

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

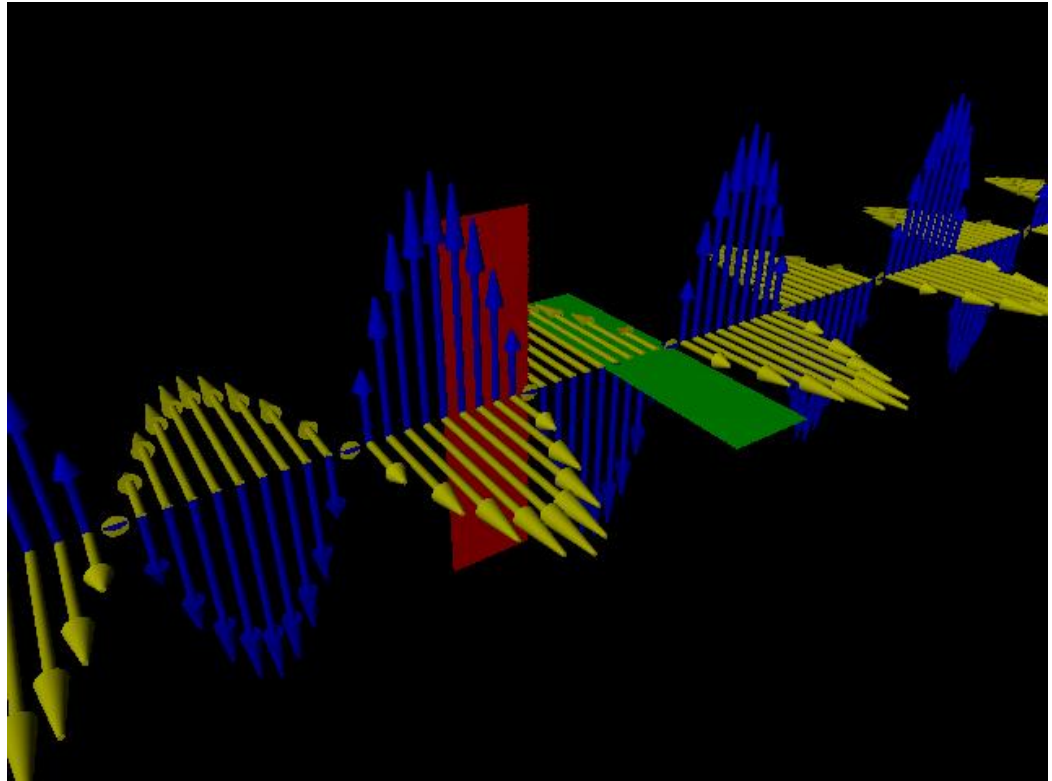
5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (1)

Phasengeschwindigkeit
im Medium

$$c = \frac{c_0}{n} = \frac{1}{n \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Dispersionsrelation

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi \cdot f}{2\pi / \lambda} = f \cdot \lambda$$

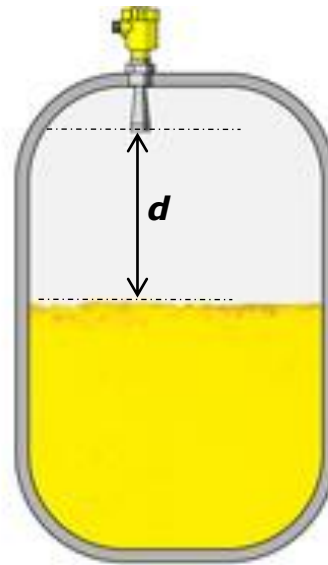


Modell einer elektromagnetischen Welle

[California Polytechnic State University]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (2)



Ausbreitung
einer Wellenfront

$$\text{mit } c = \frac{s}{t_0}$$

⇒ Abstandsmessung

$$d = \frac{c \cdot t_0}{2}$$

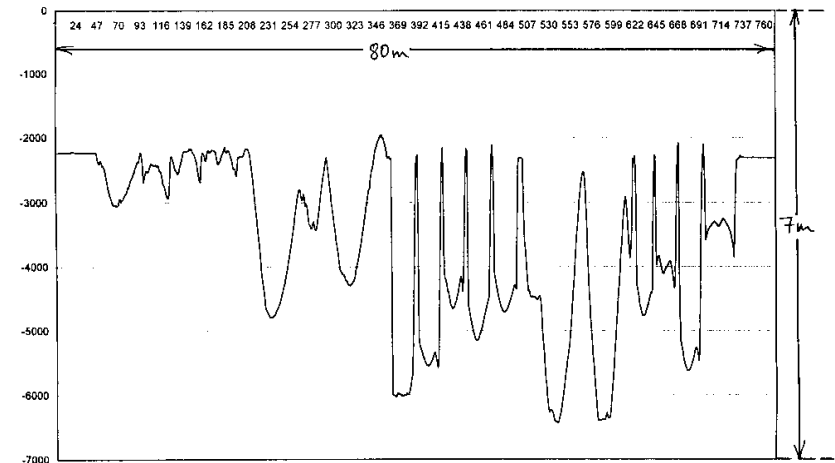
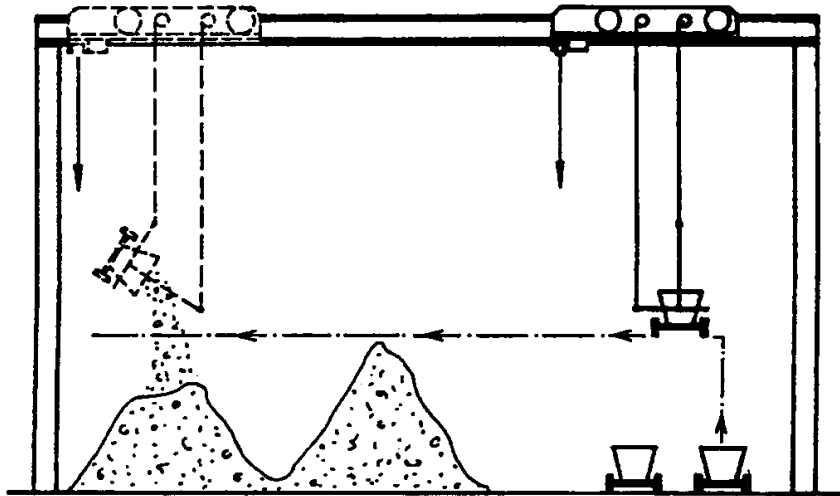
Prinzip der Laufzeitmessung (Time-of-flight measurement)

[VEGA, D. Brumbi: Level Measurement]

Messprinzip	$c / \text{m/s}$	f_m / Hz	λ / m	$\Delta t_m / \text{s}$	n
Radar	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{10}$?	$1 \cdot 10^{-9}$?
Laser	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{14}$		$1 \cdot 10^{-9}$	

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (3)



**Laserpuls-Laufzeitverfahren:
Anwendung Lagerplatzkontrolle und Füllstandsmessung**
[IBE0, LASE GmbH]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (4)



**Laserpuls-Laufzeitverfahren:
Anwendung 3D-Haldenprofilierung (Übersichtsaufnahmen)**

[PWH Anlagen und System mbH]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

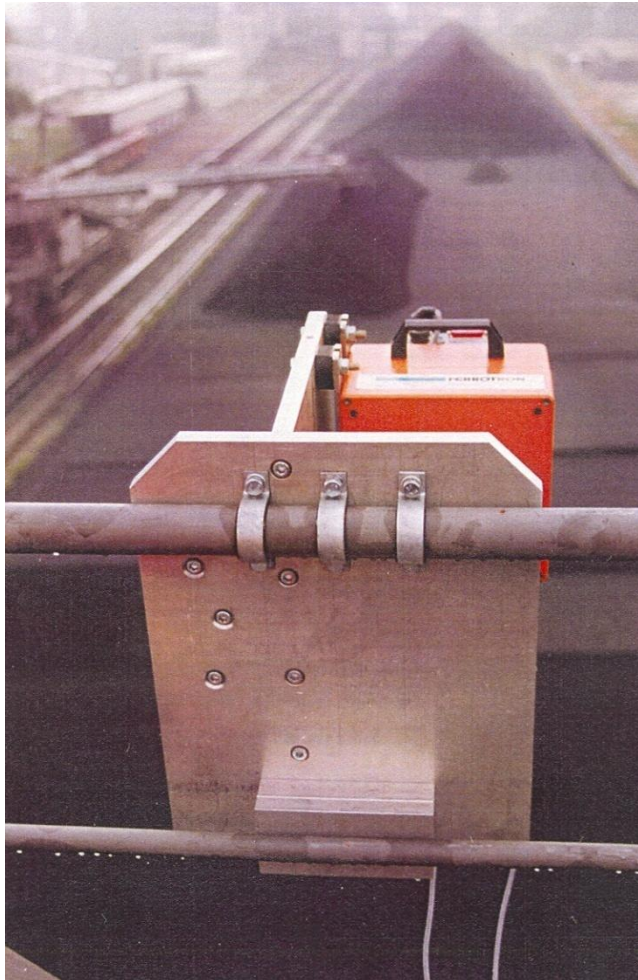
5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (5)



