HAMBURGER · FERN-HOCHSCHULE · HFH
UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Studiengang	**Wirtschaftsingenieurwesen**
Fach	**Messtechnik/Qualitätssicherung**
Art der Leistung	**Prüfungsleistung**
Klausur-Knz.	**WI-MQS-P12–050618**
Datum	**18.06.2005**

Bezüglich der Anfertigung Ihrer Arbeit sind folgende Hinweise verbindlich:

- Verwenden Sie ausschließlich das **vom Aufsichtsführenden zur Verfügung gestellte Papier**, und geben Sie sämtliches Papier (Lösungen, Schmierzettel und nicht gebrauchte Blätter) zum Schluss der Klausur wieder bei Ihrem Aufsichtsführenden ab. Eine nicht vollständig abgegebene Klausur gilt als nicht bestanden.
- Beschriften Sie jeden Bogen mit Ihrem **Namen** und Ihrer **Immatrikulationsnummer**. Lassen Sie bitte auf jeder Seite 1/3 ihrer Breite als **Rand für Korrekturen** frei, und nummerieren Sie die Seiten fortlaufend. Notieren Sie bei jeder Ihrer Antworten, auf welche Aufgabe bzw. Teilaufgabe sich diese bezieht.
- Die Lösungen und Lösungswege sind in einer für den Korrektor **zweifelsfrei lesbaren Schrift** abzufassen. Korrekturen und Streichungen sind eindeutig vorzunehmen. Unleserliches wird nicht bewertet.
- Bei numerisch zu lösenden Aufgaben ist außer der Lösung stets der **Lösungsweg anzugeben**, aus dem eindeutig hervorzugehen hat, wie die Lösung zustande gekommen ist.
- Zur Prüfung sind bis auf Schreib- und Zeichenutensilien ausschließlich die nachstehend genannten **Hilfsmittel** zugelassen. Werden andere als die hier angegebenen Hilfsmittel verwendet oder **Täuschungsversuche** festgestellt, gilt die Prüfung als nicht bestanden und wird mit der **Note 5** bewertet.
- Die vorliegende Klausur enthält 3 Wahlaufgaben, von denen zwei zu lösen sind. **Sollten Sie alle drei Wahlaufgaben bearbeiten, wird Aufgabe 7 nicht bewertet.**

Bearbeitungszeit:	90 Minuten
Anzahl Aufgaben:	7 (davon 6 zu lösen)
Höchstpunktzahl:	100

Hilfsmittel
Studienbriefe, inkl. Laboranleitung Taschenrechner der HFH Formelsammlung eigener Wahl

Vorläufiges Bewertungsschema:

Punktzahl von	Punktzahl bis einschl.	Note	
95	100	1,0	sehr gut
90	94,5	1,3	sehr gut
85	89,5	1,7	gut
80	84,5	2,0	gut
75	79,5	2,3	gut
70	74,5	2,7	befriedigend
65	69,5	3,0	befriedigend
60	64,5	3,3	befriedigend
55	59,5	3,7	ausreichend
50	54,5	4,0	ausreichend
0	49,5	5,0	nicht ausreichend

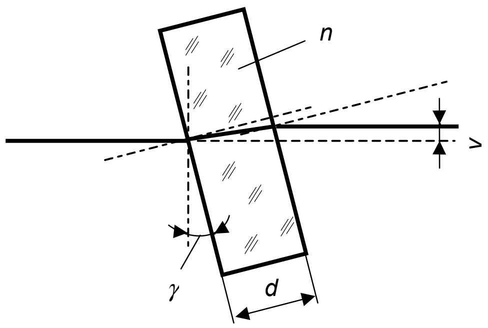
Viel Erfolg!

Pflichtaufgaben
Alle 4 Aufgaben sind zu bearbeiten.

Aufgabe 1 insg. 24 Punkte

Eine um einen Winkel γ gekippte planparallele Glasplatte von der Dicke d erzeugt in einem optischen Abbildungsstrahlengang eine Parallelversetzung v des von ihr erzeugten virtuellen Bildes gegenüber dem reellen Gegenstand.

Praktisch nutzt man diesen Effekt, um die Messgröße v mittelbar über den Kippwinkel γ zu messen (z. B. bei der Fluchtungsprüfung mit Planplattenvorsatz). Dabei bilden die Brechzahl des Glases n und die Plattendicke d invariante Größen.



n Brechzahl der Glasplatte
d Plattendicke
γ Kippwinkel der planparallelen Glasplatte
v Parallelversetzung

Für die Strahlenversetzung gilt bei Beschränkung auf kleine Kippwinkel γ die Näherungsfunktion

$$v \approx \frac{n-1}{n} \cdot d \cdot \hat{\gamma} . \qquad (1)$$

Für die **kombinierte Standardunsicherheit** der Strahlenversetzung gilt entsprechend näherungsweise

$$u_v \approx v \cdot \sqrt{\left(\frac{u_n}{n \cdot (n-1)}\right)^2 + \left(\frac{u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2} . \qquad (2)$$

Für einen Anwendungsfall liegt folgender Datensatz vor:

- Nennabmessungen
  - $v = (\pm)\ 0{,}55$ mm (Anwendungsbereich $v = 0{,}55$ mm symmetrisch zur Horizontalen)
  - $\gamma° = (\pm)\ 8°$ (maximaler Kippwinkel für den Anwendungsbereich $\gamma = 8°$ symmetrisch zur Horizontalen)
  - $d = 11{,}568$ mm (mittlere Plattendicke)
  - $n = 1{,}5163$.
- Messunsicherheiten:
  - (Zulässige) Standardunsicherheit der Strahlenversetzung: $u_v = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ mm
  - Standardunsicherheit der Brechzahl: $u_n = 2 \cdot 10^{-4}$
  - Standardunsicherheit der Plattendicke: $u_d = 5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Das optische System soll hinsichtlich der Messunsicherheiten näher untersucht werden. Dazu sind folgende Aufgaben zu lösen:

a) Leiten Sie die Empfindlichkeitskoeffizienten $\frac{\partial v}{\partial n}$, $\frac{\partial v}{\partial d}$ und $\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}}$ ab **10 Pkte**

oder

reproduzieren Sie diese aus Gl. (2).

Hinweis: Bestimmen Sie den Lösungsansatz für die Herleitung von Gl. (2).

b) Für das Verhältnis der Empfindlichkeits-Koeffizienten gilt die Relation **6 Pkte**

$\frac{\partial v}{\partial n} : \frac{\partial v}{\partial d} : \frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} \approx 0{,}7 : 0{,}05 : 4$ (gerundete Werte).

(1) Geben Sie die Relation in %-Werten an, wobei der zahlenmäßig größte Koeffizient 100 % zu setzen ist.

(2) Beurteilen Sie die Relation, und bestimmen Sie die kritische (die entscheidende) Größe zur Minimierung der kombinierten Standardunsicherheit u_v.

c) Für den vorliegenden Anwendungsfall lässt sich Gl. (2) zur Gewinnung von Schätzwerten reduzieren auf die Näherungsfunktion **8 Pkte**

$$u_v \approx v \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 + 30 \cdot 10^{-8}} \; . \qquad (3)$$

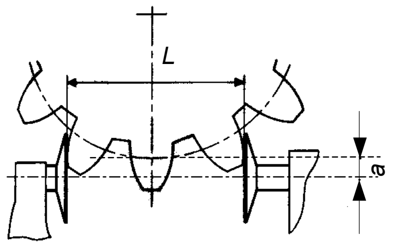
Ermitteln Sie daraus die Schätzwerte für die Standardmessunsicherheit des Kippwinkels $u_{\hat{\gamma}}$ (in rad) und $u_{\gamma''}$ (in Winkelsekunden).

