

Messung der Brechzahl von Luft mit einem Mach-Zehnder Interferometer

Versuchsziele

- Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers
- Beobachtung der Veränderung des Interferenzmusters beim Evakuieren einer zuvor in den Strahlengang gebrachten Kammer
- Bestimmung der Brechzahl von Luft

Grundlagen

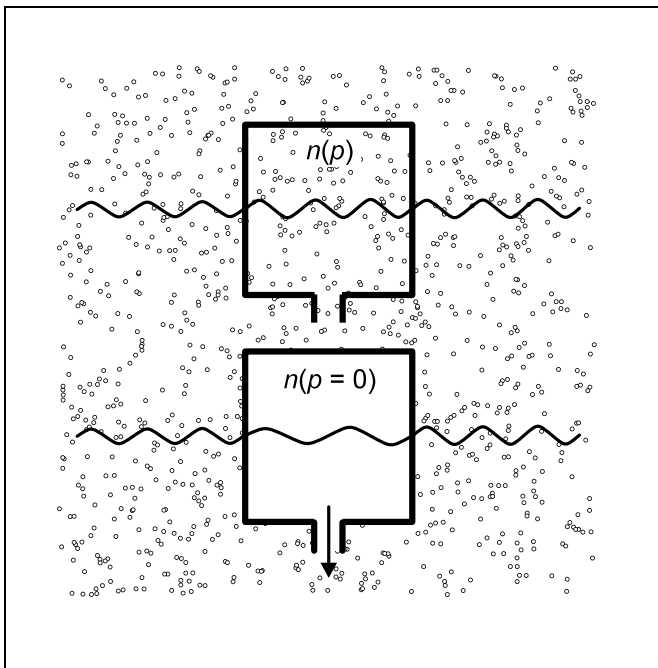
Interferometrie ist eine sehr genaue und empfindliche Meßmethode zur Bestimmung z. B. von Längenänderungen, Schichtdicken, Brechungsindizes und Wellenlängen. Das Mach-Zehnder-Interferometer gehört wie das Michelson-Interferometer zur Familie der Zweistrahlinterferometer. Es basiert auf folgendem Prinzip:

Der aus einer geeigneten Quelle kommende kohärente Lichtstrahl wird durch ein optisches Bauelement in zwei Teile aufgespalten. Diese Teilstrahlen durchlaufen dann unterschiedliche Wege, werden durch Spiegel abgelenkt und an einem weiteren optischen Bauelement wieder zusammengeführt, wodurch sie sich überlagern. Es entsteht ein Interferenzbild. Ändert sich nun bei einem dieser Teilstrahlen die optische Weglänge, d.h. das Produkt aus Brechzahl und geometri-

ischem Weg, so erfährt er eine Phasenverschiebung gegenüber dem ungestörten Strahl. Daraus folgt eine Änderung des Interferenzbildes, aus der Rückschlüsse auf die Änderung der optischen Weglänge gezogen werden können.

Im Gegensatz zum Michelson-Interferometer werden die Lichtstrahlen nach der Strahlteilung nicht in sich reflektiert, sondern durchlaufen bis zur Wiedervereinigung eigene Wege. Dadurch sind Messungen an transparenten Materialien, z.B. zur Messung der Brechzahl, einfacher durchschaubar und damit didaktisch einleuchtender. Die Bestimmung von geometrischen Längenänderungen ist dagegen nicht möglich.

Zur Ermittlung der Brechzahl von Luft wird eine evakuierbare Kammer in den Gang eines Teilstrahls des Interferometers gebracht. Durch langsames Evakuieren der Kammer ändert man die optische Weglänge des betroffenen Teilstrahls. Aus der Veränderung des Interferenzmusters und der dazugehörigen Druckänderung kann man die Brechzahl von Luft bestimmen. Die Messung ist auch mit dem Michelson-Interferometer möglich. Dann muß man allerdings berücksichtigen, daß der Lichtstrahl die Kammer zweimal durchläuft.