**Laserpuls-Laufzeitverfahren:
Anwendung 3D-Haldenprofilierung (Detailaufnahmen)**
[Krupp Entwicklungszentrum]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (6)

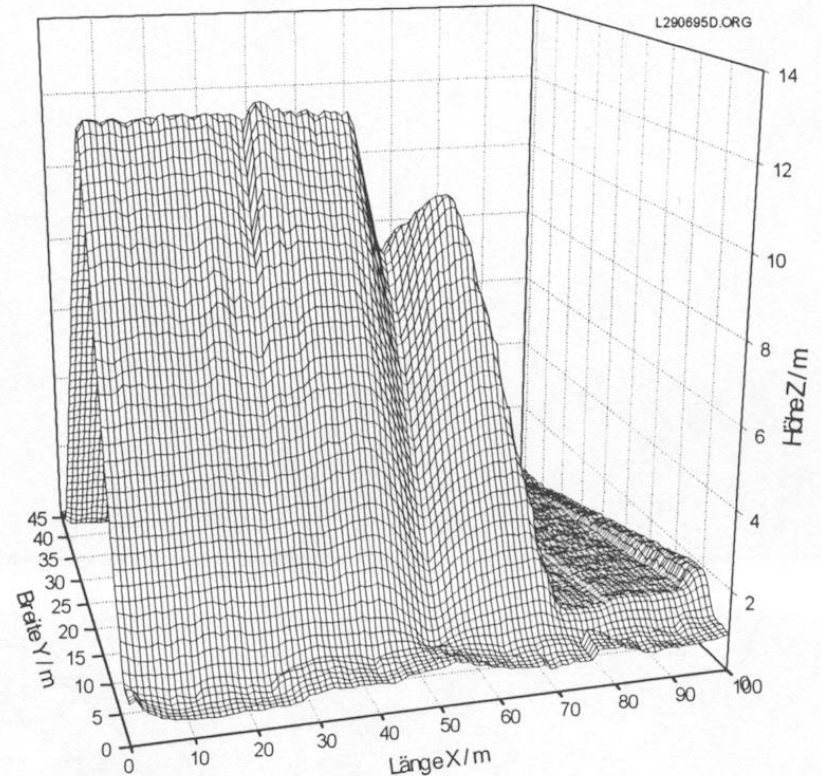
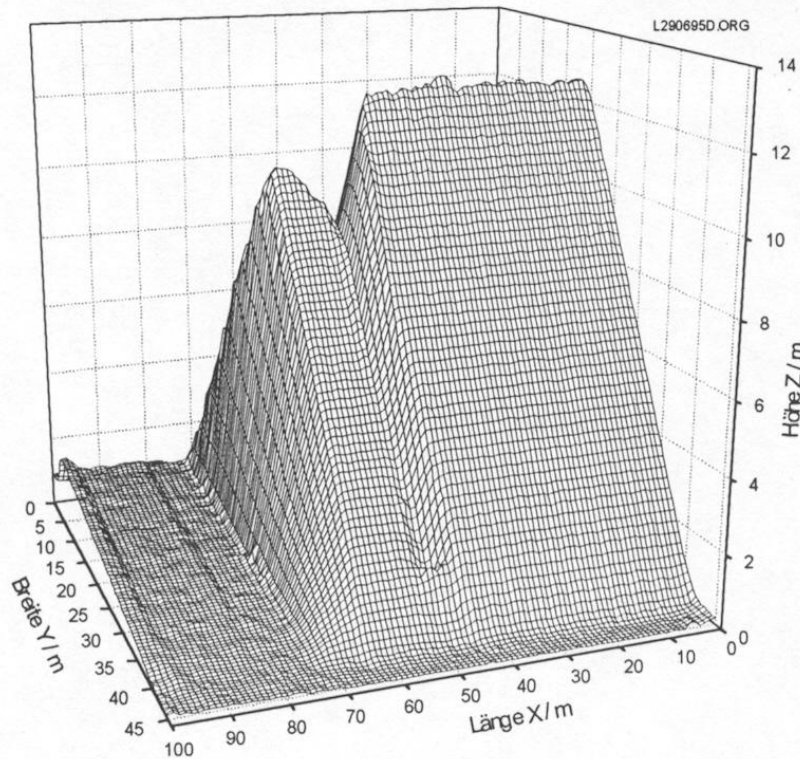


**Laserpuls-Laufzeitverfahren:
Anwendung 3D-Haldenprofilierung
(Detailaufnahmen im Betrieb)**

[Krupp Entwicklungszentrum]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

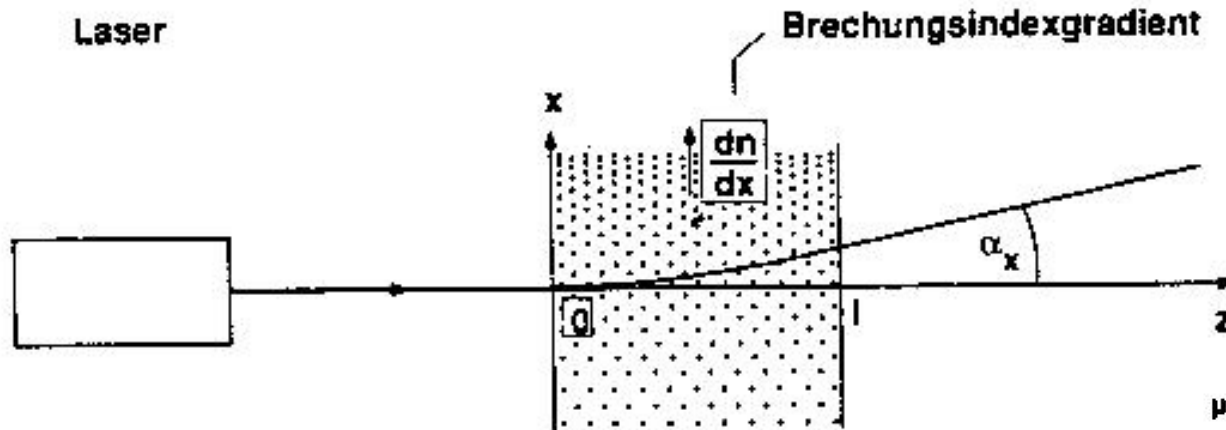
5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (7)



**Laserpuls-Laufzeitverfahren:
Anwendung 3D-Haldenprofilierung (Ergebnisse)**
[Krupp Entwicklungszentrum]

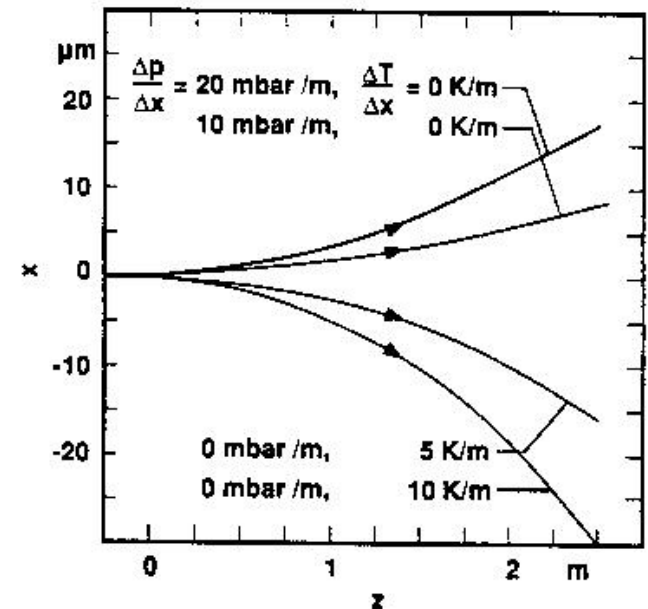
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (8)



