Vorbereitungsfragen zur Prüfung PMS 1

Adrian Schollmeyer

3. März 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Wie heißen die SI-Basiseinheiten? Wie sind sie definiert? 2

2 Erläutern Sie das Struktur- und Wandlerschema eines Sensors 4

3 Was ist der Wert einer Größe? Was heißt Messen/Maßverkörperung/Normal? 5

4 Erläutern Sie das Fehlerfortpflanzungsgesetz 6

5 Wie lautet die Definition der SI-Basiseinheit Meter? 7

6 Wie funktioniert ein Michelson-Interferometer? 7

7 Was ist das Abbe-Komparator-Prinzip? 10

8 Wie funktionieren induktive Geber als Längenmessgerät? 11

9 Wie wird die Temperaturskala definiert? Was ist ein Gasthermometer? 13

10 Was ist der Tripelpunkt des Wassers? 14

11 Wie funktioniert ein Flüssigkeitsthermometer? 14

12 Was ist ein Thermoelement? Erläutern Sie die Funktionsweise. 14

13 Was ist ein Widerstandsthermometer? Erläutern Sie die Funktionsweise. Welche Bauformen gibt es? 14

14 Wie funktioniert die Vierleiterschaltung? 14

15 Was/Wie wird mit einem Pyrometer gemessen? 14

16 Was ist ein Dehnmessstreifen? Wie funktioniert er? 14

17 Welche Brückenschaltungen für Messungen mit Dehnmessstreifen gibt es? 14

18 Erläutern Sie den Aufbau und die Funktion von DMS Beschleunigungssensoren! 14

19 Erläutern Sie die dynamischen Eigenschaften von Beschleunigungs- und Wegsensoren! BewegungsDGL. 14

20 Wie funktioniert ein U-Rohr-Manometer? 14

21 Wie funktionieren elektrische Drucksensoren? 14

1 Wie heißen die SI-Basiseinheiten? Wie sind sie definiert?

Die SI-Basiseinheiten sind sieben Einheiten, welche nur mithilfe von Naturkonstanten und dem Verhältnis zwischen Naturkonstanten und anderen SI-Basiseinheiten definiert sind.

Die sieben SI-Basiseinheiten und ihre zugrundeliegenden Naturkonstanten sind:

Sekunde, definiert über den Hyperfeinstrukturübergang des Grundzustandes des Caesium-133-Atoms $\Delta\nu_{Cs}$

Meter, definiert über die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c und die Sekunde

Kilogramm, definiert über das PLANCKsche Wirkungsquantum h, das Meter und die Sekunde

Ampere, definiert über die Elementarladung e und die Sekunde

Kelvin, definiert über die BOLTZMANN-Konstante k_B, das Meter, die Sekunde und das Kilogramm.

Mol, definiert über die AVOGADRO-Konstante N_A

Candela, definiert über das photometrische Strahlungsäquivalent $K_c d$ für monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz.

Eine Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entspricht.

$$\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770\,Hz \tag{1}$$

$$1\,s = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{Cs}} \tag{2}$$

Das Meter ist über die Vakuumlichtgeschwigkeit c definiert.

$$c = 299\,792\,458\,\frac{m}{s} \tag{3}$$

$$1\,m = \frac{1}{299\,792\,458} \cdot c \cdot s \tag{4}$$

Das Kilogramm ist definiert, indem für die PLANCK-Konstante h der unten stehende Wert festgelegt wird.

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\,\frac{kg \cdot m^2}{s} \tag{5}$$

$$1\,kg = \frac{1}{h \cdot m^2} \cdot 1\,s \tag{6}$$

Ein Ampere entspricht einem Fluss von 1 As (Coulomb) pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt. Das Coulomb ist über die Elementarladung e festgelegt.

$$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\,As \tag{7}$$

$$1\,A = 1\,\frac{C}{s} \tag{8}$$

$$= \frac{1}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}} \cdot e \cdot \frac{1}{1\,s} \tag{9}$$

Ein Kelvin ist diejenige Änderung der thermodynamischen Temperatur, die einer Änderung der thermischen Energie um $1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,J$ entspricht. Dabei wird die BOLTZMANN-Konstante k_B als Naturkonstante festgelegt:

$$k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,\frac{J}{K} \tag{10}$$

$$1\,K = \frac{1}{k_B} \cdot 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\,J \tag{11}$$

Ein Mol eines Stoffes enthält exakt $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Diese Zahl entspricht dem Wert der AVOGADRO-Konstante N_A.