Geräte

| | |
|---|---------|
| 1 Laseroptik-Grundplatte | 473 40 |
| 1 He-Ne-Laser, linear polarisiert | 471 840 |
| 1 Laserträger | 473 41 |
| 6 Optik-Füße | 473 42 |
| 2 Strahlteiler | 473 432 |
| 2 Halter für Strahlteiler | 473 43 |
| 2 Planspiegel, feinjustierbar | 473 46 |
| 1 Kugellinse, $f = 2,7$ mm | 473 47 |
| 1 Evakuierbare Kammer | 473 485 |
| 1 Durchscheinender Schirm | 441 53 |
| | |
| 1 Vakuum- und Druck-Handpumpe | 375 58 |
| | |
| 1 Kleiner Stativfuß, V-förmig | 300 021 |
| 1 Universal-Stativklemme S | 666 555 |
| 1 Sockel | 300 11 |
| 1 Holzmaßstab | 311 03 |

Sicherheitshinweis

Der He-Ne-Laser genügt den „Sicherheitstechnischen Anforderungen für Lehr-, Lern- und Ausbildungsmittel – Laser; DIN 58126 Teil 6“ für Laser der Klasse 2. Bei Beachtung der entsprechenden Hinweise in der Gebrauchsanweisung ist das Experimentieren mit dem He-Ne-Laser ungefährlich.

- Nicht in den direkten oder reflektierten Laserstrahl blicken.
- Überschreiten der Blendungsgrenze vermeiden (d.h. kein Beobachter darf sich geblendet fühlen).

Aufbau

Hinweis: Optische Komponenten mit beschädigten oder verschmutzten Oberflächen können Störungen im Interferenzmuster hervorrufen:

Planspiegel, Strahlteiler und Kugellinse sorgfältig behandeln, staubfrei aufbewahren und nicht mit bloßen Händen anfassen.

Die Anordnung des Mach-Zehnder-Interferometers auf der Laseroptik-Grundplatte ist in Fig. 1 dargestellt. Die Bauteile müssen in Bezug auf die Geometrie des Strahlenverlaufs besonders sorgfältig ausgerichtet werden. Zum Aufbau sind folgende Schritte notwendig:

Laseroptik-Grundplatte und Laser:

- Luftpolster aufpumpen.
- Laseroptik-Grundplatte **(a)** mit Luftpolster waagrecht auf stabilem Experimentiertisch aufstellen.
- Laser auf Laserträger montieren und am linken Rand der Grundplatte plazieren.
- Laser anschließen und einschalten.
- Kontermuttern der drei Justierschrauben des Laserträgers lösen.
- Höhe und Neigung des Lasers mit Hilfe der Justierschrauben so ausrichten, daß sein Strahl genau waagrecht etwa 75 mm über der Grundplatte verläuft (für Nachjustierung bleibt dann genügend Spielraum); mit Maßstab nachmessen.
- Kontermuttern wieder festziehen.

Vorjustierung:

- kontrollieren, ob Strahlteiler **(b)** und **(c)** das Laserlicht waagrecht reflektieren; dazu die Strahlteiler mit Optik-Fuß jeweils am anderen Ende der Laseroptik-Grundplatte in den Strahlengang stellen und den Lichtstrahl neben die Austrittsöffnung des Lasers reflektieren.
- ggf. den Neigungswinkel der Strahlteiler und somit den Strahlverlauf mit Hilfe der zwei Schrauben am Stiel korrigieren.
- Planspiegel **(d)** und **(e)** mit Hilfe der oberen Justierschraube so einstellen, daß sie das Laserlicht waagrecht reflektieren; dazu die Planspiegel mit Optik-Fuß jeweils am anderen Ende der Laseroptik-Grundplatte in den Strahlengang stellen und den Lichtstrahl neben die Austrittsöffnung des Lasers reflektieren.

Strahlteiler und Planspiegel:

Hinweise:

Bei leicht verdunkeltem Raum ist die Justierung einfacher.

Neben den Hauptstrahlen treten durch Vielfachreflexionen noch weitere, sog. parasitäre Teilstrahlen mit geringerer Intensität auf. Diese werden später durch den Linsenhalter ausgeblendet. Die weiteren Angaben beziehen sich nur auf die Hauptstrahlen.

Reflektierter und transmittierter Teilstrahl sollten jeweils ähnliche Intensitäten haben:

Bei Verwendung des variablen Strahlteilers (473 435) darauf achten, daß der Laserstrahl den Strahlteiler etwa in der Mitte trifft.

- Strahlteiler **(b)** mit Optik-Fuß gemäß Fig. 1 unter einem Winkel von 45° in den Strahlengang bringen; dabei die teildurchlässige Schicht des Strahlteilers am besten dem Laser zuwenden.