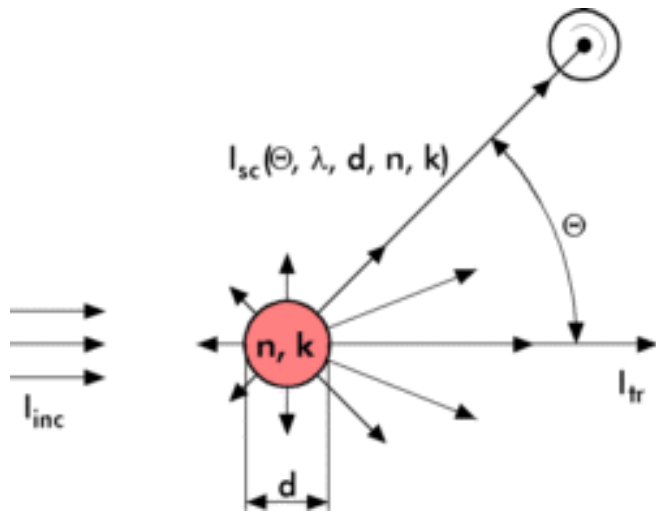
Messfehler bei lasergestützten Messungen

[A. Donges, R. Noll: Lasermesstechnik]



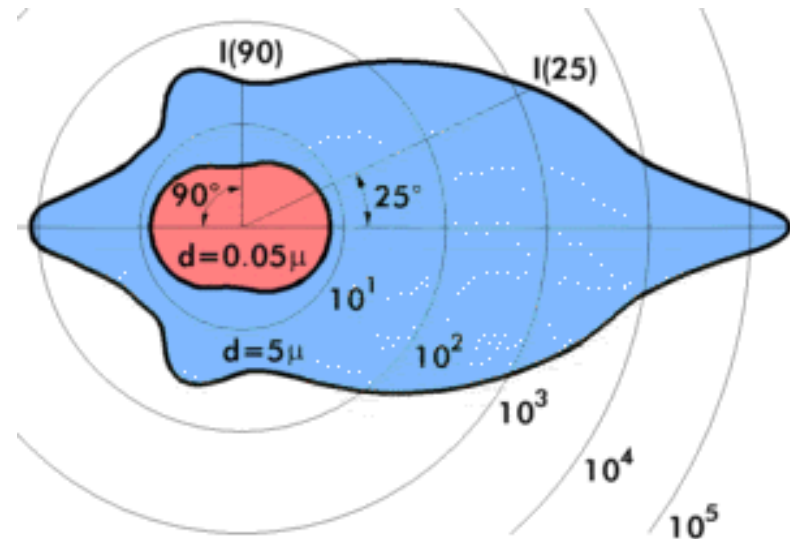
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (9)



**Lichtstreuung
an kugelförmigem Teilchen**

[Sigrist]

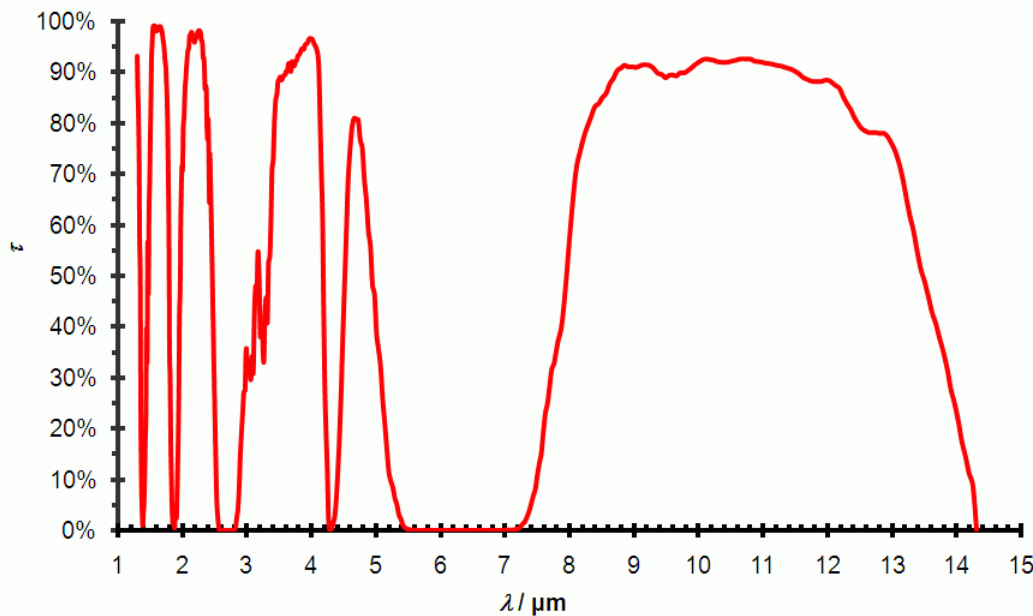


**Streulichtintensitätsverteilung für polydisperse
Suspensionen von SiO_2 in Wasser**

[Sigrist]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (10)



**Transmission elektromagnetischer Strahlung
innerhalb der Atmosphäre (Höhe: 750 m)**

[www.mjan.de, erstellt mit LOWTRAN]

Schwächungsgesetz
(Lambertsches Gesetz)

$$I(s) = I_0 \cdot e^{-\mu(\lambda) \cdot s}$$

⇒ Schichtdickenmessung

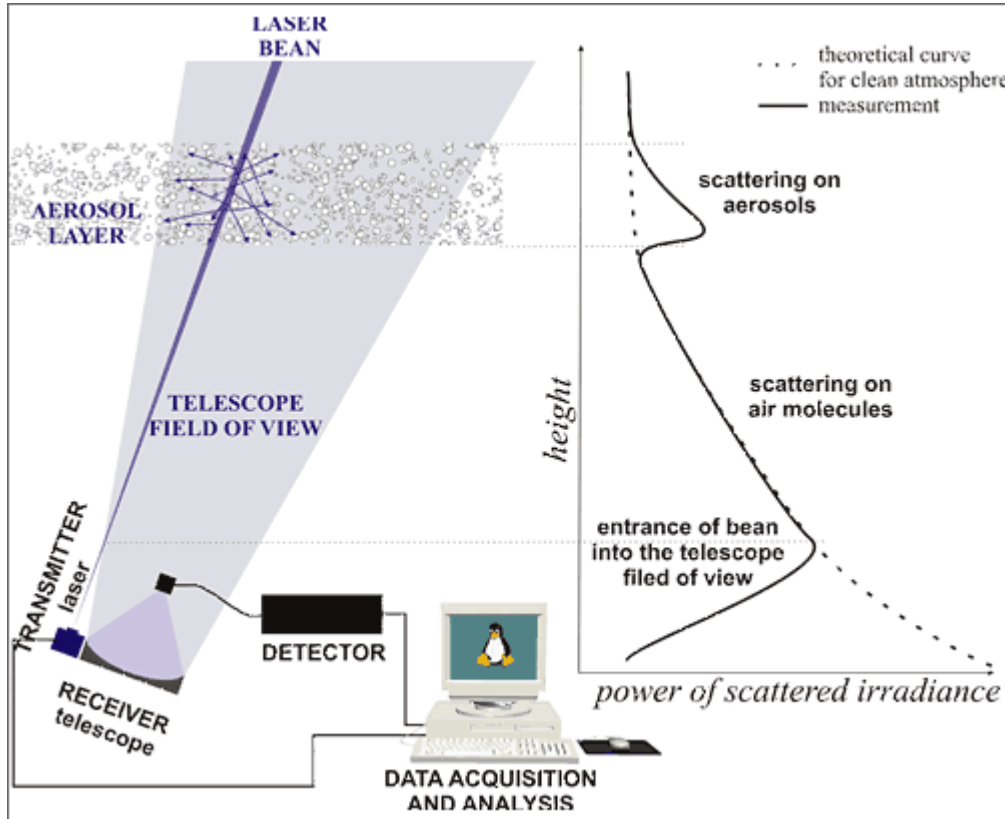
Lambert-Beersches Gesetz

$$I(s) = I_0 \cdot e^{-\left(\sum_i c_i \cdot \varepsilon_i(\lambda)\right) \cdot s}$$

⇒ Konzentrationsbestimmung

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (11)



LIDAR zur Atmosphärenerkundung

[University of Nova Gorica, Otlica-Observatorium, Slowenien]