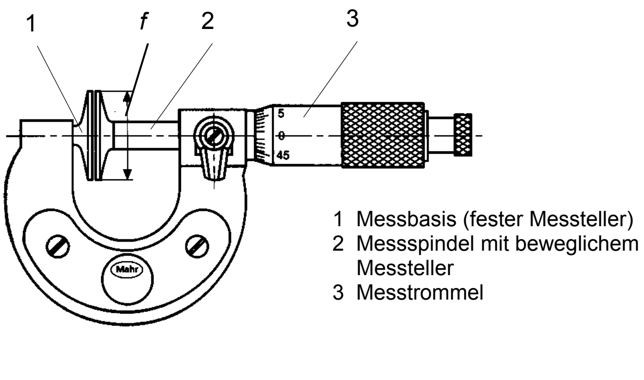
Hinweis zur Umrechnung von Winkeleinheiten:

rad ⇒ Grad/...	$\varphi° = \hat{\varphi} \cdot \frac{180}{\pi}$	$\varphi' \approx \hat{\varphi} \cdot 3{,}4 \cdot 10^3$	$\varphi'' \approx \hat{\varphi} \cdot 2 \cdot 10^5$
Grad/... ⇒ rad	$\hat{\varphi} = \varphi° \cdot \frac{\pi}{180}$	$\hat{\varphi} \approx \varphi' \cdot 3 \cdot 10^{-4}$	$\hat{\varphi} \approx \varphi'' \cdot 5 \cdot 10^{-6}$

Aufgabe 2 insg. 21 Punkte

Die dargestellte Bügelmessschraube mit tellerförmigen Messflächen ist u. a. zur Zahnweitenmessung (der indirekten Bestimmung der Zahndicke) geeignet. Deren Messgenauigkeit soll analysiert werden.





a) Ist bei dieser Konstruktion das ABBEsche Komparatorprinzip erfüllt? Begründen Sie Ihre Aussage. **4 Pkte**

b) Entwickeln Sie die allgemeine Funktion zur Berechnung der systematischen Messabweichung („Fehler"-Funktion) $\Delta L = f(a, \varphi)$. **8 Pkte**

Infolge des unvermeidbaren Führungsspiels der Messspindel (2) und der Hebelwirkung des beweglichen Messtellers (2) verkippt diese bei kraftschlüssiger Anlage der Messsteller am Messobjekt um den Kippwinkel φ.

Für den Anwendungsfall betrage der wirksame Abstand $a = f/3$ (f = Durchmesser der Messteller). Die Messlänge betrage L.

Anleitung:
Skizzieren Sie ein Hilfsdreieck mit den Bestimmungsgrößen, und leiten Sie daraus die Beziehung ab.

Hinweis:
Für kleine Winkel kann (mit Bezug auf die Potenzreihenentwicklung) angenähert $\tan\varphi \approx \widehat{\varphi}$ und $\cos\varphi \approx 1 - \frac{\widehat{\varphi}^2}{2}$ gesetzt werden.

c) Welches Vorzeichen ist dieser Messabweichung zuzuschreiben? Begründen bzw. beweisen Sie Ihre Aussage. **3 Pkte**

d) **Für den allgemeinen Anwendungsfall des Gerätetyps** (z.B. auch für Messungen von Wellenabsätzen oder Einstichabständen) ist der zulässige Kippwinkel φ_{max} in Winkelminuten zu bestimmen, wenn folgende Gerätedaten zugrunde gelegt werden: **6 Pkte**

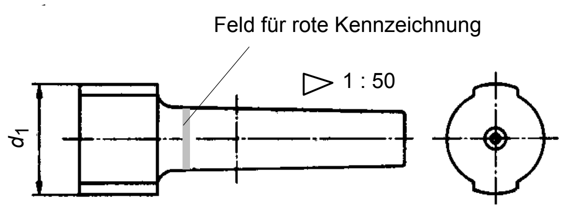
Maximale Messlänge:	L_{max} = 195 mm
Größter Achsabstand:	$a_{max} = f/2$ = 30 mm
Fehlergrenze nach DIN 863:	G = 7 µm.

Hinweis: Formeln zur Umrechnung von Winkeleinheiten siehe Aufgabe 1 c).

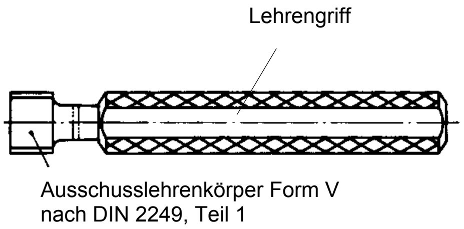
Aufgabe 3 insg. 9 Punkte

Der unter (1) abgebildete **Ausschusslehrenkörper** – mit verminderter Prüffläche nach DIN 2249, Teil 1 der Form V für Bohrungen von 1 bis 40 mm Nenndurchmesser (d_1) – findet in **Ausschusslehrdornen von 5 bis 40 mm Nenndurchmesser** gemäß Darstellung (2) Anwendung.

(1)



(2)



a) Inwieweit erfüllt dieser Ausschusslehrenkörper den TAYLORschen Grundsatz (TG)? Geben Sie an, ob der TG **5 Pkte**

- vollständig erfüllt ist,
- eingeschränkt erfüllt ist oder
- extrem untererfüllt ist.

Im Falle der eingeschränkten Erfüllung des TG ist die Einschränkung zu benennen bzw. zu verdeutlichen.

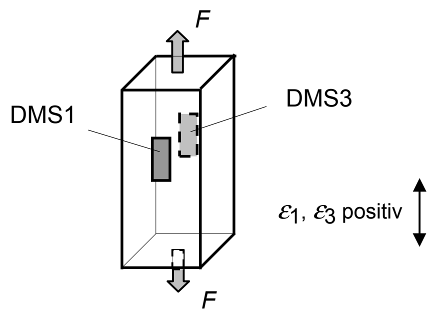
b) Formulieren Sie die messtechnischen Anforderungen an die Gestaltung **4 Pkte**

- der Gutseite und der
- der Ausschussseite

einer Lehre nach dem TG in allgemeiner Form.

Aufgabe 4 insg. 16 Punkte

Ein mit Zugkraft beanspruchtes Konstruktionsteil, das mit 2 aktiv messenden Dehnungsmessstreifen (DMS) bestückt ist, soll in Verbindung mit einer Ausschlagbrückenschaltung gemessen werden.



Die verwendeten DMS sind baugleich, haben einen elektrischen Widerstand von je R = 120 Ω und einen k-Faktor $k = 2{,}05$.

Folgende Aufgaben sind zu lösen:

a) Skizzieren Sie eine Ausschlagbrückenschaltung, mit der das Messsignal den jeweils größtmöglichen Wert annehmen kann. Positionieren Sie die nummerierten DMS nach dieser Forderung. **6 Pkte**

b) Berechnen Sie die Ausgangsspannung U_{AB} für eine Längenänderung an der Oberfläche des Federkörpers von $\varepsilon = 780\ \mu\text{m/m}$ bei einer Brückenspannung von $U_0 = 6\ \text{V}$. **5 Pkte**

c) Berechnen Sie **5 Pkte**

(1) die Widerstandsänderung ΔR, die an jedem der beiden DMS auftritt;

(2) die entsprechende prozentuale Widerstandsänderung $\Delta R_{\%}$.

Wahlaufgaben

Es sind zwei Aufgaben Ihrer Wahl zu lösen.

(Beachten Sie bitte, dass bei Bearbeitung aller drei Wahlaufgaben die 7. Aufgabe nicht gewertet wird.)