Die Candela ist definiert, indem für das photometrische Strahlungsäquivalent K_{cd} der monochromatischen Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}\,Hz$ der Zahlenwert 683 festgelegt wird.

$$K_{cd} = 683\,\frac{lm}{W} = 683\,cd\,sr\,kg^{-1}\,m^{-2}\,s^3 \tag{12}$$

2 Erläutern Sie das Struktur- und Wandlerschema eines Sensors

Im Struktur- und Wandlerschema eines Sensors wird dargestellt, welche physikalischen Größen durch welche Bauteile in andere physikalische Größen umgewandelt werden. Das Schema stellt eine Kette an Umformungen von der Eingangsgröße (bspw. einer Kraft bei einer Waage) ggf. über Zwischengrößen bis hin zur elektrisch messbaren Ausgangsgröße (bspw. eine Spannung) dar. Am Beispiel eines DMS-Verformungskörpers kann eine grafische Darstellung so aussehen wie in Abbildung 1 gezeigt.

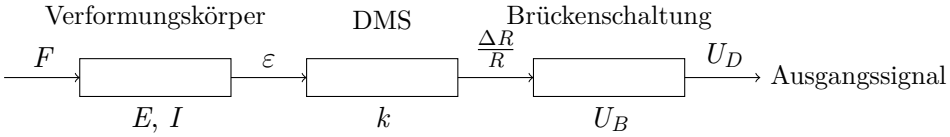

Abbildung 1: Struktur- und Wandlerschema eines DMS-Verformungskörpers

Die grafische Darstellung beginnt zunächst mit der Eingangsgröße (hier F). Diese geht als Pfeil in das erste als Rechteck dargestellte Element (hier: Verformungskörper). An solche Elemente werden neben der Bezeichnung des Elements auch noch eventuell zusätzliche Einflussgrößen/Parameter geschrieben, die die Ausgangsgröße des Elements beeinflussen (hier: Elastizitätsmodul E und Flächenträgheitsmoment I des Verformungskörpers). Der Ausgang eines Blockes ist ein ausgehender Pfeil, der mit der physikalischen Größe beschriftet wurde, in die die Eingangsgröße umgewandelt wurde (hier: ε). Dieser Pfeil kann dann wieder in den nächsten Block führen (hier: DMS) und erneut umgewandelt werden. So ergibt sich eine Kette, die am Ende einen ausgehenden Pfeil mit einer elektrischen Größe (hier: Diagonalspannung U_D) hat.

Das Struktur- und Wandlerschema lässt sich auch mathematisch beschreiben. Jeder Umwandlungsprozess (grafisch: Block) ist eine Funktion f_i, der eine physikalische Größe x in eine andere physikalische Größe umwandelt. Im gezeigten Beispiel gibt es drei Funktionen: $f_1 : F \to \varepsilon$, $f_2 : \varepsilon \to \frac{\Delta R}{R}$ und $f_3 : \frac{\Delta R}{R} \to U_D$. Die Verkettung aller drei Funktionen ist dann die Funktion $f\colon F \to U_D$ und beschreibt mathematisch den kompletten Prozess, in dem die Größe F in die elektrisch messbare Größe U_D umgewandelt wird.

Dies kann für das gezeigte Beispiel einmal durchgeführt werden. Hier wird der Prozess von hinten nach vorne analysiert und Gleichungen ermittelt, um schrittweise die Gleichung für $U_D = f(F)$ zu ermitteln. Zuerst wird also die Umwandung der Widerstandsänderung $\frac{\Delta R}{R}$ in die Diagonalspannung U_D betrachtet. Im folgenden sei angenommen, dass es sich um eine Vollbrücke handelt. Mit der Brückengleichung ergibt sich sofort eine Gleichung für $f_3\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = U_D$:

$$U_D = U_B \cdot \frac{\Delta R}{R} \tag{13}$$

$$f(F) = U_B \cdot \underbrace{f_2\left(f_1\left(F\right)\right)}_{=\frac{\Delta R}{R}} \tag{14}$$

Der zweite Schritt ist die Umwandlung einer Dehnung ε in eine Widerstandsänderung im Dehnmessstreifen. Für $f_2(\varepsilon) = \frac{\Delta R}{R}$ ergibt sich mithilfe des k-Faktors, einer materialabhängigen Konstante:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \tag{15}$$

$$\text{mit } k = \frac{\Delta\rho}{\rho} + 1 + 2\nu \tag{16}$$

Eingesetzt in f ergibt dies:

$$f(F) = U_B \cdot k \cdot \underbrace{f_1(F)}_{=\varepsilon} \tag{17}$$

Zuletzt muss nun noch die Gleichung für $f_1(F) = \varepsilon$ ermittelt werden. Diese ergibt sich mithilfe der Federsteifigkeit C des Verformungskörpers:

$$\varepsilon = C \cdot F \tag{18}$$

$$f(F) = U_B \cdot k \cdot C \cdot F \tag{19}$$

3 Was ist der Wert einer Größe? Was heißt Messen/Maßverkörperung/Normal?

Eine Größe im Sinne der Messtechnik ist ein Merkmal eines Objektes (Körper, Zustand oder Vorgang), welches qualitativ charakterisiert und quantiativ ermittelt werden kann. Der Wert eine Größe ist die Darstellung einer Größe als Produkt aus Zahlenwert und Einheit zur qualitativen und quantitativen Charakterisierung. Der Zahlenwert selbst gibt an, wie viele Vielfache der Einheit in der betrachteten Größe enthalten ist und kann üblicherweise auch eine reelle Zahl sein.