Ausbreitung einer Wellenfront
und Streuung an Streupartikeln

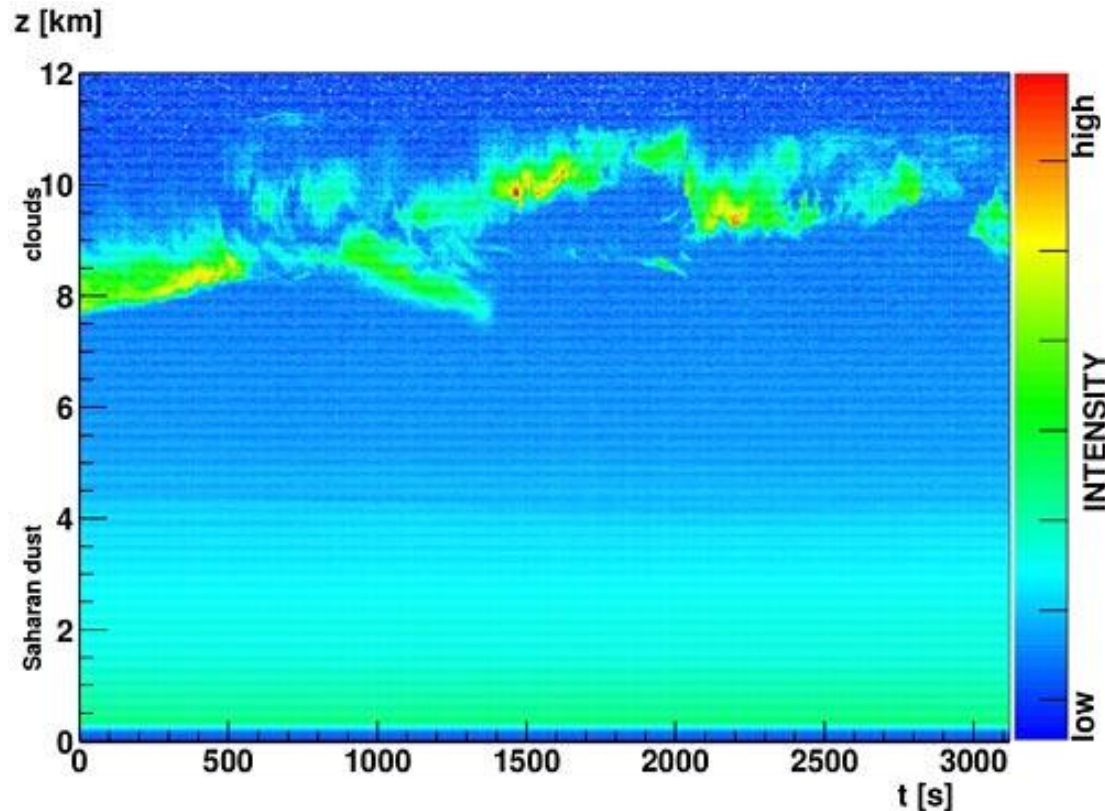
⇒ Abstandsmessung $d = \frac{c \cdot t_0}{2}$

Photometrisches Grundgesetz

$$E_v = \frac{I_v \cdot \cos \alpha}{d^2}$$

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (12)



LIDAR-Messergebnisse

[University of Nova Gorica, Otlica-Observatorium, Slowenien]

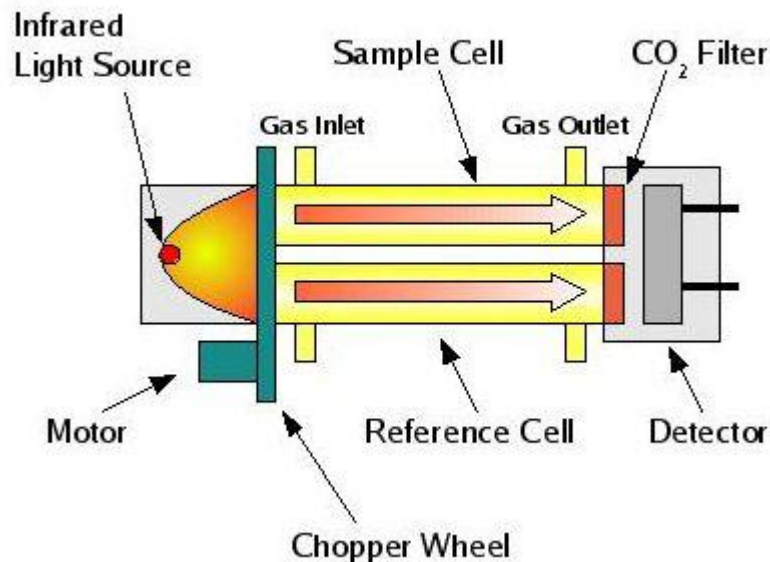


Mobile LIDAR-Systeme

[www.Optics.org; E.ON Ruhrgas/DLR]

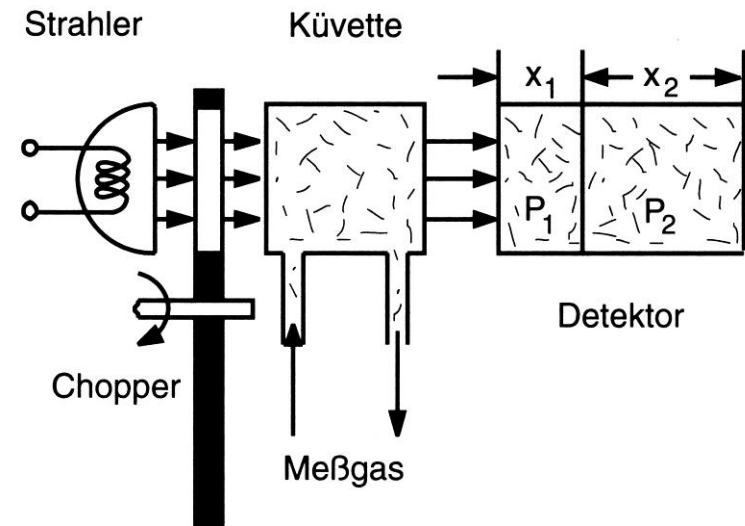
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (13)



NDIR-Sensor mit selektiver Filterung

[National Oceanic and Atmospheric Administration]

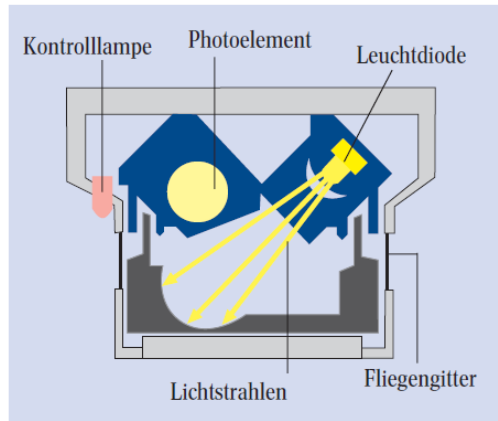


NDIR-Sensor mit optopneumatischem Doppelschichtdetektor

[J. Niebuhr, G. Lindner: Physikalische Messtechnik mit Sensoren]

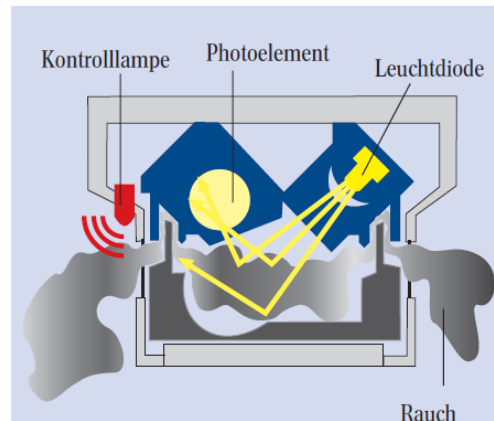
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (14)



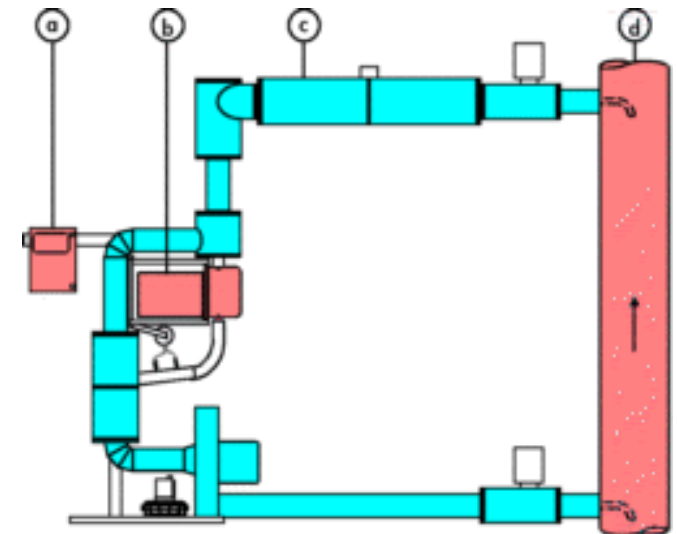
Photoelektrischer Rauchmelder (Prinzip)