Aufgabe 5 insg. 15 Punkte

Nennen Sie Entscheidungskriterien für den Einsatz rechnerbasierter Koordinatenmessgeräte anstelle konventioneller Messgeräte zur Abstandsmessung

a) aus technischer Sicht, **9 Pkte**

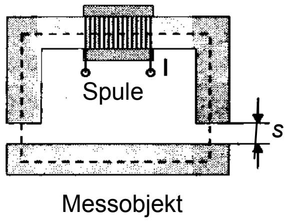
b) aus wirtschaftlicher Sicht. **6 Pkte**

Es sind jeweils **drei** Kriterien zu nennen.

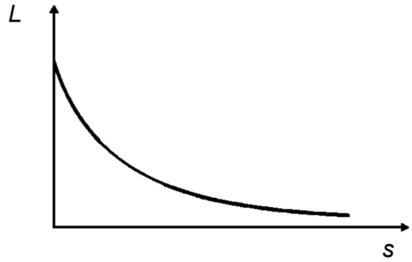
Aufgabe 6 insg. 15 Punkte

Für die berührungslose Messung ferromagnetischer Messobjekte mittels eines **induktiven Wegsensors** nach dem Querankerprinzip (Abb. (1)) gilt bezüglich der Abhängigkeit der Induktivität L von der Größe des Luftspaltes s die statische Kennlinie nach Abb. (2).

(1)



(2)



Die Kennlinienfunktion lautet:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2s}. \qquad (1)$$

mit μ_0 als absolute Permeabilität des Vakuums und μ_{Fe} als relative Permeabilität des Eisenkerns. N ist die Windungszahl, A der Querschnitt des magnetischen Weges der Spule und s drückt die Hälfte des Luftweg aus. L_{Fe} entspricht dem Weg der Magnetfeldlinien im Eisenkern.

a) Berechnen Sie die Empfindlichkeit des Sensors als allgemeine Funktion. **9 Pkte**

b) Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus dem Verlauf der statischen Kennlinie für die Dimensionierung eines linearisierten Anzeigebereiches optimaler Empfindlichkeit ziehen? **6 Pkte**

Aufgabe 7 insg. 15 Punkte

Wegen zunehmender Reklamationen sieht sich ein Unternehmen der Schaltgerätebranche genötigt, die Prozessfähigkeit seiner Fertigung für Schaltstößel zu untersuchen. Der Nenndurchmesser des Stößels beträgt d = 2,80 mm. Die Maßtoleranz beträgt bei gleich großen Abmaßen T = 0,06 mm.

Es werden 8 Stichproben mit einen Stichprobenumfang zu je 10 Teilen genommen und der Durchmesser der Teile gemessen. Die Werte können als normalverteilt angesehen werden. In einem ersten Schritt der Auswertung wurden die folgenden Mittelwerte $\overline{x}$ und die Standardabweichungen S_{xj} der Stichproben berechnet:

	Stichprobe							
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\overline{x}$ in mm	2,795	2,796	2,794	2,801	2,789	2,802	2,799	2,797
S_{xj} in µm	11,0	9,2	10,7	9,2	9,8	8,7	8,9	9,8

a) Berechnen Sie aus den gegebenen und den bisher berechneten Werten **11 Pkte**
(1) den Prozessfähigkeitsindex c_p,
(2) den Prozessfähigkeitsindex c_{pk}.

b) Stellen Sie anhand **beider** ermittelter Prozessfähigkeitsindizes fest, wie der untersuchte Prozess eingeschätzt und wie daraufhin in den Prozess eingegriffen werden muss. **4 Pkte**

UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Korrekturrichtlinie zur Prüfungsleistung Messtechnik/Qualitätssicherung am 18.06.2005 Wirtschaftsingenieurwesen WI-MQS-P12–050618

Für die Bewertung und Abgabe der Prüfungsleistung sind folgende Hinweise verbindlich:

- Die **Vergabe der Punkte** nehmen Sie bitte so vor, wie in der Korrekturrichtlinie ausgewiesen. Eine summarische Angabe von Punkten für Aufgaben, die in der Korrekturrichtlinie detailliert bewertet worden sind, ist nicht gestattet.
- Nur dann, wenn die Punkte für eine Aufgabe nicht differenziert vorgegeben sind, ist ihre Aufschlüsselung auf die einzelnen Lösungsschritte Ihnen überlassen.
- Stoßen Sie bei Ihrer Korrektur auf einen anderen richtigen als den in der Korrekturrichtlinie angegebenen Lösungsweg, dann nehmen Sie bitte die Verteilung der Punkte sinngemäß zur Korrekturrichtlinie vor.
- Bitte achten Sie auf **Folgefehler**. Wurden bezogen auf eine falsche Lösung zu Folgefragen richtige Antworten bzw. Lösungen angegeben, dann sind diese ohne Punktabzug zu bewerten. **Das bezieht sich auf Aufgaben jeglicher Art, nicht nur auf numerisch zu lösende.**
- Ihre Korrekturhinweise und Punktbewertung nehmen Sie bitte in einer **zweifelsfrei lesbaren Schrift** vor.
- Die von Ihnen vergebenen Punkte und die daraus sich gemäß dem nachstehenden Notenschema ergebende Bewertung tragen Sie in den **Klausur-Mantelbogen** sowie in die **Ergebnisliste** ein.
- Die vorliegende Klausur enthält 3 Wahlaufgaben, von denen zwei zu lösen sind. **Sollten alle drei Wahlaufgaben bearbeitet worden sein, wird Aufgabe 7 nicht bewertet.**
- Gemäß der Diplomprüfungsordnung ist Ihrer Bewertung folgendes **Notenschema** zugrunde zu legen:

Punktzahl		Note	
von	bis einschl.		
95	100	1,0	sehr gut
90	94,5	1,3	sehr gut
85	89,5	1,7	gut
80	84,5	2,0	gut
75	79,5	2,3	gut
70	74,5	2,7	befriedigend
65	69,5	3,0	befriedigend
60	64,5	3,3	befriedigend
55	59,5	3,7	ausreichend
50	54,5	4,0	ausreichend
0	49,5	5,0	nicht ausreichend

- Die korrigierten Arbeiten reichen Sie bitte spätestens bis zum

06. Juli 2005

in Ihr Studienzentrum ein. Dies muss persönlich oder per Einschreiben erfolgen. Der **angegebene Termin ist unbedingt einzuhalten.** Sollte sich aus vorher nicht absehbaren Gründen ein Terminüberschreitung abzeichnen, so bitten wir Sie, dies unverzüglich Ihrem Studienzentrenleiter anzuzeigen.

Pflichtaufgaben
Alle 4 Aufgaben sind zu bearbeiten.

Lösung 1 vgl. SB 1: Kap. 5, 6 insg. 24 Punkte

a) ***Alternative Lösungen:*** *Entweder*

1. Ableitung: **10 Pkte**

Der Lösungsansatz für Gl.(2) lautet nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz [s. SB 1, Gl. (6.22)) mit Bezug auf Gl. (1)]:

$$u_v \approx \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial n} u_n\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial d} u_d\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} u_{\hat{\gamma}}\right)^2}$$ (3 Pkte)

(Ersatzweise kann – infolge der Identität der Empfindlichkeitskoeffizienten – auch das lineare Fortpflanzungsgesetz zugrunde gelegt werden.)

Die Empfindlichkeits-Koeffizienten errechnen sich zu

$$\frac{\partial v}{\partial n} = d \cdot \hat{\gamma} \cdot (-1) - n^{-2} = \frac{d \cdot \hat{\gamma}}{n^2}$$ (3 Pkte)

Hinweis: Es ist zweckmäßig, hierzu die Gl. (1) nach $v \approx \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot d \cdot \hat{\gamma}$ umzustellen.