Beispiel: Die Größe „Länge“ wird angegeben in der Einheit „Meter“ (m). Angenommen, eine Messung einer Metallstange wird durchgeführt. Dabei wird der Wert $5\,m$ ermittelt. Der Zahlenwert ist also 5 und die Einheit m. Das bedeutet, dass das Meter fünf Mal in dem Wert enthalten ist.

Solche Messungen werden mithilfe von Messmitteln (z. B. Maßverkörperungen oder Messgeräten) durchgeführt. Eine solche Maßverkörperung ist ein Messmittel, welches einen oder mehrere Werte einer physikalischen Größe darstellt. Beispielsweise sind dies Wägestücke, Lineale, Strichmaßstäbe oder Normalelemente.

Ist dabei von einem Normal die Rede, so meint man damit ein Messmittel, welches zur Darstellung einer Einheit einer physikalischen Größe genutzt wird. Dies sind also Objekte, die genau einen eine Einheit großen Wert der zu messenden Größe aufweisen und damit u. A. durch Vergleiche mit dem zu messenden Objekt genutzt werden können, um den Wert am zu messenden Objekt zu bestimmen (bspw. Wägestücke mit vorgegebener Masse zusammen mit einer Waage).

Untergliedert werden Normale u. A. in Primärnormale, welche die Darstellung der Einheit nach ihrer Definition sind, Sekundärnormale, deren Werte i. d. R. direkt vom

Primärnormal abgeleitet sind und Referenznormale, die an ein Primär- oder Sekundärnormal angeschlossen sind und zur Übertragung der Einheit auf Normale niederer Ordnung und/oder Arbeitsmessmittel verwendet werden.

Die Alternative zur Maßverkörperung ist das Messgerät. Dieses wandelt die zu messende Größe oder eine mit ihr gesetzmäßig verknüpfte Größe in eine Anzeige oder eine der Anzeige gleichwertige Information um. Dazu wird üblicherweise ein Messwandler eingesetzt, welcher die zu messende nichtelektrische Größe in eine elektrische Größe mithilfe diverser physikalischer Gesetze/Vorgänge umwandelt. Diese elektrische Größe lässt sich dann meist sehr einfach Messen und Anzeigen/Erfassen.

4 Erläutern Sie das Fehlerfortpflanzungsgesetz

Das Fehlerfortpflanzungsgesetz ist eine Vorschrift zur Berechnung der erweiterten Standardunsicherheit einer Größe. Es ist essentiell, wenn die zu messende Größe aus Berechnungen anderer gemessener Größen ermittelt werden muss. Da bei der Berechnung des Ergebnisses hier auch die Unsicherheiten der Einflussgrößen betrachtet werden müsen, ist das Fehlerfortpflanzungsgesetz essentiell, um die Unsicherheit des berechneten Ergebnisses zu bestimmen.

Das Fehlerfortpflanzungsgesetz gibt eine Berechnungsvorschrift, nach der die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ der berechneten Größe $y = f(x_1, x_2, \dots)$ aus den Unsicherheiten $u(x_i)$ der Einflussgrößen berechnet wird:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \tag{20}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot u(x_1) \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot u(x_2) \right)^2 + \dots} \tag{21}$$

Die hier enthaltenen partiellen Ableitungen heißen Sensitivitätskoeffizienten. Sie sind ein Maß dafür, wie stark die Unsicherheit ihrer jeweiligen Einflussgrößen in das Endergebnis einfließt. Möglichst kleine Sensitivitätskoeffizienten führen automatisch zu einem kleinen Einfluss der Unsicherheiten. Dies kann beispielsweise sein, wenn eine Größe die Ausgangsgröße nur marginal beeinflusst (bspw. Temperaturänderungen bei der Längenmessung). Umgekehert kann ein großer Sensitivitätskoeffizient auch dazu führen, dass bereits kleine Unsicherheiten einer Einflussgröße große Auswirkungen auf die Unsicherheit der Ausgangsgröße haben. Dies kann bspw. bei Prozessen sein, wo exponentielle Beziehungen zwischen der Einfluss- und der Ausgangsgröße vorherrschen.