[Physik Journal]



Photoelektrischer Rauchmelder (Technische Ausführung)

[www.feuerschutzsho.de]



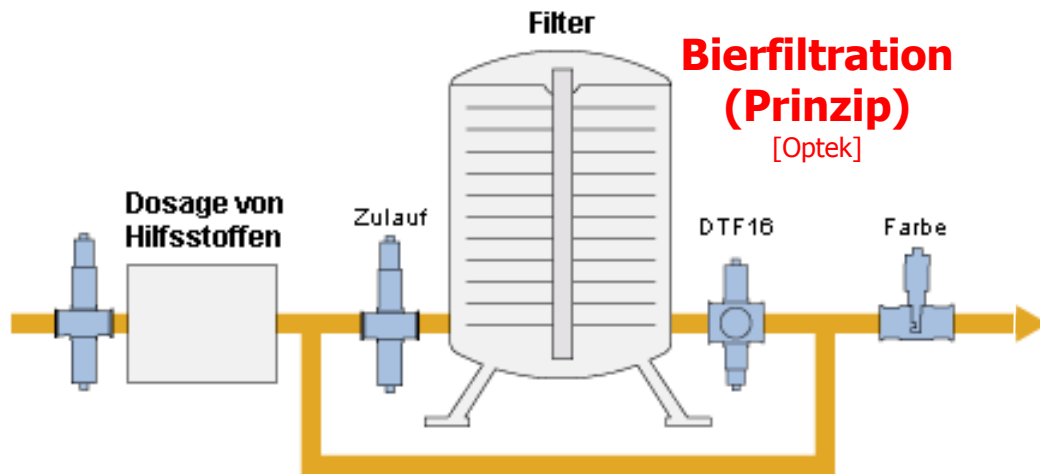
Extraktive Streulichtmessung mit Rauchgasaufheizung

[Sigrist]

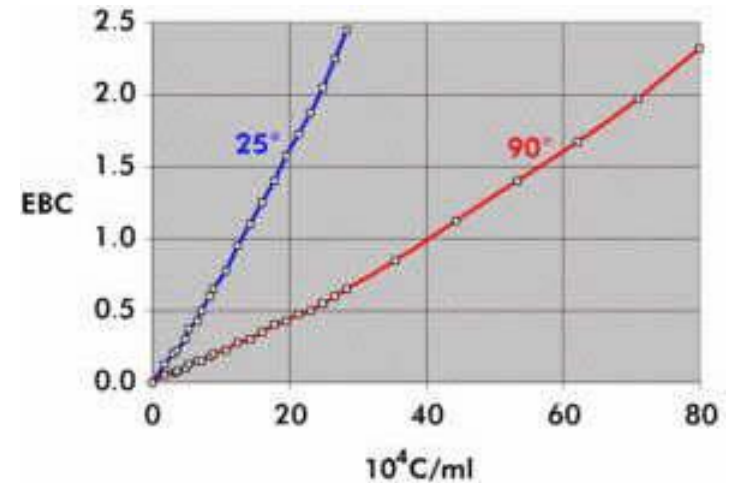
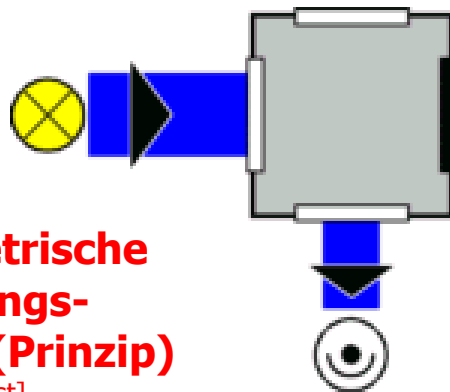
- a: Steuerung
- b: Streulichtphotometer
- c: Ringleitung mit Heizung
- d: Abgaskamin

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (15)



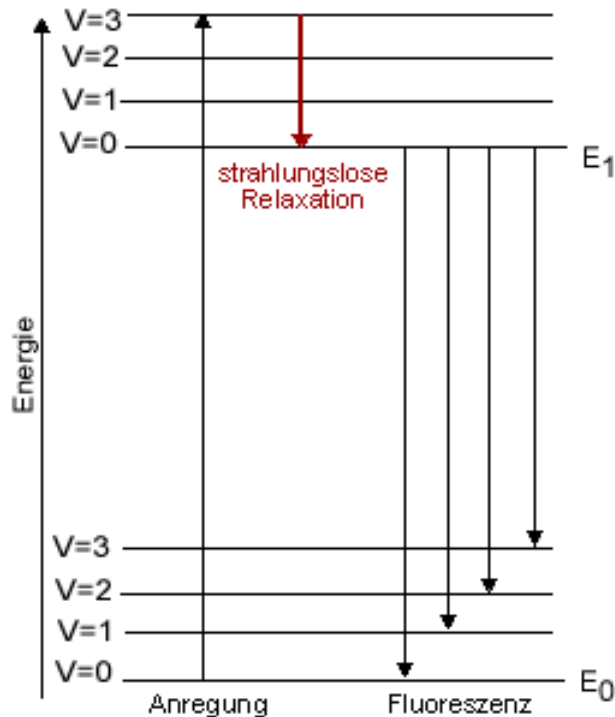
Photometrische Trübungsmessung (Prinzip)
[Sigrist]



Trübungsmessdaten an Hefesuspension
[Sigrist]

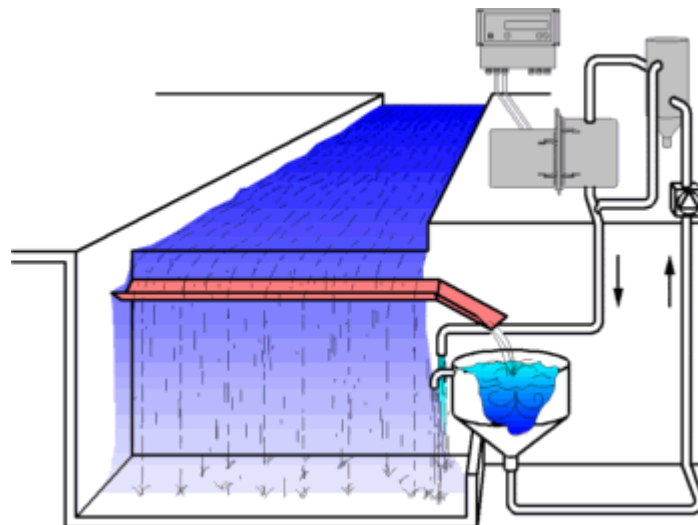
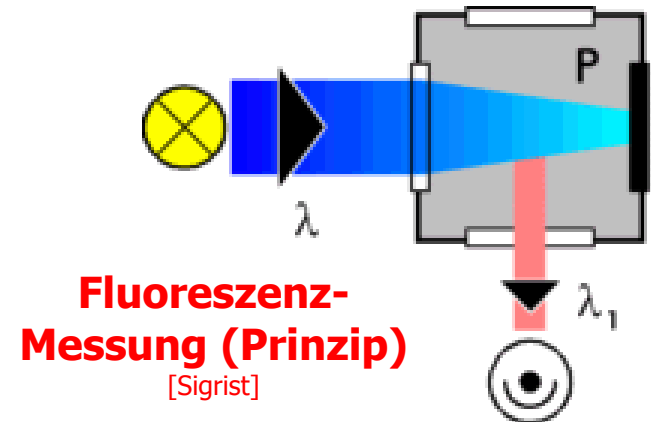
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (16)



Fluoreszenz (Prinzip)

[www.chemgapedia.de]

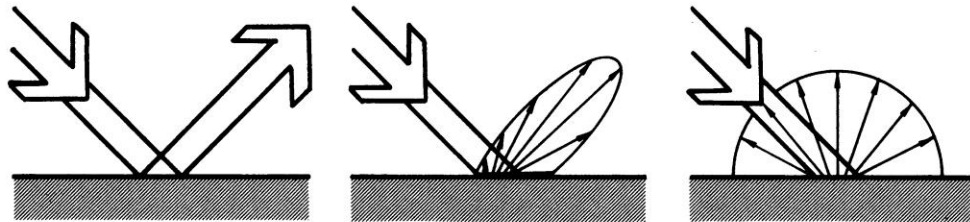


Fluoreszenz-Messung im Abwasserkanal

[Sigrist]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (17)



Strahldichtevertelung bei Streuung an verschiedenen Oberflächen

[H.-J. Hentschel: Licht und Beleuchtung]