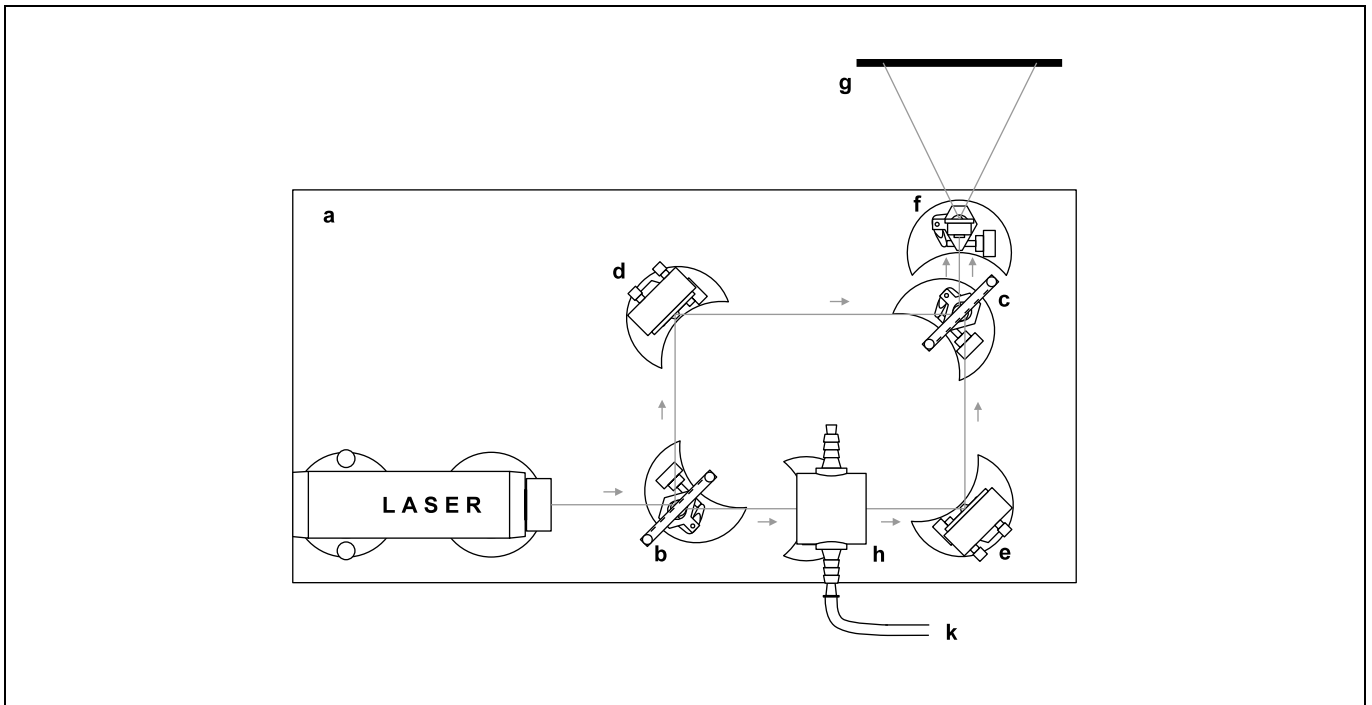


Fig. 1: Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers auf der Laser-optik-Grundplatte mit der evakuierbaren Kammer, von oben betrachtet

- a Laseroptik-Grundplatte
- b,c Strahlteiler
- d,e Planspiegel, feinjustierbar
- f Kugellinse
- g Durchscheinender Schirm
- h Evakuierbare Kammer
- k Schlauchverbindung zur Vakuumpumpe

- Planspiegel (d) so in den vom Strahlteiler (b) reflektierten Teilstrahl stellen, daß er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird.
- den Planspiegel durch Drehen des Optik-Fußes auf der Interferometer-Grundplatte so ausrichten, daß der Strahl um 90° abgelenkt wird und parallel zum transmittierten Teilstrahl verläuft.
- Planspiegel (e) entsprechend Fig. 1 in den transmittierten Teilstrahl gegenüber von Planspiegel (d) in den Aufbau fügen, so daß er zentrisch vom Laserstrahl getroffen wird.
- den Planspiegel ebenfalls durch Drehen des Optik-Fußes auf der Interferometer-Grundplatte so ausrichten, daß er den Teilstrahl um 90° ablenkt.
- durchscheinenden Schirm (g) im Sockel befestigen und gemäß Fig. 1 hinter der Laseroptik-Grundplatte so aufstellen, daß er mittig von dem vom Planspiegel (e) reflektierten Teilstrahl getroffen wird.
- Strahlteiler (c) antiparallel zu Strahlteiler (b) aufstellen, so daß er von beiden Teilstrahlen unter einem Winkel von 45° getroffen wird, wobei die teildurchlässige Schicht dem Schirm (g) abgewandt ist.