Dies zeigt auch, dass in der Unsicherheitsbetrachtung neben dem Absolutwert der Unsicherheit auch andere Faktoren wie Sensitivitätskoeffizienten zusammen mit den Unsicherheiten der Einflussgrößen berücksichtigt werden sollten. Dies kann zu verschiedenen Erkenntnissen führen. Beispielsweise kann man so feststellen, wenn eine Eingangsgröße starken Einfluss auf die Unsicherheit der Ausgangsgröße hat und anschließend eine

Verbesserung des entsprechenden Messprozesses der Eingangsgröße einleiten. Andererseits kann es auch sein, dass man feststellt, dass bspw. eine Typ-B-Unsicherheit großen Einfluss auf die kombinierte Unsicherheit hat und aufgrund ihrer Natur nicht weiter verringert werden kann (bspw. der Einfluss der Raumtemperatur auf die Messung oder Unsicherheiten der verwendeten Messgeräte). Andere Unsicherheiten – Typ-A-Unsicherheiten –, sind jedoch durch statistische Schwankungen der Messergebnisse begründet und können durch eine Vergrößerung der Anzahl Messungen verringert werden.

5 Wie lautet die Definition der SI-Basiseinheit Meter?

Siehe oben

6 Wie funktioniert ein Michelson-Interferometer?

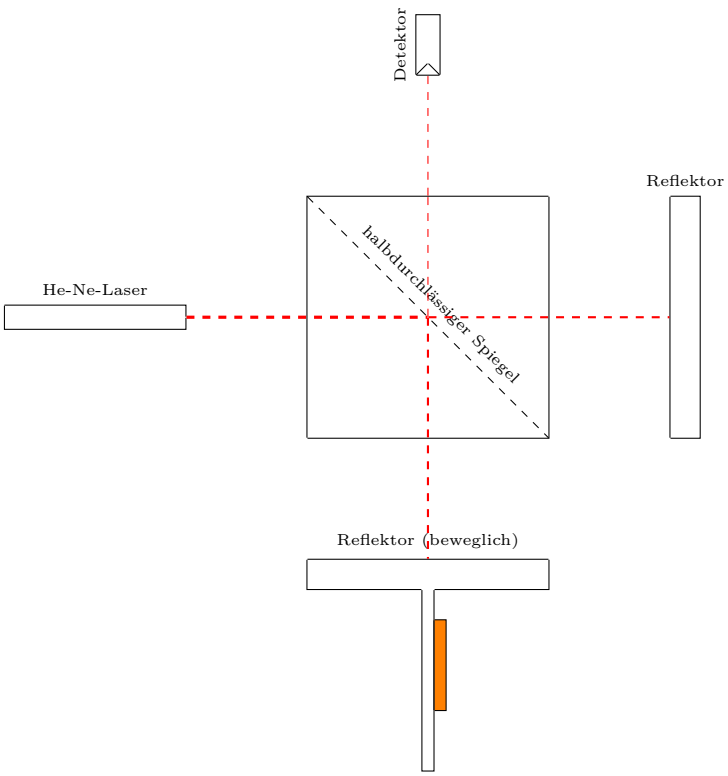

Abbildung 2: Laserinterferomenter, schematisch

Aufbau und mathematische Betrachtung Ein Michelson-Interferometer ist ein Gerät zur Längenmessung. Dieses arbeitet mithilfe von Laserstrahlen und Interferenz. Das Interferometer besteht im Kern aus zwei Spiegeln und einem halbdurchlässigen Spiegel,

einem Laser und Lichtsensoren. Der Laser (im Bild links) wird mit einem Eintrittswinkel von 45 ° auf den halbdurchlässigen Spiegel (im Bild mittig) in der Mitte gerichtet. Dieser reflektiert wiederum mit einem Austrittswinkel von 45 ° das Licht auf einen herkömmlichen Spiegel (im Bild unten) mit Eintrittswinkel 0 °. Das durchgelassene Licht wird am zweiten herkömmlichen Spiegel (im Bild rechts) wiederum mit Eintrittswinkel 0 ° reflektiert. Dadurch gehen beide Lichtstrahlen zurück zum halbdurchlässigen Spiegel und werden dort teilweise in Richtung der Sensoren (im Bild oben) reflektiert bzw. durchgelassen. Die beiden Lichtstrahlen können sich nun je nach Phasenlage aufgrund der Interferenz verstärken oder eliminieren. Dies ist abhängig davon, wie der Abstand der beiden herkömmlichen Spiegel zum halbdurchlässigen Spiegel ist.

