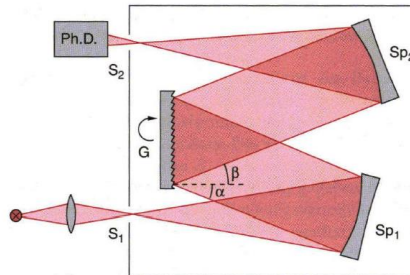
Gitterspektrometer:

Aus der Gittergleichung erhält man die Dispersion

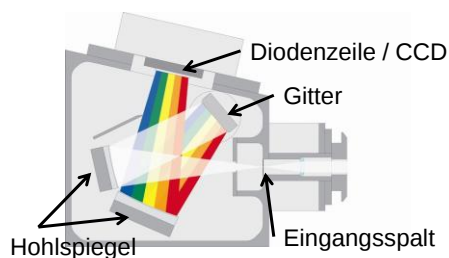
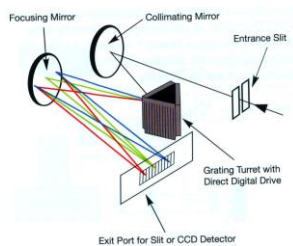
$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos \beta}$$

Der räumliche Abstand zweier Wellenlängen λ_1 und $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ in der Beobachtungsebene ist damit

$$\Delta x = f_2 \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} \Delta\lambda = f_2 \cdot \frac{m \cdot \Delta\lambda}{d \cdot \cos \beta}$$



Array Spektrometer



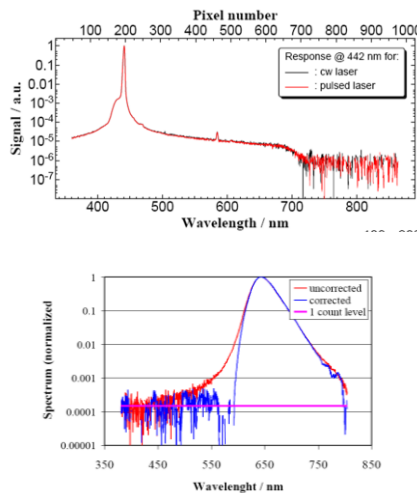
■ Prinzip

- Ausgangsspalt liegt in der Ebene eines CCD oder Diodenzeile
- Jedes Pixel definiert einen „Ausgangsspalt“

■ Vorteile

- Schnelle Messung
- Simultane Erfassung des Spektrums
- Blitzmessungen möglich
- Mechanisch robuster Aufbau
- Keine beweglichen Teile

Nachteile des Array Spektrometers



Nachteil

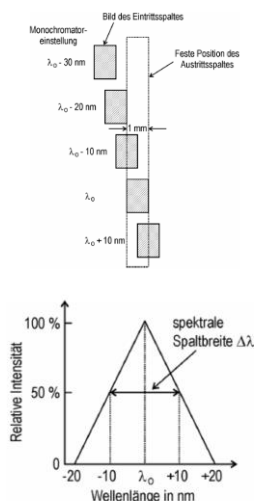
- Wellenlängenbereich ist beim Bau definiert
- Dynamik relativ gering (Problem der Übersteuerung bei Quellen mit schmalen Banden im Spektrum)
- Kleine Bauform bedingt hohen Streulichtanteil im Gerät. => systematischer Fehler.**
- Streulicht führt zu Fehlinterpretationen => Messung von Farbe?!

17 20.05.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma - Spektrometer

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Einfluss der Spaltbreite



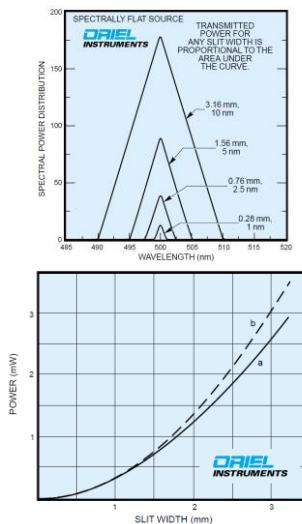
- Die Abbildung zeigt das Bild des Eingangsspalt in der Ebene des Ausgangsspalt während eines Scans.
- Auf den Empfänger hinter dem Spalt fällt nur der durch beide Spalte transmittierte Teil der einfallenden Strahlung.
- Über den Ort gesehen sind die Spalte eine Torfunktion. Der Wellenlängen-Scan entspricht einer örtlichen Verschiebung des Bildes => örtliche Faltung der Torfunktionen.
- Intensitätsverteilung am Austrittsspalt ist Dreiecksfunktion, wenn Breite des ES = AS**

18 20.05.2016

Dr.-Ing. Klaus Trampert | optoelektronische Messtechnik | Nr 3 | Prisma - Spektrometer

Lichttechnisches Institut | Allgemeine Lichttechnik

Monochromator – Spaltfunktion



Die Größe des Spaltes bestimmt

- Auflösung
- Eintrittsfläche => Signalstärke

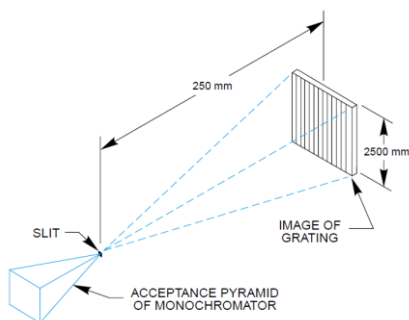
Die Auflösung $\Delta\lambda$ skaliert linear mit der Spaltbreite

$$\Delta\lambda_s = s \cdot \frac{dL}{d\lambda} = s \cdot f \cdot \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{s \cdot f \cdot m}{d \cdot \cos \beta}$$

Die einfallende Strahlungsleistung skaliert nahezu quadratisch mit der Spaltbreite.

$$P \propto S^2$$

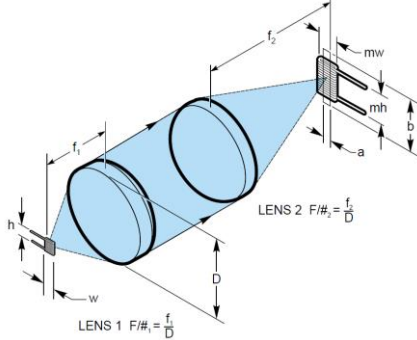
Akzeptanzwinkel



- Der Akzeptanzwinkel wird definiert durch die Größe des Gitters und die Fokusslänge des Monochromators.
- Diese beiden Größen bestimmen den „gesehenen“ Raumwinkel..
- Das Verhältnis von Fokusslänge zu Gittergröße ist das Öffnungsverhältnis, welches gerätespezifisch ist. Dieses wird als f# Nummer angegeben.
- Größere Nummern bezeichnen kleinere Öffnungswinkel => weniger Durchsatz.

Durchsatz eines Monochromators

Öffnungswinkelanpassung



Der Durchsatz eines Monochromators berechnet sich als Funktion der beteiligten optischen Bauteile. Diese Formel kann nur abschätzen.

Annahmen:

P_{Out} = opt. Leistung Ausgangsspalt

P_{In} = opt. Leistung Eingangsspalt

V = Vignette = Verhältnis der Bildgröße der Quelle zur Spaltgröße

$F\#$ = Öffnungsverhältnis

R = Reflektionsgrad des Spiegels bzw. Gitters.

N = Anzahl der Spiegel im optischen Weg.

$$P_{\text{Out}} = P_{\text{In}} \cdot V \cdot \frac{F\#_{\text{Quelle}}^2}{F\#_{\text{Mono}}^2} \cdot R_{\text{Gitter}}(\lambda) \cdot R_{\text{Spiegel}}^N$$