Material	Reflexionsgrad / %
Weißes Papier	80
Pappkarton	70
Kork	35
Ungehobeltes Tannenholz	20
Autoreifen	1,5
Kupfer	37-56
Silber	77-93
Bismut	42-52
Chrom	63-68
Nickel	41-62

Ideale diffuse Reflexion
(Lambert-Verteilung)

$$I_e(\vartheta) = I_e(0) \cdot \cos \vartheta$$

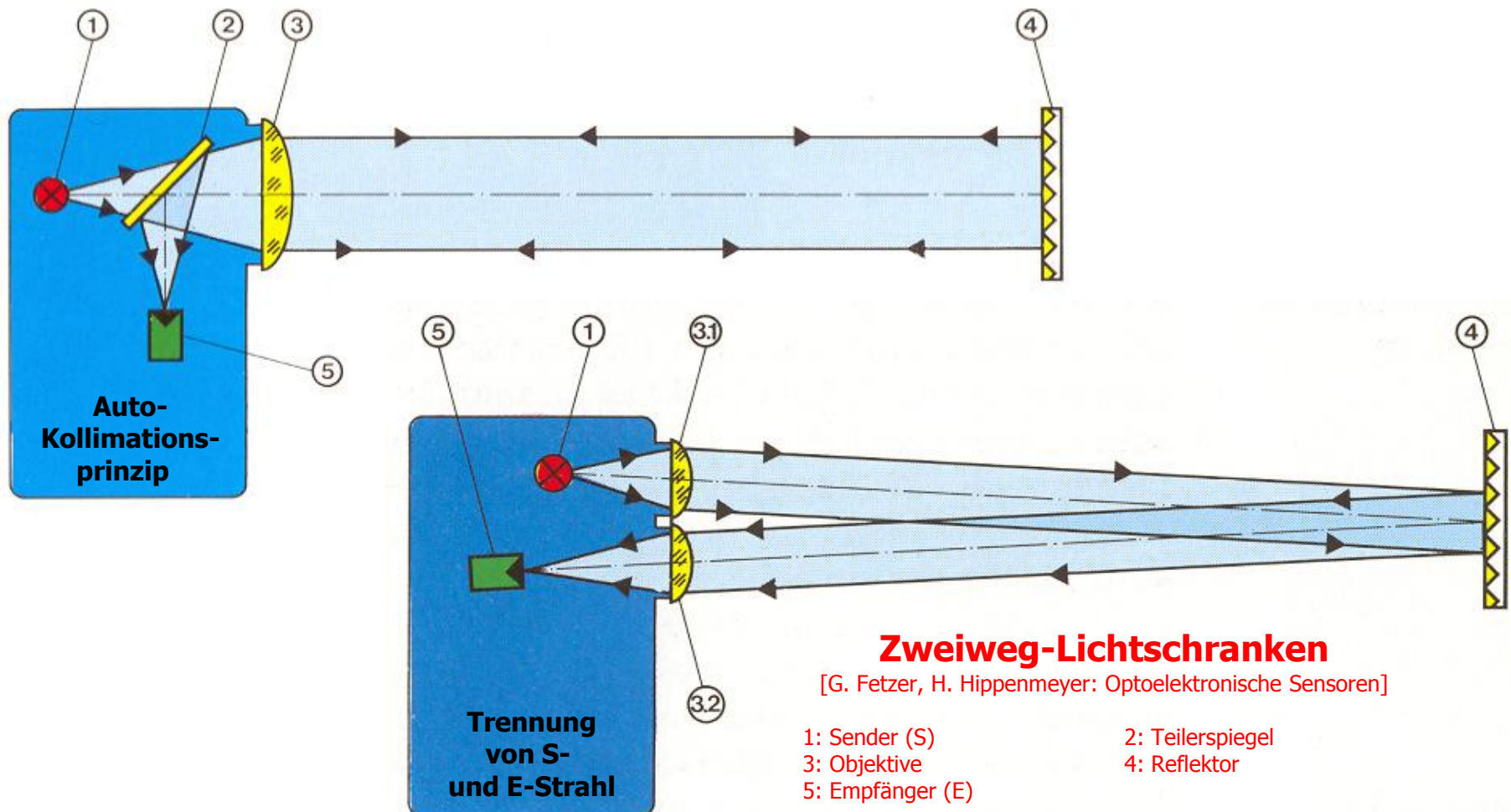
$$L_e(\vartheta) = \frac{dI_e}{dA_{\perp}} = \frac{dI_e}{dA \cdot \cos \vartheta} = \text{const}$$

Reflexionsgrad verschiedener Stoffe

[R. Zingg: Reflexionslichttaster mit aktiver Hintergrundausblendung;
H. Lindner: Physik für Ingenieure]

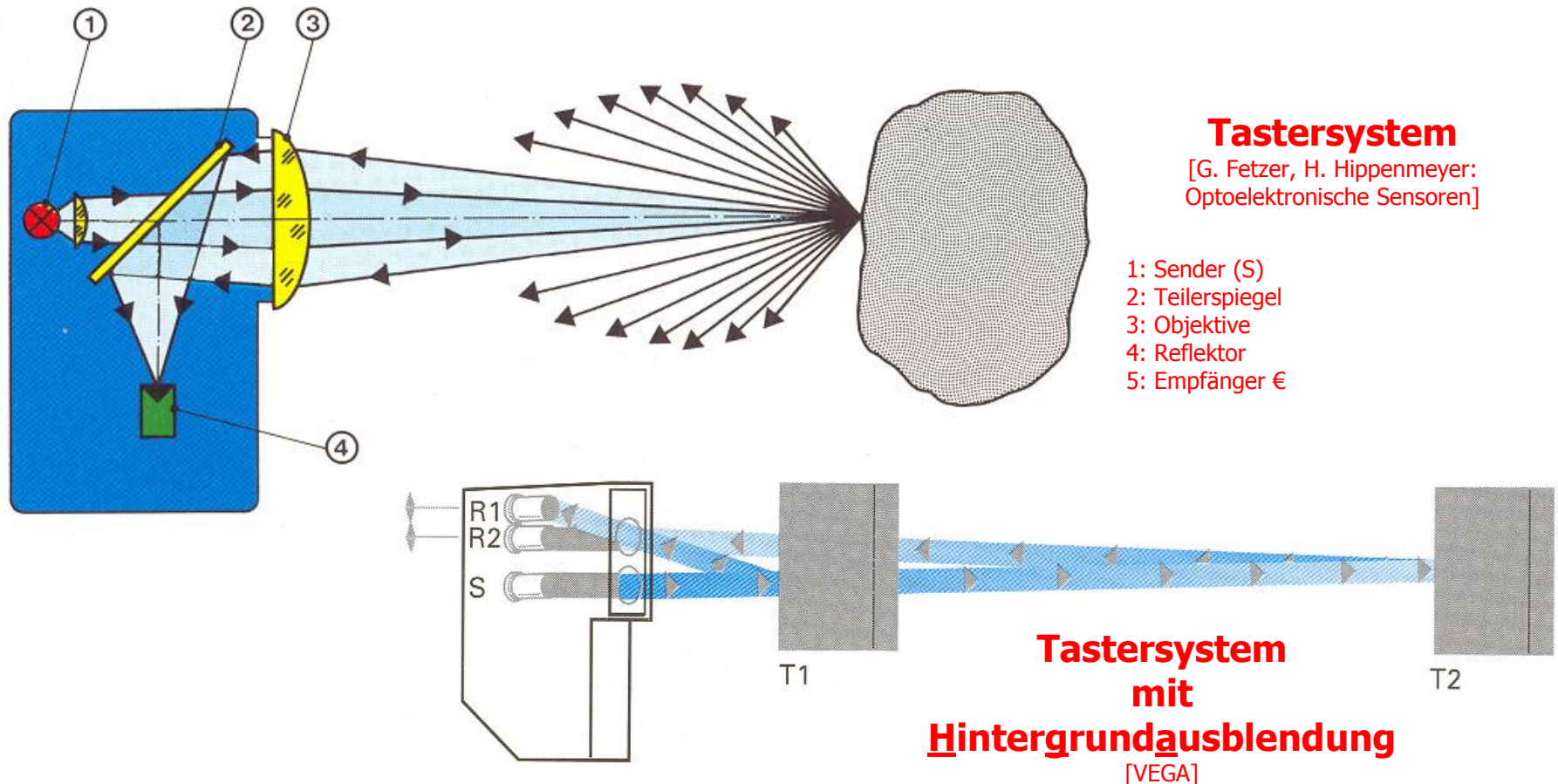
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (18)