Das Interferometer kann nun zur Längenmessung benutzt werden, indem einer der beiden herkömmlichen Spiegel auf einer beweglichen Schiene angebracht wird. Dadurch kann der Abstand zum halbdurchlässigen Spiegel und damit die Phasenlage im Vergleich zum Lichtstrahl vom festen Spiegel verändert werden. Wird der bewegliche Spiegel nun bewegt, führt diese Bewegung dazu, dass immer abwechselnd konstruktive und destruktive Interferenz am Sensor in einer Abfolge von Hell-Dunkel-Übergängen auftritt. Die Periodenlänge dieses Musters ist abhängig von der Wellenlänge des Lichts (während der Durchführung ist diese konstant) und entspricht genau einer gewissen Strecke, die der bewegliche Spiegel verschoben werden muss, um eine Periode des Musters am Sensor zu erzeugen.

Eine erkannte Periode am Sensor entspricht also exakt einer bestimmten Längenänderung. Diese ist einzig von der Wellenlänge λ des Lichts abhängig:

$$l_{Periode} = \lambda \cdot \frac{1}{2} \tag{22}$$

Durch Zählung der n Perioden, die am Sensor erkannt werden, kann nun die Strecke x bestimmt werden, um die sich der bewegliche Spiegel verschoben hat:

$$x = n \cdot l_{Periode} = n \cdot \lambda \cdot \frac{1}{2} \tag{23}$$

Damit ist eine Längenmessung mit der Auflösung der Periodenlänge möglich. Da diese Periodenlänge sehr gering ist, können mit dem Interferometer sehr kleine Längen präzise gemessen werden. Dazu muss lediglich dass zu messende Objekt am beweglichen Spiegel fluchtend angebracht werden und mithilfe eines Mikroskops der Spiegel einmal über die Länge des Objektes bewegt werden. Dazu verschiebt man den Spiegel zunächst, bis das vordere Ende des Objektes im Mikroskop an einer markierten Stelle sichtbar ist, initialisiert den Zähler n und verschieb anschließend den Spiegel mitsamt Objekt so lange, bis das hintere Ende des Objektes im Mikroskop an der markierten Stelle sichtbar ist. Der Unterschied Δn vor und nach der Verschiebung kann dann in die o.g. Gleichung eingesetzt werden, um die Länge zu berechnen.

Woher kommt nun der Faktor $\frac{1}{2}$ in der Gleichung? Dazu muss der Weg betrachtet werden, den das Licht zurücklegt. Angenommen beide Spiegel sind gleich weit vom halbdurchlässigen Spiegel entfernt. In diesem Fall haben beide Lichtstrahlen beim Auftreffen

auf dem Sensor die gleiche Phase, da beide die exakt gleiche Strecke zum Sensor zurücklegen. Wird nun der bewegliche Spiegel um eine Länge Δd verschoben, legt der Lichtstrahl zum beweglichen Spiegel hin einen zusätzlichen Weg von $\Delta w_1 = \Delta d$ zurück. Danach legt er vom beweglichen Spiegel weg erneut einen zusätzlichen Weg $\Delta w_2 = \Delta w_1 = \Delta d$ zurück. Insgesamt ist die Wegänderung des Lichtstrahls also $\Delta w = \Delta w_1 + \Delta w_2 = 2\Delta d$. Die Hell-Dunkel-Übergänge treten also mit einer doppelt so hohen Frequenz auf wie wenn die Verschiebung Δd nur eine Längenänderung $\Delta w' = \Delta d$ auslösen würde. Wäre die Längenänderung des Lichtstrahls einfach $\Delta w'$, würde die Periodenlänge eines Hell-Dunkel-Übergangs genau λ entsprechen, also muss bei doppelter Frequenz die Periodenlänge halbiert werden. Entsprechend muss bei der Berechnung von x mit $\frac{1}{2}$ multipliziert werden, um eben diese doppelt so hohe Frequenz zu berücksichtigen.

Richtungserkennung Der Aufbau hat in dieser Form jedoch zunächst auch noch ein Problem. Ein einzelner Sensor kann grundsätzlich nur sehen, ob das Licht heller oder dunkler wird. Daraus lässt sich nicht ableiten, ob der Spiegel gerade nach vorne oder nach hinten bewegt wird. Um dies zu umgehen, nutzt man einen zweiten Sensor, welcher so angebracht wird, dass die Interferenzmaxima niemals an beiden Sensoren gleichzeitig auftreten (d. h. dass die Abfolge der Hell-Dunkel-Übergänge an den Sensoren leicht phasenverschoben sind). Durch Erkennung, welcher Sensor bei der Bewegung zuerst hell bzw. zuerst dunkel wird, kann man nun genau ableiten, in welche Richtung der bewegliche Spiegel verschoben wird.

Verbesserungen Eine weitere Verbesserung besteht in der Nutzung von A/D-Wandlern hinter den Sensoren. Dadurch lassen sich auch Bruchteile von $\frac{\lambda}{2}$ messen (d. h. $n \in \mathbb{Q}$ statt $n \in \mathbb{R}$), wodurch noch mehr Präzision erreicht wird.