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{n-1}{n} \cdot \hat{\gamma}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{n-1}{n} \cdot d\,.$$ (2 Pkte)

Anmerkung: Verkürzt lassen sich die Koeffizienten als Vielfache von v ausdrücken zu:

$$\frac{\partial v}{\partial n} = \frac{v}{n^2} \cdot \frac{1}{\frac{n-1}{n}} = \frac{v}{n(n-1)}\,.$$

Entsprechend folgt:

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{n-1}{n} \cdot \hat{\gamma} = \frac{v}{d} \quad \text{und} \quad \frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{n-1}{n} \cdot d = \frac{v}{\hat{\gamma}}\,.$$

Die verkürzte, auf das Vielfache von v bezogene Lösungsdarstellung wird nicht gefordert. Insofern sind die Ableitungen in der ausführlichen Fassung als vollständig ausreichende Lösungen zu werten.

Alternativ

2. Reproduktion: **10 Pkte**

Reproduktion aus Gl. (2) setzt die Erkenntnis voraus, dass die Empfindlichkeits-Koeffizienten jeweils die partiellen Differentialquotienten sind und damit als Faktoren der quadrierten Messunsicherheitskomponenten im Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes abgelesen werden können. (3 Pkte)

Sie liefert unmittelbar:

$$\frac{\partial v}{\partial n} = \frac{v}{n(n-1)}$$ (3 Pkte)

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{v}{d}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{v}{\hat{\gamma}}\,.$$ (2 Pkte)

b) Relation der Empfindlichkeitswerte: **6 Pkte**

(1) $\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} : \frac{\partial v}{\partial n} : \frac{\partial v}{\partial d} \approx 100 : 17{,}5 : 1{,}25$. (2 Pkte)

(2)
- Dominant ist der Einfluss von $u_{\hat{\gamma}}$, sie ist daher die kritische Größe zur Minimierung der kombinierten Standardunsicherheit u_v. (2 Pkte)
- Unkritisch ist dagegen der Einfluss der Abweichung der Plattendicke Δd. Der Einfluss der Winkelabweichung ist rund 80 x größer als dieser und wiederum 4 x größer als der der Brechzahl. (Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Plattenabweichung deutlich größer zugelassen werden kann.) (2 Pkte)

c) Umstellung von Gl. (3) der Aufgabenstellung nach $u_{\hat{\gamma}}$ liefert: **8 Pkte**

$$u_v^2 \approx v^2 \left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 + 30 \cdot 10^{-8} \text{ bzw. } \left(\frac{u_v}{v}\right)^2 \approx \left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 + 30 \cdot 10^{-8}$$

$$\left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 \approx \left(\frac{u_v}{v}\right)^2 - 30 \cdot 10^{-8}$$

$$u_{\hat{\gamma}} \approx \hat{\gamma} \cdot \sqrt{\left(\frac{u_v}{v}\right)^2 - 30 \cdot 10^{-8}} \,. \qquad (4)$$ (4 Pkte)

Nach Gl. (4) wird:

$$u_{\hat{\gamma}} \approx 8 \frac{\pi}{180} \sqrt{\left(\frac{1{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}55}\right)^2 - 30 \cdot 10^{-8}} = 0{,}1396 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{144}{0{,}55} - 30} =$$ (3 Pkte)

$$= 0{,}1396 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{231{,}82} = 2{,}125 \cdot 10^{-4} \,\text{rad}$$

$$u_{\gamma''} \approx u_{\hat{\gamma}} \cdot 2 \cdot 10^5 = 21{,}25 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^5 \approx 42{,}5'' \,.$$ (1 Pkt)

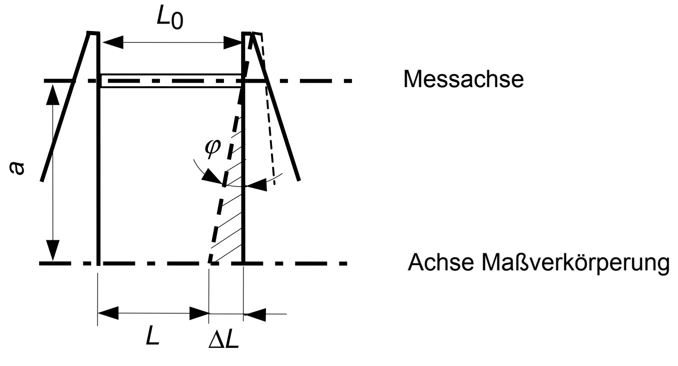
Lösung 2 — vgl. SB 2: Kap. 3 — insg. 21 Punkte

a) **4 Pkte**

Der ABBEsche Grundsatz ist <u>nicht</u> erfüllt. (1 Pkt)

Unbekannte Messstrecke (Achse der Messgröße) und bekannte Messstrecke (Achse der Maßverkörperung = Messspindel) sind parallel zueinander angeordnet. (3 Pkte)

b) **8 Pkte**



(5 Pkte)

Für das Fehlerdreieck gilt:

$$\Delta L = (-)\, a \cdot \tan\varphi \approx a \cdot \hat{\varphi} \,.$$ (3 Pkte)

(Hier keine Bewertung des Vorzeichens.)

c) **3 Pkte**

Vorzeichen (–) (1 Pkt)

Begründung:
Messlänge (auf Messachse) ist infolge Messabweichung um ΔL kürzer als die Messlänge am Prüfling (Länge ohne Kippung). Da nach der Definition gilt:

$$\Delta L = L - L_0$$

folgt

$$L = \Delta L + L_0 \,.$$ (2 Pkte)

d) Mit **6 Pkte**

$G = \Delta L_{\max}$ wird $G = -a_{\max} \cdot \hat{\varphi}_{\max}$. (2 Pkte)

Umgestellt folgt daraus

$$\hat{\varphi}_{\max} = -\frac{G}{a_{\max}}$$

$$= -\frac{7 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}}{15\,\text{mm}} = -4{,}67 \cdot 10^{-4}\,\text{rad.}$$ (2 Pkte)

Umrechnung in Winkelminuten:

$$\varphi'_{\max} \approx \hat{\varphi}_{\max} \cdot 3{,}4 \cdot 10^3 = -4{,}67 \cdot 10^{-4} \cdot 3{,}4 \cdot 10^3 = -1{,}588 \approx -2' \,.$$ (2 Pkte)

Lösung 3 — vgl. SB 2: Kap. 2.5 — insg. 9 Punkte

a) **5 Pkte**

Der TG ist mit Einschränkungen erfüllt. (2 Pkte)
(Fehlerhafter Auswahl einer der vorgegebenen Antwortvarianten ist mit 0 Pkte zu bewerten.)