5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (19)



5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (20)



**Taster-
applikation
Wafer-
Prüfung**
[SICK]

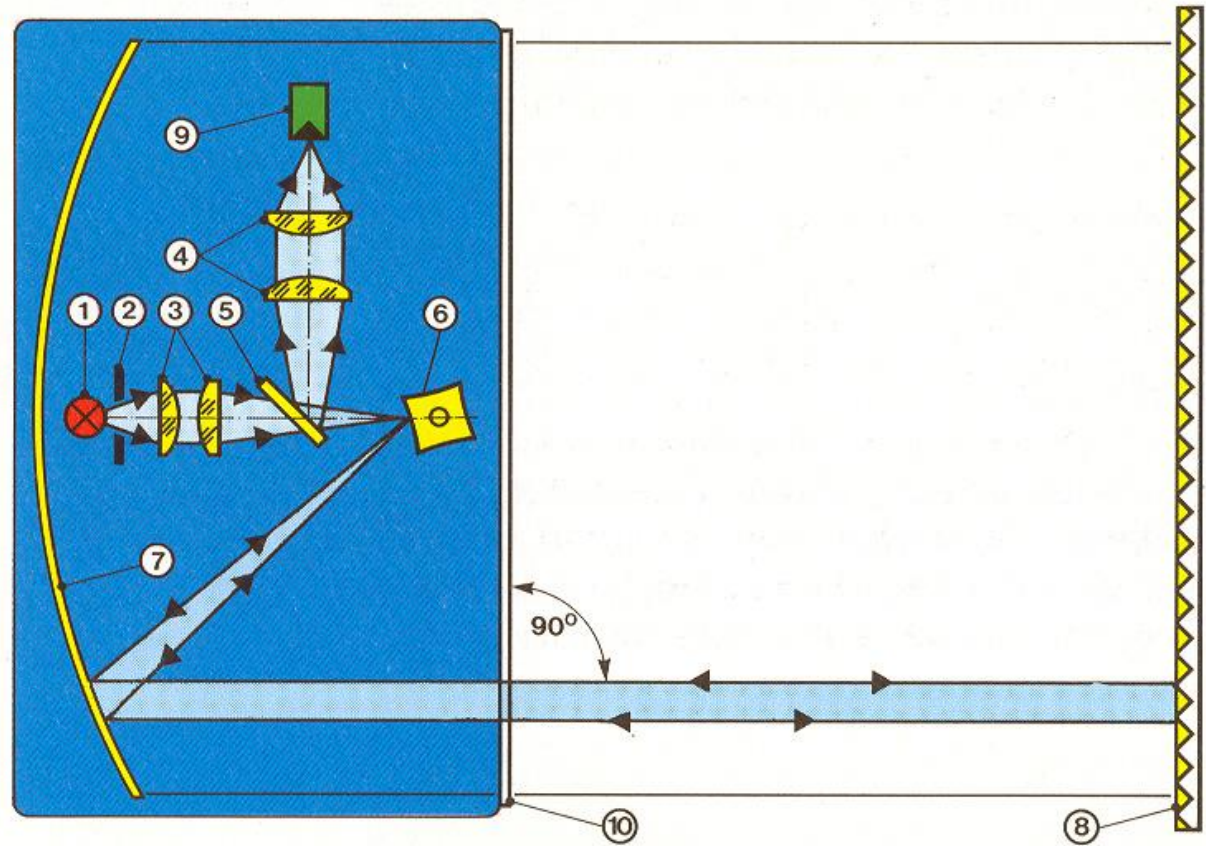
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (21)

Lichtvorhang nach Fahrstrahlprinzip

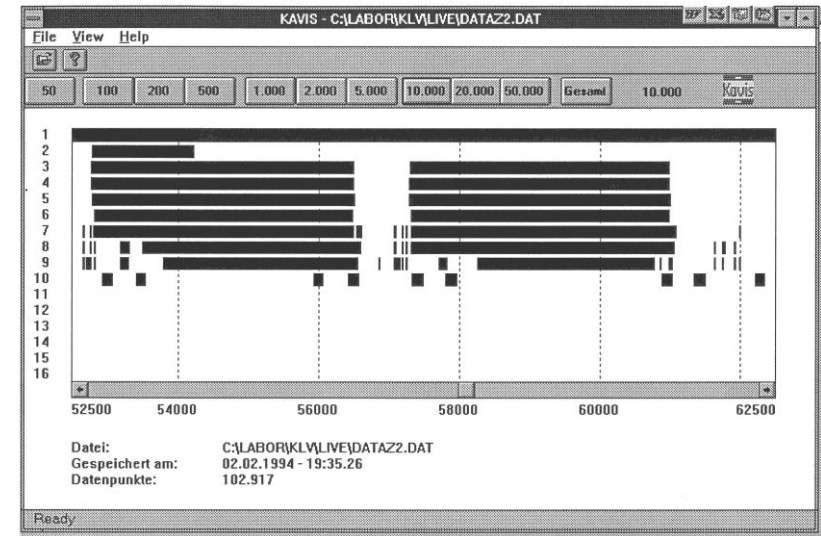
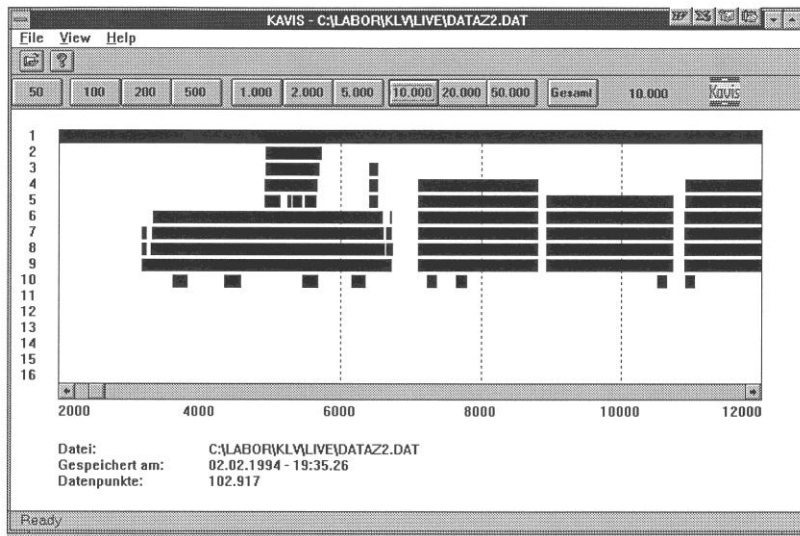
[G. Fetzer, H. Hippenmeyer:
Optoelektronische Sensoren]

- 1: Sender (S)
- 2: Blende
- 3: Sendekondensor
- 4: Empfangskondensor
- 5: Teilerspiegel
- 6: Ablenkeinheit
- 7: Hohlspiegel
- 8: Reflektor
- 9: Empfänger (E)
- 10: Austrittsscheibe



5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

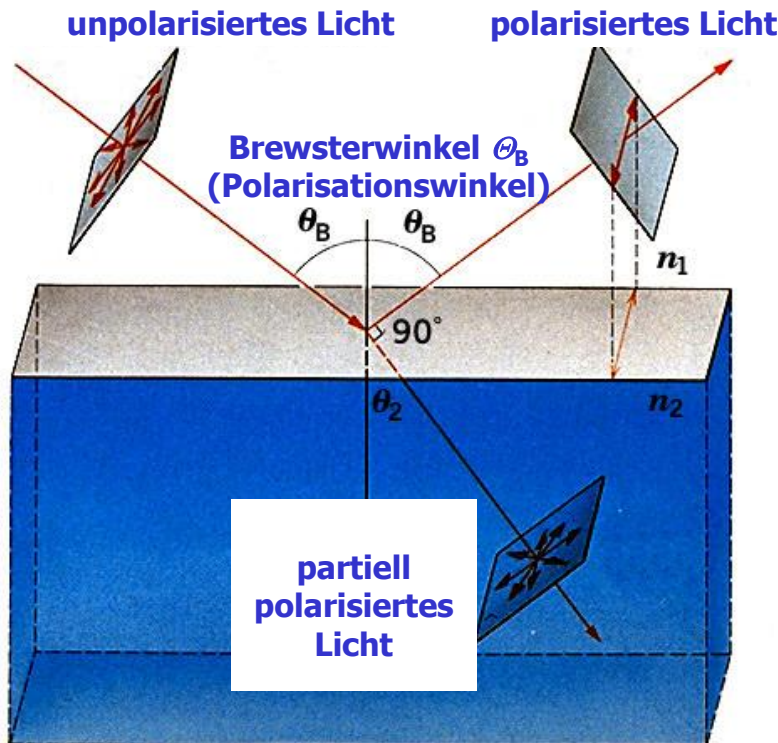
5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (22)