Nachjustierung:

Die Aufstellung der Bauteile ist dann korrekt, wenn der Strahlenverlauf von Strahlteiler zu Strahlteiler ein Rechteck beschreibt:

- ggf. den Strahlenverlauf korrigieren.

- durch Nachjustieren der Planspiegel und der Strahlteiler die jeweils intensivsten Strahlen der beiden Reflexgruppen auf dem Schirm (g) zur Deckung bringen.
- Abstand des Schirms (g) zu zweiten Strahlteiler (c) verändern und überprüfen, ob die Reflexe der beiden Teilstrahlen nahezu übereinander bleiben, also hinreichend parallel verlaufen.

a) Nachjustierung des senkrechten Strahlenverlaufs:

Falls die Teilstrahlen in der senkrechten Ebene auseinanderlaufen:

- Höhe der Teilstrahlen über der Laseroptik-Grundplatte hinter jeder optischen Komponente exakt mit dem Holzmaßstab messen und ggf. die Neigung der Planspiegel und der Strahlteiler nachjustieren.
- die jeweils intensivsten Strahlen der zwei auf dem durchscheinenden Schirm erscheinenden Reflexgruppen durch Nachjustieren der Bauelemente zur Deckung bringen.
- Abstand des Schirms (g) zum zweiten Strahlteiler (c) erneut verändern, um die Parallelität der beiden Teilstrahlen zu überprüfen.
- ggf. die Nachjustierung wiederholen

b) Nachjustierung des waagerechten Strahlenverlaufs:

Im Idealfall verlassen die Teilstrahlen den Strahlteiler (c) nahezu an der gleichen Stelle und treffen sich auf dem durchscheinenden Schirm.

Falls die Teilstrahlen in der waagerechten Ebene auseinanderlaufen:

- Verlauf der Teilstrahlen von Strahlteiler (b) bis Strahlteiler (c) überprüfen und Ausrichtung der entsprechenden Bauteile korrigieren, falls der Strahlenverlauf nicht einem Rechteck entspricht.
- Planspiegel (e) parallel zur Längsseite der Laseroptik-Grundplatte verschieben und dabei so ausrichten, daß der von ihm reflektierte Teilstrahl mit dem vom Planspiegel (d) reflektierten Teilstrahl sowohl auf dem Strahlteiler (c) als auch auf dem durchscheinenden Schirm zur Deckung kommt.

Kugellinse:

- Kugellinse (**f**) (mit kleiner Eintrittsöffnung des Linsenhalters zum Strahlteiler zeigend) zwischen Strahlteiler (**c**) und durchscheinendem Schirm (**g**) auf der Laseroptik-Grundplatte plazieren.
- Kugellinse seitlich und in der Höhe so ausrichten, daß sie von beiden Teilstrahlen axial durchlaufen wird.
- evtl. den Strahlengang durch Nachjustieren eines Planspiegels etwas korrigieren.

Feinjustierung:

Falls noch kein Streifenmuster auf dem durchscheinenden Schirm zu erkennen ist:

- Strahlengang durch Ausrichtung der Strahlteiler oder der Spiegel geringfügig verändern; dabei ggf. die Kugellinse nachjustieren.

Breite und Abstand der Interferenzstreifen sind um so größer, je besser die Parallelität der beiden Teilstrahlen zwischen Strahlteiler (**c**) und Schirm (**g**) gewährleistet ist:

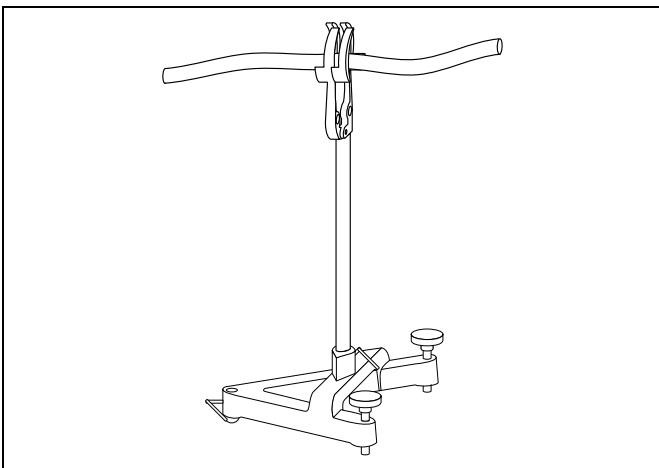
- durch kleine Veränderungen der Ausrichtung der Strahlteiler und der Spiegel das Interferenzmuster auf ein bequem beobachtbares Format einstellen.