Einschränkung: (3 Pkte)
Teilflächenberührung statt Punktberührung bei der Erfassung der(s) Istmaße(s) infolge der teilzylindrischen Gestaltung des Lehrenkörpers.
(Aussage Linienberührung anstelle von Teilflächenberührung ist als Lösung akzeptierbar.)

b) **4 Pkte**

Gutseitenbedingung (Paarungslehrung):
Alle Bestimmungsgrößen der geometrischen Gestalt (Maß und Form) sind gleichzeitig und damit unter völliger Umhüllung zu prüfen. (2 Pkte)

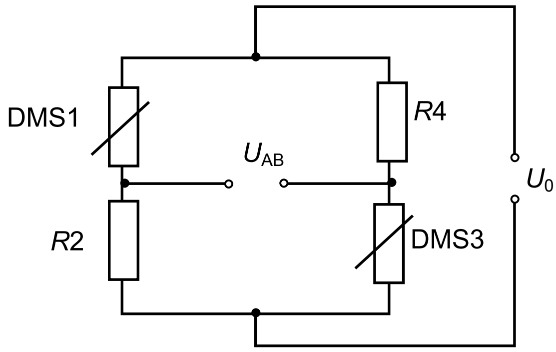
Ausschussseitenbedingung (Maßlehrung):
Jede Bestimmungsgröße für Maß und Form ist einzeln zu prüfen und gilt jeweils als qualitätskennzeichnend für die gesamte Gestalt. (2 Pkte)

Lösung 4 vgl. SB 4: Kap. 2.4, 3.2 insg. 16 Punkte

a) Die DMS sind gemäß folgender Schaltskizze zu positionieren:

6 Pkte

(Brückenschaltbild 2 Pkte, DMS-Positionen 2 Pkte)



Gleichwertige Schaltvarianten:

(1) Zweifach diagonaler Platztausch:

DMS3	$R2$
$R4$	DMS1

(2) Horizontale Spiegelung mit $U_{\mathrm{AB}} \approx -U_0 \frac{1}{2}\frac{\Delta R}{R}$:

$R2$	DMS3
DMS1	$R4$

(3) Vertikale Spiegelung mit $U_{\mathrm{AB}} \approx -U_0 \frac{1}{2}\frac{\Delta R}{R}$:

$R4$	DMS1
DMS3	$R2$

*(Varianten (2) und (3) erbringen bei Gleichspannungsbetrieb den gleichen Abweichungs**betrag** wie die skizzierte Anordnung und Variante (1).)*

b) **5 Pkte**

Bei vorher **abgeglichener Halbbrücke** folgt (mit Bezug auf SB 4, Kap.: 2.4, Gl. (2.16) und Kap.: 3.2.2, Text sowie Beispiel 3.3 bei einsetzender Beanspruchung der DMS entsprechend der Vorgabe:

Dehnung $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ bzw. DMS1, DMS3: $(R + \Delta R)$; R_2, R_4: R. (1 Pkt)

Für die Halbbrücke gilt:

$$U_{\mathrm{AB}} \approx U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon\,.$$ (2 Pkte)

Für die gegebenen Werte folgt

$$U_{\mathrm{AB}} \approx U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon = 6\ \mathrm{V} \cdot \frac{2{,}05}{2} \cdot \frac{780 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}}{1\ \mathrm{m}} = 4{,}797\ \mathrm{mV}\,.$$ (2 Pkte)

(Es bedarf keines Nachweises der Lösungsgleichung!)

Lösungsgleichung folgt aus

1. der allgemeinen Brückengleichung

$$U_{\mathrm{AB}} \approx U_0 \cdot \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right) = U_0 \cdot \frac{k}{4}\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right). \quad \text{(a)}$$

Für den applizierten Fall zweier baugleicher gedehnter DMS, folgt DMS1, DMS3:

$+\varepsilon_1 = +\varepsilon_3 = \varepsilon$ und $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 0$.

Eingesetzt in (a) folgt daraus geforderte größtmögliche Messsignal zu

$$U_{\mathrm{AB}} \approx U_0 \cdot \frac{k}{4}\left(+\varepsilon + \varepsilon\right) = U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon\,. \quad \text{(b)}$$

***2. der Ableitung** (für den gegebenen Belastungsfall):*

Nach dem Maschensatz gilt für die oberer Masche der Brücke $U_{AB} = U_1 - U_4$, gemäß Spannungsteilerregel

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad \frac{U_4}{U_0} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

und folglich

$$U_{AB} = U_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \qquad \text{(c)}$$

Infolge Baugleichheit der DMS gilt $R_i = R$ und $\Delta R_i = \Delta R$ mit $i = 1,2,...,4$.

Für den Lastfall folgt DMS1, DMS3: $R + \Delta R$, für $R2$, $R4$: R. Eingesetzt in Gl. (c) ergibt

$$U_{AB} = U_0 \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R} - \frac{R}{R + \Delta R + R} \right)$$

$$= U_0 \left(\frac{\Delta R}{2R + \Delta R} \right) \approx U_0 \cdot \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} = U_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot k \cdot \varepsilon \qquad \text{(d)}$$

c) **5 Pkte**

(1) Nach Gl. (3.8)

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$ (1 Pkt)

folgt

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon = 120\,\Omega \cdot 2{,}05 \cdot 780 \frac{10^{-6}\,\text{m}}{\text{m}} = 19{,}19 \cdot 10^{-2}\,\Omega \approx 0{,}2\,\Omega..$$ (2 Pkte)

(2) Die prozentuale Widerstandsänderung lautet

$$\Delta R_{\%} = \frac{\Delta R}{R} \cdot 10^2 = k \cdot \varepsilon \cdot 10^2$$ (1 Pkt)

mit den Werten

$$\Delta R_{\%} = 2{,}05 \cdot 780 \cdot \frac{10^{-6}\,\text{m}}{1\text{m}} \cdot 10^2 = 0{,}16\,\%.$$ (1 Pkt)

Wahlaufgaben
Von drei sind zwei Aufgaben auszuwählen und zu lösen.
(Werden alle drei Wahlaufgaben bearbeitet, so sind die Ergebnisse der 7. Aufgabe nicht zu werten.)

Lösung 5 vgl. SB 3: Kap. 4; SB 5: Kap. 5.2 insg. 15 Punkte

a) **max. 9 Pkte**

(1) Komplexität der Prüfaufgabenstellung für ein Messobjekt in Bezug auf (3 Pkte)
- die Dimensionalität der Messgrößen (1-D bis 3-D-Messungen),
- die gleichzeitige Ermittlung von Maß-, Form- und Lageabweichungen;

(2) Spezifik der Messgrößen, wofür die konventionellen Abstandsmessung keine Alternative darstellt, wie z.B. (3 Pkte)
- Vermessung von Freiformflächen, Verzahnungsgeometrien,
- Funktionsprüfungen im Einbauzustand,
- Lehrensimulation,
- Fertigungssimulation;

(3) Messinformationsgewinn durch repräsentative Messpunkterfassung an geometrischen Formelementen bis hin zur kontinuierlichen Messung z. B. von Formabweichungen (Scanning-Modus); (3 Pkte)

(4) Höhere Messgenauigkeit durch
- Verminderung geometrisch bedingter Messabweichungen durch System dreier orthogonaler Messachsen und (3 Pkte)
- geräteinterne rechnergestützte Korrektur von Messabweichungen.

b) **max. 6 Pkte**

(1) Kurze Messzeiten; (2 Pkte)

(2) Geringer Rüstaufwand (insbesondere bei mehrdimensionalen Messaufgaben) – Ersatz aufwendiger Prüfvorrichtungen und Ausrichtarbeiten durch Aufnahme des Werkstückes in „einer Aufspannung“ ohne Ausrichtarbeiten (Koordinatentransformation); (2 Pkte)

(3) Hohe Flexibilität; (2 Pkte)

(4) Automatisierter Messablauf (Generierung von CNC-Messprogrammen durch informationstechnische Kopplung mit Konstruktion und Fertigung.); (2 Pkte)

(5) Allgemein bzw. z. T. relativ hohe Kosten, wobei das Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei komplexen Messaufgaben sich eher günstig gestaltet; (2 Pkte)

(6) Verwertung der Messinformationen in Qualitätsregelkreisen und damit zur Prozessqualifikation. (2 Pkte)

Lösung 6 — vgl. SB 1: Kap. 4.2.1; SB 4: Kap. 3.2.1.2 — insg. 15 Punkte

a) Für die Empfindlichkeit des Sensors folgt nach SB 1, Gl. (4.5) **9 Pkte**

$$E = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}s}.$$ (1 Pkt)

Die Differentation von Gl. (1) verlangt die Anwendung der Kettenregel. Zweckmäßig erfolgt deshalb die substituierte Darstellung der Funktion:

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot \left[\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2\,s\right]^{-1} \quad \text{mit} \quad \left[\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2s\right] = K$$

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot K^{-1}.$$ (2 Pkte)

Damit folgt nach der Kettenregel:

$$E = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}s} = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}K}\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}s}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}K} = -\mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot K^{-2}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}s} = 2$$ (1 Pkt)

Mithin wird

$$E = -2\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{\left(\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2s\right)^2} \quad \text{oder verkürzt} \quad E = -2\frac{L}{K}.$$ (1 Pkt)

b) Schlussfolgerungen: **6 Pkte**

1. Die Empfindlichkeit ändert sich mit der Spaltgröße. Sie erreicht für $s = 0$ das Maximum, für sehr große s das Minimum. (2 Pkte)
2. Größe des linearisierten Anzeigebereiche vermindert sich mit größer werdender Empfindlichkeit. (2 Pkte)
3. Optimale Empfindlichkeit durch Arbeitspunktlage im unteren Drittel der statischen Kennlinie (Grundabstand s_0 für symmetrischen Anzeigebereich erforderlich). (2 Pkte)

Lösung 7 vgl. SB 5: Kap. 2.3 insg. 15 Punkte

a) (1) Berechnung der Eingangsgrößen $\overline{\overline{x}}$ und $\overline{S}_x$ nach Gl. (2.11) und (2.8) aus der Wertetabelle mittels Taschenrechner im SD-Modus (Statistische Rechnungen): **11 Pkte**

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^{k} \overline{x}_j$$

Direkte Berechnung mit dem Taschenrechner ergibt:

$$\overline{\overline{x}} = 2{,}7966 \text{ mm} .$$ (2 Pkte)

$$\overline{S}_x = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} S_{xj}^2}$$

Zwischenrechnung mittels Taschenrechner:

$$\sum_{1}^{8} S_{xj}^{\;2} = 751{,}75 \;\; (\mu\text{m}^2)$$

und mit weiterer Berechnung

$$\overline{S}_x = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot 751{,}75} \;\mu\text{m} = 9{,}69 \;\mu\text{m}.$$ (3 Pkte)

Nach Gl. (2.7) folgt für den Prozessfähigkeitsindex c_p:

$$c_\text{p} = \frac{T}{6 \cdot \overline{S}_x}$$ (1 Pkt)

$$c_\text{p} = \frac{60 \,\mu\text{m}}{6 \cdot 9{,}69 \,\mu\text{m}} = 1{,}032$$ (1 Pkt)

(2) Nach Gl. (2.9) folgt für den kritischen Prozessfähigkeitsindex c_pk:

$$c_\text{pk} = \frac{\Delta_\text{krit}}{3 \cdot \overline{S}_x}$$ (1 Pkt)

mit $\Delta_\text{krit} = \min\left(G_\text{o} - \overline{\overline{x}};\; \overline{\overline{x}} - G_\text{u}\right) \Rightarrow$

$$\left(2{,}8300 - 2{,}7966 = 0{,}0334;\; 2{,}7700 - 2{,}7966 = 0{,}0266\right)$$

$$\Delta_\text{krit} = 0{,}0266 \text{ mm}.$$ (2 Pkte)

$$c_\text{pk} = \frac{26{,}8 \,\mu\text{m}}{3 \cdot 9{,}69 \,\mu\text{m}} = 0{,}922.$$ (1 Pkt)

b) **4 Pkte**

- Der Prozess ist mit c_p = 1,032 **potenziell gerade noch fähig**, da etwas mehr als 99,73 % der Erzeugnisse den Anforderungen genügen. (1 Pkt)
- Für die potenzielle Prozessfähigkeit bestehen fast keine Reserven. Das bedeutet, dass sich der Prozess bereits nach diesem Index in einer kritischen Phase befindet. (1 Pkt)
- Gemäß dem Index c_{pk} ist aber der Prozess eindeutig nicht fähig. Der Prozess verläuft außerdem nicht zentriert, d. h., er weicht systematisch und einseitig von geforderten Abläufen ab. (1 Pkt)
- Der Prozess muss fähig und sicher gemacht werden durch unverzügliche Untersuchung der Prozessschritte, Aufdeckung systematischer Fehler und deren Korrektur. (1 Pkt)

Es wird empfohlen, den Bewertungsrahmen für die verbale Beantwortung dieser Teilaufgabe angemessen weit zu stecken.

Klausur – Mantelbogen

UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Name, Vorname	
Matrikel-Nr.	
Studienzentrum	
Studiengang	**Wirtschaftsingenieurwesen**
Fach	**Messtechnik/Qualitätssicherung**
Art der Leistung	**Prüfungsleistung**
Klausur-Knz.	**WI-MQS-P12–050618**
Datum	**18.06.2005**

Ausgegebene Arbeitsbogen ______________

____
Ort, Datum

____
Name in Druckbuchstaben und Unterschrift Aufsichtführende(r)

Abgegebene Arbeitsbogen ______________

____
Ort, Datum

____
Prüfungskandidat(in)

		Pflichtaufgaben: 4 von 4				Wahlaufgaben: 2 von 3			Σ	Note
Aufgabe		1	2	3	4	5	6	7		
max. Punktezahl		24	21	9	16	15	15	15	100	
Bewertung	1. Korrektur									
	ggf. 2. Korrektur[1]									
	Festlegung der Prüfungsnote[2]									

____
1. Korrektur durch (Name in Druckbuchstaben)

____
Datum, Unterschrift

____
ggf. 2. Korrektur durch (Name in Druckbuchstaben)

____
Datum, Unterschrift

____
Festlegung der Prüfungsnote durch (Name in Druckbuchstaben)

____
Datum, Unterschrift

1 2. Korrektur gemäß Festlegungen zur Qualitätssicherung.

2 Festlegung der Prüfungsnote durch den Fachbereich. Sie erfolgt bei unterschiedlicher Benotung in der 1. und 2. Korrektur.

Anmerkungen zur 1. Korrektur:
Datum, Unterschrift
Anmerkungen zur 2. Korrektur (gemäß Festlegung zur Qualitätssicherung):
Datum, Unterschrift
Festlegung der Prüfungsnote: (Bemerkungen sind nur einzutragen, wenn eine erneute Bewertung durch den Fachbereich erfolgt.)
Datum, Unterschrift

HAMBURGER FERN-HOCHSCHULE HFH
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Studiengang	**Wirtschaftsingenieurwesen**
Fach	**Messtechnik/Qualitätssicherung**
Art der Leistung	**Prüfungsleistung**
Klausur-Knz.	**WI-MQS-P12–050618**
Datum	**18.06.2005**

Bezüglich der Anfertigung Ihrer Arbeit sind folgende Hinweise verbindlich:

- Verwenden Sie ausschließlich das **vom Aufsichtsführenden zur Verfügung gestellte Papier**, und geben Sie sämtliches Papier (Lösungen, Schmierzettel und nicht gebrauchte Blätter) zum Schluss der Klausur wieder bei Ihrem Aufsichtsführenden ab. Eine nicht vollständig abgegebene Klausur gilt als nicht bestanden.
- Beschriften Sie jeden Bogen mit Ihrem **Namen** und Ihrer **Immatrikulationsnummer**. Lassen Sie bitte auf jeder Seite 1/3 ihrer Breite als **Rand für Korrekturen** frei, und nummerieren Sie die Seiten fortlaufend. Notieren Sie bei jeder Ihrer Antworten, auf welche Aufgabe bzw. Teilaufgabe sich diese bezieht.
- Die Lösungen und Lösungswege sind in einer für den Korrektor **zweifelsfrei lesbaren Schrift** abzufassen. Korrekturen und Streichungen sind eindeutig vorzunehmen. Unleserliches wird nicht bewertet.
- Bei numerisch zu lösenden Aufgaben ist außer der Lösung stets der **Lösungsweg anzugeben**, aus dem eindeutig hervorzugehen hat, wie die Lösung zustande gekommen ist.
- Zur Prüfung sind bis auf Schreib- und Zeichenutensilien ausschließlich die nachstehend genannten **Hilfsmittel** zugelassen. Werden andere als die hier angegebenen Hilfsmittel verwendet oder **Täuschungsversuche** festgestellt, gilt die Prüfung als nicht bestanden und wird mit der **Note 5** bewertet.
- Die vorliegende Klausur enthält 3 Wahlaufgaben, von denen zwei zu lösen sind. **Sollten Sie alle drei Wahlaufgaben bearbeiten, wird Aufgabe 7 nicht bewertet.**