**Applikation eines Einweg-Laserlichtschrankenvorhangs:
Erfassung von Zugbelastungen
(Projekt des Kombinierten Ladeverkehrs)
[Krupp Entwicklungszentrum]**

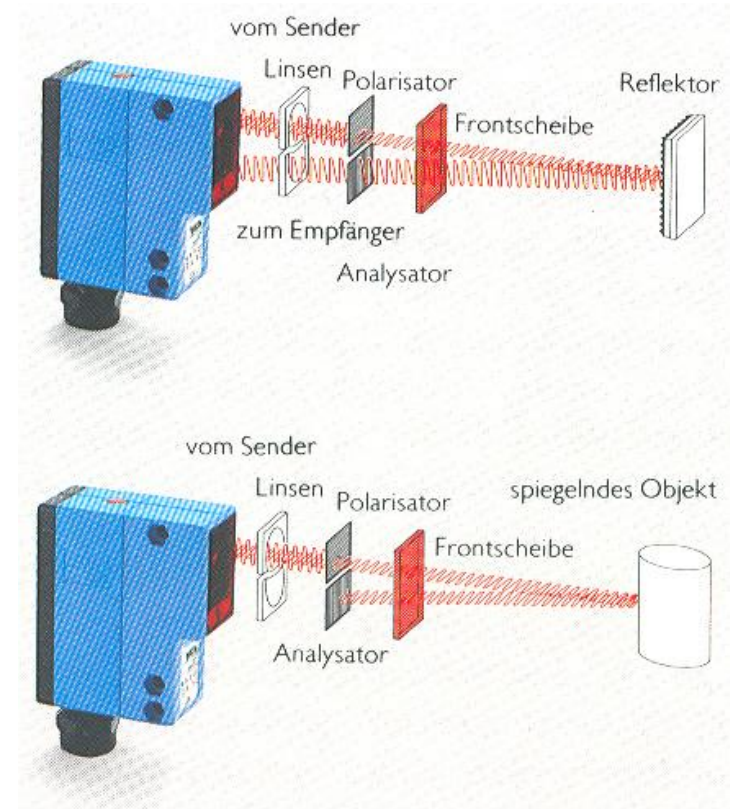
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (23)



Partielle Polarisation

[Brock University, John Wiley & Sons]



Einsatz von Polarisationsfiltern in Reflexionslichtschranken

[G. Fetzner, H. Hippenmeyer: Optoelektronische Sensoren]

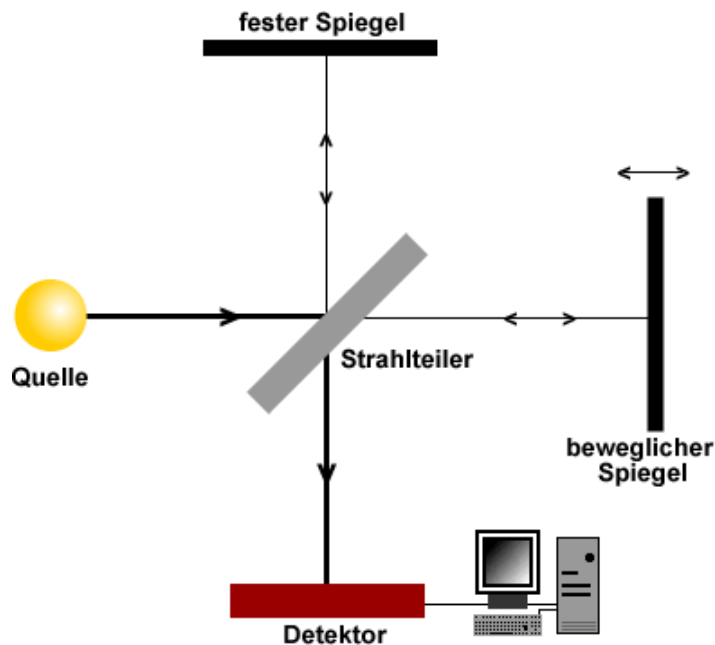
5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (24)

Interferenzmaxima: $\Delta x = n \cdot \lambda_0, n \in \mathbb{Z}$

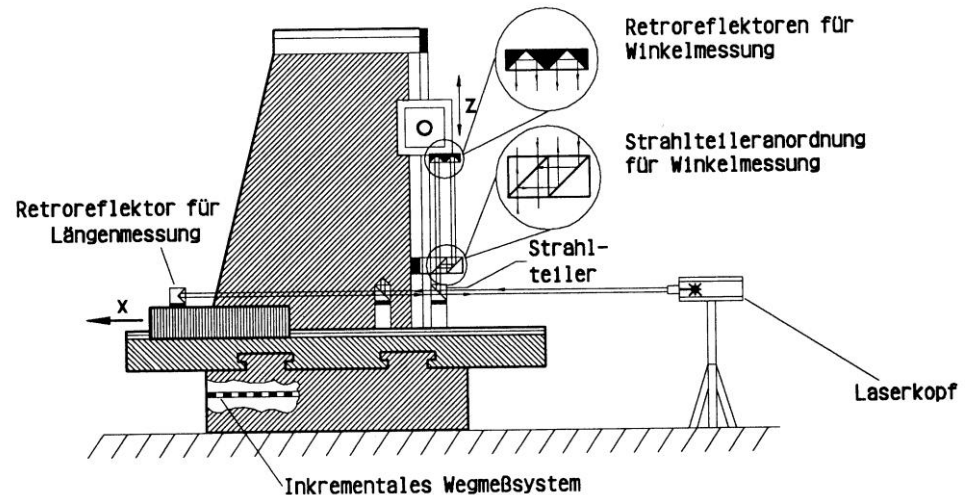
Interferenzminima: $\Delta x = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_0, n \in \mathbb{Z}$

⇒ Längen-und Winkelmessungen



Michelson-Interferometer (Prinzip)

[www.chemgapedia.com]



Interferometerapplikation: Winkelmessung an Werkzeugmaschine

[T. Pfeiffer: Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung]

5. SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN UND DER OPTIK

5.2 SENSORPRINZIPIEN DER AUSBREITUNG ELEKTROMAGNETISCHER WELLEN (25)

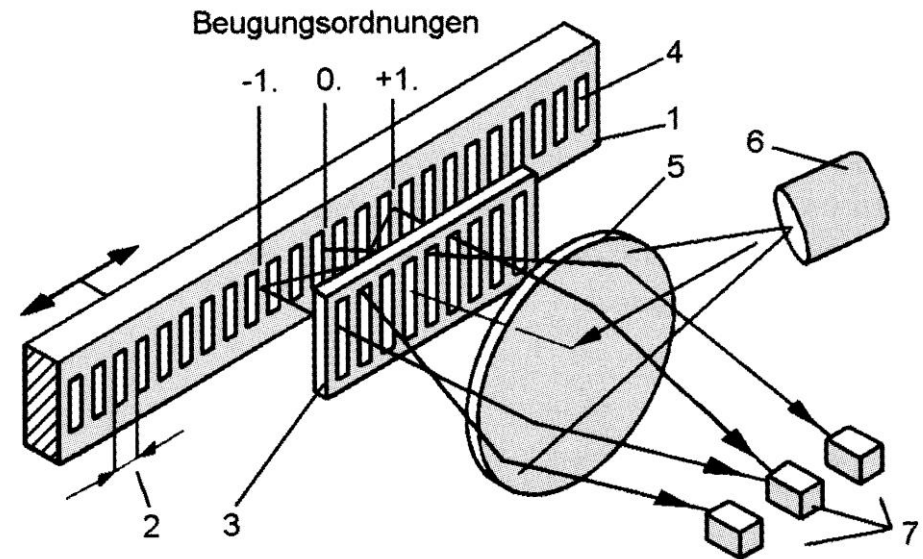
Beugungsmaxima:

$$\Delta L = d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda_0, n \in \mathbb{Z}$$

Beugungsminima:

$$\Delta L = d \cdot \sin \alpha = \left(n \pm \frac{1}{N} \right) \cdot \lambda_0, n \in \mathbb{Z}$$

⇒ Längenmessungen



Interferenzielles Messsystem

[S. Hesse, G. Schnell: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation]

- 1: Maßstab
- 3: Abtastplatte
- 5: Kondensorlinse
- 7: Detektoren

- 2: Teilungsperiode
- 4: Maßstab
- 6: Lichtquelle