Eine Weitere Verbesserung besteht in der Nutzung des Moiré-Effekts. Es ist praktisch unmöglich, beide Reflektoren im Winkel von exakt $90\,^\circ$ zueinander aufzubauen. Dies führt grundsätzlich dazu, dass die beiden Strahlen leicht verkippt sind. Bringt man statt des Sensors einen Schirm an, kann man aufgrund des Moiré-Effekts ein Muster von Hell-Dunkel-Übergängen auf dem Schirm sehen. Je kleiner die Verkippung ist, umso breiter ist dieses Muster. Bei der Verschiebung des beweglichen Spiegels bewegt sich auch dieses Muster, wodurch sich einerseits die Bewegungsrichtung des Spiegels bestimmen lässt und andererseits auch die Zählung der Hell-Dunkel-Übergänge vereinfacht wird, da die Maxima auf dem Schirm deutlich weiter auseinander sind als die Wellenlänge (bei sehr kleiner Verkippung sind mehrere Millimeter Verschiebung möglich).

Eine Kombination der Verbesserungen erlaubt eine Messung mit einer Auflösung bis hin zu wenigen Picometern.

Vor- und Nachteile Der zunächst offensichtlichste Vorteil ist die hohe Präzision des Interferometers. Zudem ist die Messunsicherheit sehr gering. Dadurch, dass die Messanordnung (der bewegliche Spiegel) und das Messobjekt fluchtend angeordnet sind, wird das Abbe-Komparator-Prinzip eingehalten, was bedeutet, dass Fehler erster Ordnung (Sinusfehler) vermieden werden. Der dann noch übrig bleibende Kosinusfehler ist sehr

gering. Zudem ist diese Messmethode eine Fundamentalmethode. Die Länge wird hier direkt in eine messbare Größe (Anzahl der Hell-Dunkel-Übergänge) umgewandelt und ist dadurch unabhängig von weiteren Einflussgrößen, die zusätzlich gemessen werden müssen. Die einzige weitere Quelle für Messunsicherheit ist die Bestimmung der Wellenlänge λ des Lichts. Die Wellenlänge ist über die Vakuumlichtgeschwigkeit c (eine Naturkonstante) mit der Frequenz f des Lichtes in direktem Zusammenhang: $c = \lambda f$. Frequenzen lassen sich sehr präzise messen. Daher ist die Messunsicherheit insgesamt sehr gering.

Die Nachteile des Interferometers liegen vor allem im komplizierten Aufbau und den hohen Kosten. Zudem ist das Verfahren ein Inkrementalverfahren (zur Messung muss der Unterschied im Zählerstand bestimmt werden). Dies ist nicht direkt ein Nachteil, erfordert aber vor jeder Messung eine Initialisierung des Zählers (entweder, indem der Zähler auf 0 zurückgesetzt wird oder man den Zählerstand vor der Messung notiert).

7 Was ist das Abbe-Komparator-Prinzip?

Das Abbe-Komperator-Prinzip ist ein grundlegendes Prinzip in der Längenmesstechnik und bezieht sich auf systematische Fehlr – genauer gesagt Kippfehler. Es besagt, dass bei fluchtender Anordnung der Messskala und dem Prüfling Kippfehler 1. Ordnung – sogenannte Sinusfehler – vermieden werden. Diese Art Fehler hat einen großen Einfluss auf die Messgenauigkeit und kann bspw. bei Messschiebern auftreten, bei denen der bewegliche Schlitten zur Skala verkippt sein kann.

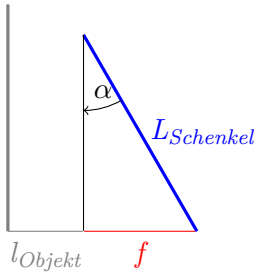

Abbildung 3: Sinusfehler beim Messchieber (Die Schenkel des Messschiebers sind dick gezeichnet)

Durch Anwendung der Dreiecksbeziehungen lässt sich für eine Verkippung eines Schenkels der Länge $L_{Schenkel}$ um Winkel α der Fehler berechnen:

$$f = L \sin \alpha \tag{24}$$

Für kleine α kann man dies mithilfe der Taylorreihe auch linear annähern:

$$f \approx L \cdot \alpha \tag{25}$$

Wie man mit der linearisierten Form leicht erkennen kann, ist der Fehler hier recht groß. Gilt das Abbe-Komparator-Prinzip, treten statt der Sinusfehler lediglich Kosinus-Fehler oder Abbe-Fehler 2. Ordnung auf. Diese entstehen durch Verkippung des Schenkels des