Falls die Feinjustierung nicht zum Ziel führt:

- die Interferometeranordnung nochmals von Anfang an justieren.

Das Interferenzmuster ist wesentlich heller und somit einfacher zu beobachten, wenn der Laser auf 1 mW Ausgangsleistung umgeschaltet wird. Weil der Strahlengang dadurch geringfügig verändert werden kann, muß der Strahlenverlauf oder die Position der Kugellinse ggf. etwas nachjustiert werden.

Fig. 2: Anordnung der Zugentlastung für die Schlauchverbindung zur evakuierbaren Kammer

**Evakuierbare Kammer und Vakuum-Handpumpe:**

Hinweis: An den Glasflächen der evakuierbaren Kammer treten Reflexionen des Laserstrahls auf, die in ungünstigen Fällen in die Austrittsöffnung des Laserstrahls fallen und dadurch die Qualität des Laserstrahls beeinflussen:

In diesem Fall die Kammer etwas verdrehen.

- eine Schlauchwelle der evakuierbaren Kammer mit Stopfen (Lieferumfang) dicht verschließen.
- evakuierbare Kammer auf einem Optik-Fuß montieren und z. B. zwischen Strahlteiler (**b**) und Planspiegel (**e**) so in den Strahlengang bringen, daß sie axial vom Teilstrahl durchlaufen wird; Position der anderen Bauteile dabei nicht verändern.
- Vakuumpumpe über Schlauch an die andere Schlauchwelle der evakuierbaren Kammer anschließen, ohne die Kammer mit dem Schlauch von der Laseroptik-Grundplatte zu ziehen; dazu passenden Schlauchadapter aussuchen und in die Schlauchwelle stecken.
- Zugentlastung aus kleinem Stativfuß und Universal-Stativklemme S gemäß Fig. 2 aufbauen und Schlauch neben der Laseroptik-Grundplatte fixieren, damit die Messung nicht durch Verdrehen bzw. Verschieben der evakuierbaren Kammer verfälscht werden kann.

Durchführung

Während des Versuchs:

- mechanische Erschütterungen der Laseroptik-Grundplatte vermeiden (z. B. nicht am Tisch wackeln).
- Entstehung von Luftschlieren im Aufbau, z. B. durch Hineinatmen oder Durchzug, vermeiden.
- Position eines Intensitätsmaximums auf dem durchscheinenden Schirm (**g**) markieren, an der die vorbeiziehenden Interferenzstreifen gezählt werden können.
- Kammer (**h**) langsam evakuieren, bis das nächste Intensitätsmaximum genau auf die markierte Stelle gewandert ist.
- zugehörigen Unterdruck vom Manometer der Handpumpe ablesen und notieren.
- diesen Vorgang bis zum maximal erreichbaren Unterdruck wiederholen.

Empfehlenswert, aber nicht zwingend erforderlich:

- Luft durch Betätigen des Ventils an der Handpumpe langsam einlassen, bis das vorhergehende Intensitätsmaximum genau auf die markierte Stelle gewandert ist.
- zugehörigen Unterdruck vom Manometer der Handpumpe ablesen und notieren.
- diesen Vorgang bis zum Normaldruck wiederholen.

Meßbeispiel

Tab. 1: Zahl Z der Verschiebungen der Interferenzmaxima und Differenzdruck p_D , gemessen bei $\vartheta = 22\text{ °C}$ und $\lambda = 632,8\text{ nm}$

| Z | $\frac{p_D}{\text{mbar}}$ | Z | $\frac{p_D}{\text{mbar}}$ |
|----|---------------------------|----|---------------------------|
| 1 | 40 | 19 | 930 |
| 2 | 100 | 18 | 880 |
| 3 | 150 | 17 | 830 |
| 4 | 190 | 16 | 780 |
| 5 | 240 | 15 | 730 |
| 6 | 290 | 14 | 680 |
| 7 | 340 | 13 | 630 |
| 8 | 390 | 12 | 580 |
| 9 | 440 | 11 | 530 |
| 10 | 480 | 10 | 480 |
| 11 | 530 | 9 | 430 |
| 12 | 580 | 8 | 390 |
| 13 | 630 | 7 | 330 |
| 14 | 680 | 6 | 290 |
| 15 | 730 | 5 | 230 |
| 16 | 780 | 4 | 190 |
| 17 | 820 | 3 | 140 |
| 18 | 870 | 2 | 80 |
| 19 | 920 | 1 | 20 |