Bearbeitungszeit:	90 Minuten
Anzahl Aufgaben:	7 (davon 6 zu lösen)
Höchstpunktzahl:	100

Hilfsmittel
Studienbriefe, inkl. Laboranleitung Taschenrechner der HFH Formelsammlung eigener Wahl

Vorläufiges Bewertungsschema:

Punktzahl		Note	
von	bis einschl.		
95	100	1,0	sehr gut
90	94,5	1,3	sehr gut
85	89,5	1,7	gut
80	84,5	2,0	gut
75	79,5	2,3	gut
70	74,5	2,7	befriedigend
65	69,5	3,0	befriedigend
60	64,5	3,3	befriedigend
55	59,5	3,7	ausreichend
50	54,5	4,0	ausreichend
0	49,5	5,0	nicht ausreichend

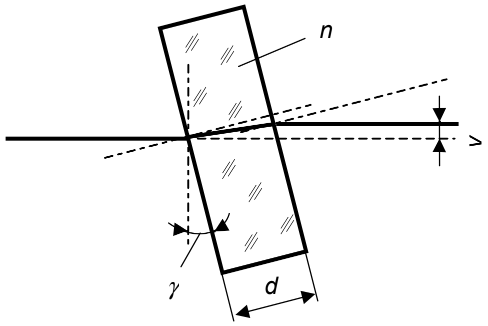
Viel Erfolg!

Pflichtaufgaben
Alle 4 Aufgaben sind zu bearbeiten.

Aufgabe 1 insg. 24 Punkte

Eine um einen Winkel γ gekippte planparallele Glasplatte von der Dicke d erzeugt in einem optischen Abbildungsstrahlengang eine Parallelversetzung v des von ihr erzeugten virtuellen Bildes gegenüber dem reellen Gegenstand.

Praktisch nutzt man diesen Effekt, um die Messgröße v mittelbar über den Kippwinkel γ zu messen (z. B. bei der Fluchtungsprüfung mit Planplattenvorsatz). Dabei bilden die Brechzahl des Glases n und die Plattendicke d invariante Größen.



n Brechzahl der Glasplatte
d Plattendicke
γ Kippwinkel der planparallelen Glasplatte
v Parallelversetzung

Für die Strahlenversetzung gilt bei Beschränkung auf kleine Kippwinkel γ die Näherungsfunktion

$$v \approx \frac{n-1}{n} \cdot d \cdot \widehat{\gamma} . \qquad (1)$$

Für die **kombinierte Standardunsicherheit** der Strahlenversetzung gilt entsprechend näherungsweise

$$u_v \approx v \cdot \sqrt{\left(\frac{u_n}{n \cdot (n-1)}\right)^2 + \left(\frac{u_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{u_{\widehat{\gamma}}}{\widehat{\gamma}}\right)^2} . \qquad (2)$$

Für einen Anwendungsfall liegt folgender Datensatz vor:

- Nennabmessungen
  - $v = (\pm)\ 0{,}55$ mm (Anwendungsbereich $v = 0{,}55$ mm symmetrisch zur Horizontalen)
  - $\gamma° = (\pm)\ 8°$ (maximaler Kippwinkel für den Anwendungsbereich $\gamma = 8°$ symmetrisch zur Horizontalen)
  - $d = 11{,}568$ mm (mittlere Plattendicke)
  - $n = 1{,}5163$.
- Messunsicherheiten:
  - (Zulässige) Standardunsicherheit der Strahlenversetzung: $u_v = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ mm
  - Standardunsicherheit der Brechzahl: $u_n = 2 \cdot 10^{-4}$
  - Standardunsicherheit der Plattendicke: $u_d = 5 \cdot 10^{-4}$ mm.

Das optische System soll hinsichtlich der Messunsicherheiten näher untersucht werden. Dazu sind folgende Aufgaben zu lösen:

a) Leiten Sie die Empfindlichkeitskoeffizienten $\frac{\partial v}{\partial n}$, $\frac{\partial v}{\partial d}$ und $\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}}$ ab **10 Pkte**

oder

reproduzieren Sie diese aus Gl. (2).

Hinweis: Bestimmen Sie den Lösungsansatz für die Herleitung von Gl. (2).

b) Für das Verhältnis der Empfindlichkeits-Koeffizienten gilt die Relation **6 Pkte**

$\frac{\partial v}{\partial n} : \frac{\partial v}{\partial d} : \frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} \approx 0{,}7 : 0{,}05 : 4$ (gerundete Werte).

(1) Geben Sie die Relation in %-Werten an, wobei der zahlenmäßig größte Koeffizient 100 % zu setzen ist.

(2) Beurteilen Sie die Relation, und bestimmen Sie die kritische (die entscheidende) Größe zur Minimierung der kombinierten Standardunsicherheit u_v.

c) Für den vorliegenden Anwendungsfall lässt sich Gl. (2) zur Gewinnung von Schätzwerten reduzieren auf die Näherungsfunktion **8 Pkte**

$$u_v \approx v \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 + 30 \cdot 10^{-8}}\ . \tag{3}$$

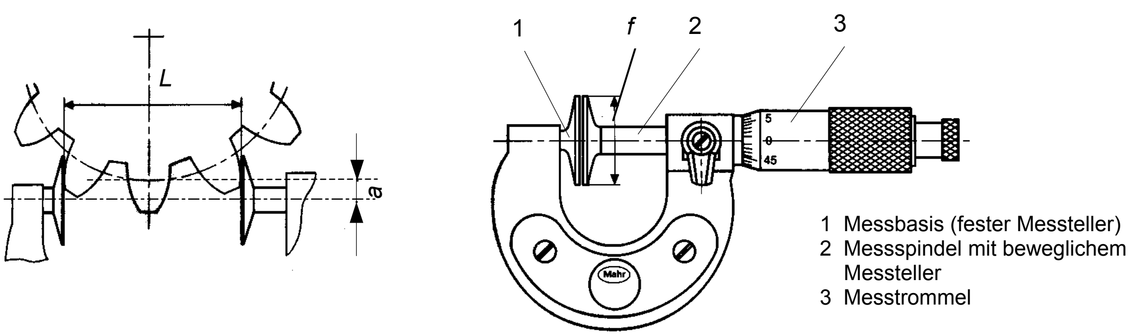
Ermitteln Sie daraus die Schätzwerte für die Standardmessunsicherheit des Kippwinkels $u_{\hat{\gamma}}$ (in rad) und $u_{\gamma''}$ (in Winkelsekunden).