Prüflings zur Maßverkörperung und ist deutlich kleiner. Die Formel für den Kosinus-Fehler ist:

$$f = L \cdot (1 - \cos\alpha) \tag{26}$$

Dies kann wieder mithilfe der Taylorreihe für kleine α angenähert werden:

$$f \approx L \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{\alpha^2}{2!}\right)\right) \tag{27}$$

$$= L \cdot \frac{\alpha^2}{2} \tag{28}$$

Vergleicht man die Funktionen für den Sinus- und Kosinusfehler miteinander, so kann man feststellen, dass der Sinusfehler im Allgemeinen für kleine α deutlich größer ist als der Kosinusfehler. Das Einhalten des Abbe-Komparator-Prinzips bei der Längenmessung sorgt also für eine deutliche Verminderung der systematischen Messfehler!

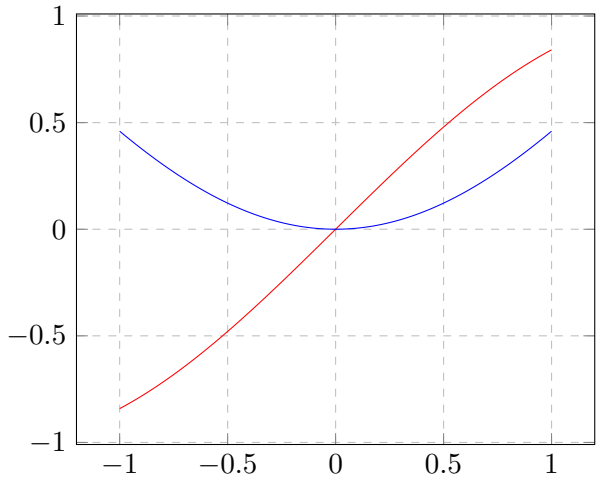

Abbildung 4: Sinusfehler (rot) im Vergleich zum Kosinusfehler (blau)

8 Wie funktionieren induktive Geber als Längenmessgerät?

Induktive Geber sind eine Variante von Inkrementalverfahren für Längenmessung. Das Grundprinzip ist die Impulserzeugung durch Induktion einer Spannung in einer Spule, die durch die Drehung eines ferromagnetischen Zahnrades ausgelöst wird. Dazu wird eine Spule mit Eisenkern direkt neben dem Zahnrad positioniert, sodass Zahnräder, in Richtung des Eisenkerns zeigen können und quasi eine Verlängerung dessen bilden können (d. h. der Luftspalt zwischen einem Zahn und dem Eisenkern sollte minimal sein). Am noch freien Ende des Eisenkerns wird ein Dauermagnet angebracht, sodass ein magnetischer Fluss im Eisenkern stattfindet.

Liegt nun ein Zahn des Zahnrades in einer Flucht mit dem Eisenkern, ist der Luftspalt zwischen Zahnrad und Eisenkern minimal und der magnetische Fluss ist maximal. Liegt

nun ein Spalt vom Zahnrad in der Flucht zum Eisenkern, ist der Luftspalt zwischen Zahnrad und Eisenkern maximal und der magnetische Fluss ist minimal. Bei der Bewegung des Zahnrades von einem Zahn zu einem Spalt sinkt also der magnetische Fluss und es wird eine Spannung in der Spule induziert. Analog dazu führt eine Bewegung des Zahnrades von einem Spalt zu einem Zahn dazu, dass der magnetische Fluss steigt und eine Spannung in der Spule in umgekehrter Richtung zur vorigen Situation induziert wird.

Bei der Drehung des Zahnrades wird also eine Wechselspannung in der Spule induziert. Jede Spitze, die während der Drehung auftritt, entspricht der Drehung des Zahnrades zu einem Zahn. Ist der Abstand zwischen den Zahnen (also die Teilung des Zahnrades) bekannt, kann die Anzahl Spannungsspitzen in die zurückgelegte Drehung des Zahnrades umgerechnet werden. Somit lassen sich Winkel im Bogenmaß messen, indem die gemessene Strecke durch den Radius des Zahnrades geteilt wird.

Für die Längenmessung kann man ein Objekt entlang des Zahnrades bewegen (bspw. mithilfe einer Zahnstange). Die gemessen Drehung des Zahnrades kann dann mit der entsprechenden Übersetzung in die Distanz umgerechnet werden, die die Zahnstange bewegt wurde. Dieses Verfahren hält das Abbe-Komparator-Prinzip ein, da die Maßverkörperung (das Zahnrad) fluchend mit dem Prüfling (an der Zahnstange befestigt) ist.

Bei der Messung mit Inkrementalverfahren ist zu beachten, dass der Zählerstand vor Beginn der Messung initialisiert oder notiert werden muss, da die Differenz zwischen dem Start-Zählerstand und dem End-Zählerstand für die Berechnung der zurückgelegten Strecke benutzt werden muss.

Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, dass sich gerade auch durch entsprechende Übersetzungen in Getrieben hohe Präzisionen bei der Messung erreichen lassen. Zudem kann das Verfahren auch durch Frequenzmessung benutzt werden, um statt der Länge die Drehzahl zu messen. Weitere Vorteile liegen darin, dass der Aufbau recht einfach und preiswert gestaltet werden und zusätzlich für die Winkelmessung benutzt werden kann. Mithilfe einer absoluten Kodierung auf dem Zahnrad (mithilfe mehrerer Zähne pro Position) kann auch die absolute Position des Rades bestimmt werden und so auch die absolute Position des Rades direkt nach dem Einschalten bestimmt werden.

Probleme des Verfahrens können auftreten, wenn die Bewegung des Rades stockend vorangeht. Es könnte bspw. passieren, dass das Rad auf der Kante eines Zahn stehen bleibt und dann kurz später weiterfährt. Dann werden zwei Spannungsspitzen für einen Zahn gemessen (einmal Spalt zu halbem Zahn, einmal Zahn zu ganzem Zahn). Je nachdem führt dies dazu, dass zwei Impulse ausgelöst werden oder gar kein Impuls (wenn eine Mindestspannung für die Impulserkennung benötigt wird). Das Gerät muss zudem kalibriert werden.

9 Wie wird die Temperaturskala definiert? Was ist ein Gasthermometer?

Temperatur und Temperaturskala Die Temperatur eines Stoffes ist ein Maß für die thermische Energie, die dieser Stoff hat. Die Umrechnung der thermischen Energie in die Temperatur erfolgt mithilfe der Boltzmann-Konstante, die der Umrechnungsfaktor von der Temperatur in die thermische Energie ist.

Die Grundeinheit der Temperatur ist dabei das Kelvin. Eine Temperaturänderung um ein Kelvin entspricht genau derjenigen Änderung der thermischen Energie um den Wert der Boltzmann-Konstante. Da dies jedoch nur eine Temperaturänderung beschreibt, muss zusätzlich noch der Nullpunkt der Temperaturskala festgelegt werden. Dieser liegt per Definition auf dem absoluten Nullpunkt mit einer Temperatur von $0\,K$. Hier besitzen die Teilchen gar keine thermische Energie.

Diese thermodynamische Temperaturskala ist in der Praxis nicht direkt einsetzbar, da herkömmliche Thermometer niht direkt die Temperatur messen, sondern andere temperaturabhängige Größen. Stattdessen werden Thermometer mit der ITS90-Skala kalibriert, die die Temperatur in Kelvin und Celsius für einige Fixpunkte definiert. Thermometer interpolieren dann die Temperaturen zwischen diesen Fixpunkten.

Gasthermometer Gasthermometer beruhen auf der Gleichung für ideale Gase:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \tag{29}$$

Unter Annahme dieser Gleichung betrachtet man Gas in einem geschlossenen Behälter. Dadurch bleiben das Volumen V und die Stoffmenge n konstant. R ist die universelle Gaskonstante und damit auch unveränderlich. Somit ergibt sich durch Auflösen nach p eine Funktion $p(T)$, deren einzige Einflussgröße die Temperatur ist:

$$p(T) = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \tag{30}$$

$$= \frac{nR}{V} \cdot T \tag{31}$$

Ein Gasthermometer lässt sich nun bauen, indem ein Manometer im Behälter eingesetzt wird (der Behälter muss natürlich nach wie vor Dicht sein!). Das Thermometer wird durch anfahren zweier Temperaturen kalibriert. Da die Kennlinie des Thermometers linear ist, ist die Kalibrierung mit zwei Punkten ausreichend.

10 Was ist der Tripelpunkt des Wassers?

11 Wie funktioniert ein Flüssigkeitsthermometer?

12 Was ist ein Thermoelement? Erläutern Sie die Funktionsweise.

13 Was ist ein Widerstandsthermometer? Erläutern Sie die Funktionsweise. Welche Bauformen gibt es?

14 Wie funktioniert die Vierleiterschaltung?

15 Was/Wie wird mit einem Pyrometer gemessen?

16 Was ist ein Dehnmessstreifen? Wie funktioniert er?

17 Welche Brückenschaltungen für Messungen mit Dehnmessstreifen gibt es?

18 Erläutern Sie den Aufbau und die Funktion von DMS Beschleunigungssensoren!

19 Erläutern Sie die dynamischen Eigenschaften von Beschleunigungs- und Wegsensoren! BewegungsDGL.

20 Wie funktioniert ein U-Rohr-Manometer?

21 Wie funktionieren elektrische Drucksensoren?