Die optische Weglänge d in der evakuierbaren Kammer ist das Produkt aus der geometrischen Länge s der Kammer und der druckabhängigen Brechzahl $n(p)$ des Gases in der Kammer. Durch Ändern des Drucks in der Kammer von p auf den Wert $p + \Delta p$ ändert man die optische Weglänge um

$$\Delta d = n(p + \Delta p) \cdot s - n(p) \cdot s \tag{III}$$

Auf dem durchscheinenden Schirm beobachtet man während des Evakuierens eine Bewegung der Interferenzstreifen. Vom Umgebungsdruck p_0 ausgehend werden bis zum Erreichen des Drucks p in der Kammer $Z(p)$ Verschiebungen gezählt. Eine Verschiebung der Maxima um genau eine Position entspricht einer Änderung der optischen Weglänge um λ . Zwischen p und $p + \Delta p$ ändert sich daher die optische Weglänge um

$$\Delta d = (Z(p) - Z(p + \Delta p)) \cdot \lambda \tag{IV}$$

Aus (III) und (IV) folgt

$$n(p + \Delta p) - n(p) = -(Z(p + \Delta p) - Z(p)) \cdot \frac{\lambda}{s}$$

und wegen (II)

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = - \frac{\Delta Z}{\Delta p} \cdot \frac{\lambda}{s} \tag{V}$$

Meßgröße ist nicht der Druck p in der Kammer, sondern die Differenz $p_D = p_0 - p$ zum Umgebungsdruck p_0 . Aus den Meßdaten läßt sich daher die Steigung $\frac{\Delta Z}{\Delta p_D} = - \frac{\Delta Z}{\Delta p}$ ermitteln.

Fig. 3 entnimmt man

$$\frac{\Delta Z}{\Delta p_D} = 0,020\text{ mbar}^{-1}$$

und erhält wegen $\lambda = 632,8\text{ nm}$ und $s = 50\text{ mm}$

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = 2,6 \cdot 10^{-7}\text{ mbar}^{-1}.$$

Eingesetzt in (I) wird für die Brechzahl von Luft der Wert $n = 1,00026$ berechnet.

Der entsprechende Literaturwert bei Normaldruck $p = 1013\text{ mbar}$, Temperatur $\vartheta = 22\text{ °C}$ und Laserwellenlänge $\lambda = 632,8\text{ nm}$ ist $n = 1,000269$.

Auswertung und Ergebnis

Bei Gasen ist die Brechzahl n linear vom Druck p abhängig

$$n(p) = n(p = 0) + \frac{\Delta n}{\Delta p} \cdot p \text{ mit } n(p = 0) = 1 \tag{I}$$

Im folgenden wird daher zunächst der Differenzenquotient

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \frac{n(p + \Delta p) - n(p)}{\Delta p} \tag{II}$$

aus den Meßdaten ermittelt:

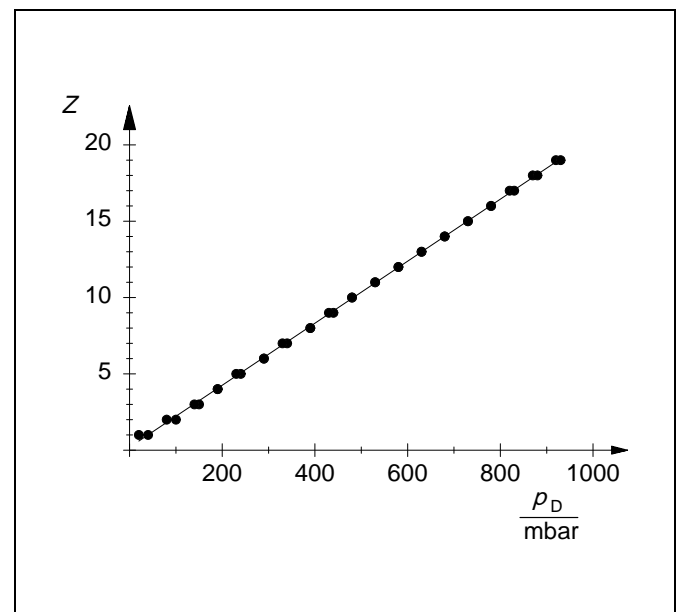


Fig. 3: Zahl Z der Verschiebungen der Interferenzmaxima als Funktion des Differenzdrucks p_D