Hinweis zur Umrechnung von Winkeleinheiten:

rad ⇒ Grad/...	$\varphi° = \hat{\varphi} \cdot \frac{180}{\pi}$	$\varphi' \approx \hat{\varphi} \cdot 3{,}4 \cdot 10^3$	$\varphi'' \approx \hat{\varphi} \cdot 2 \cdot 10^5$
Grad/... ⇒ rad	$\hat{\varphi} = \varphi° \cdot \frac{\pi}{180}$	$\hat{\varphi} \approx \varphi' \cdot 3 \cdot 10^{-4}$	$\hat{\varphi} \approx \varphi'' \cdot 5 \cdot 10^{-6}$

Aufgabe 2 insg. 21 Punkte

Die dargestellte Bügelmessschraube mit tellerförmigen Messflächen ist u. a. zur Zahnweitenmessung (der indirekten Bestimmung der Zahndicke) geeignet. Deren Messgenauigkeit soll analysiert werden.



a) Ist bei dieser Konstruktion das ABBEsche Komparatorprinzip erfüllt? Begründen Sie Ihre Aussage. **4 Pkte**

b) Entwickeln Sie die allgemeine Funktion zur Berechnung der systematischen Messabweichung („Fehler"-Funktion) $\Delta L = f(a,\varphi)$. **8 Pkte**

Infolge des unvermeidbaren Führungsspiels der Messspindel (2) und der Hebelwirkung des beweglichen Messtellers (2) verkippt diese bei kraftschlüssiger Anlage der Messsteller am Messobjekt um den Kippwinkel φ.

Für den Anwendungsfall betrage der wirksame Abstand $a = f/3$ (f = Durchmesser der Messteller). Die Messlänge betrage L.

Anleitung:
Skizzieren Sie ein Hilfsdreieck mit den Bestimmungsgrößen, und leiten Sie daraus die Beziehung ab.

Hinweis:
Für kleine Winkel kann (mit Bezug auf die Potenzreihenentwicklung) angenähert $\tan\varphi \approx \hat{\varphi}$ und $\cos\varphi \approx 1 - \frac{\hat{\varphi}^2}{2}$ gesetzt werden.

c) Welches Vorzeichen ist dieser Messabweichung zuzuschreiben? Begründen bzw. beweisen Sie Ihre Aussage. **3 Pkte**

d) **Für den allgemeinen Anwendungsfall des Gerätetyps** (z.B. auch für Messungen von Wellenabsätzen oder Einstichabständen) ist der zulässige Kippwinkel φ_{max} in Winkelminuten zu bestimmen, wenn folgende Gerätedaten zugrunde gelegt werden: **6 Pkte**

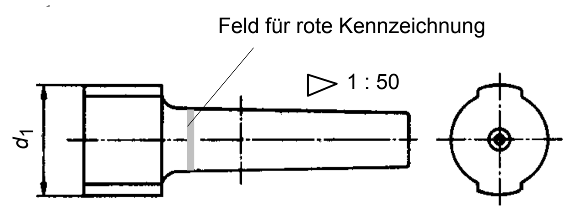
Maximale Messlänge:	L_{max} = 195 mm
Größter Achsabstand:	$a_{max} = f/2$= 15 mm
Fehlergrenze nach DIN 863:	G = 7 µm.

Hinweis: Formeln zur Umrechnung von Winkeleinheiten siehe Aufgabe 1 c).

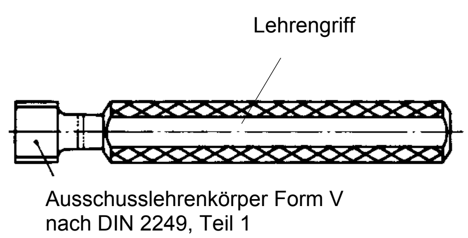
Aufgabe 3 insg. 9 Punkte

Der unter (1) abgebildete **Ausschusslehrenkörper** – mit verminderter Prüffläche nach DIN 2249, Teil 1 der Form V für Bohrungen von 1 bis 40 mm Nenndurchmesser (d_1) – findet in **Ausschusslehrdornen von 5 bis 40 mm Nenndurchmesser** gemäß Darstellung (2) Anwendung.

(1)



(2)



a) Inwieweit erfüllt dieser Ausschusslehrenkörper den TAYLORschen Grundsatz (TG)? Geben Sie an, ob der TG **5 Pkte**

- vollständig erfüllt ist,
- eingeschränkt erfüllt ist oder
- extrem untererfüllt ist.

Begründen Sie Ihre Entscheidung.

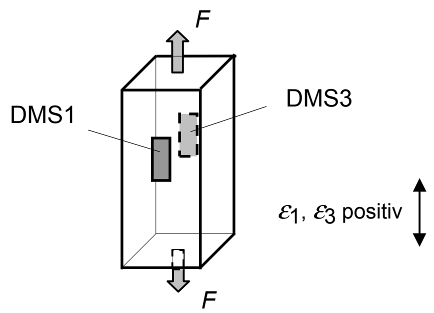
b) Formulieren Sie die messtechnischen Anforderungen an die Gestaltung **4 Pkte**

- der Gutseite und der
- der Ausschussseite

einer Lehre nach dem TG in allgemeiner Form.

Aufgabe 4 insg. 16 Punkte

Ein mit Zugkraft beanspruchtes Konstruktionsteil, das mit 2 aktiv messenden Dehnungsmessstreifen (DMS) bestückt ist, soll in Verbindung mit einer Ausschlagbrückenschaltung gemessen werden.



Die verwendeten DMS sind baugleich, haben einen elektrischen Widerstand von je R = 120 Ω und einen k-Faktor $k = 2{,}05$.

Folgende Aufgaben sind zu lösen:

a) Skizzieren Sie eine Ausschlagbrückenschaltung, mit der das Messsignal den jeweils größtmöglichen Wert annehmen kann. Positionieren Sie die nummerierten DMS nach dieser Forderung. **6 Pkte**

b) Berechnen Sie die Ausgangsspannung U_{AB} für eine Längenänderung an der Oberfläche des Federkörpers von $\varepsilon = 780\ \mu\text{m/m}$ bei einer Brückenspannung von $U_0 = 6\ \text{V}$. **5 Pkte**

c) Berechnen Sie **5 Pkte**

(1) die Widerstandsänderung ΔR, die an jedem der beiden DMS auftritt;

(2) die entsprechende prozentuale Widerstandsänderung $\Delta R_{\%}$.

Wahlaufgaben

Es sind zwei Aufgaben Ihrer Wahl zu lösen.

(Beachten Sie bitte, dass bei Bearbeitung aller drei Wahlaufgaben die 7. Aufgabe nicht gewertet wird.)

Aufgabe 5 insg. 15 Punkte

Nennen Sie Entscheidungskriterien für den Einsatz rechnerbasierter Koordinatenmessgeräte anstelle konventioneller Messgeräte zur Abstandsmessung

a) aus technischer Sicht, **9 Pkte**

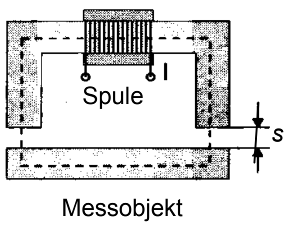
b) aus wirtschaftlicher Sicht. **6 Pkte**

Es sind jeweils **drei** Kriterien zu nennen.

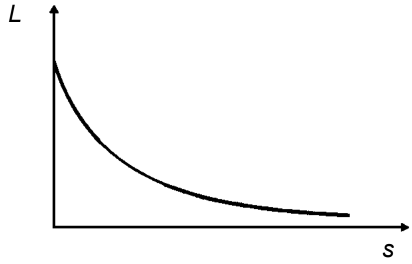
Aufgabe 6 insg. 15 Punkte

Für die berührungslose Messung ferromagnetischer Messobjekte mittels eines **induktiven Wegsensors** nach dem Querankerprinzip (Abb. (1)) gilt bezüglich der Abhängigkeit der Induktivität L von der Größe des Luftspaltes s die statische Kennlinie nach Abb. (2).

(1)



(2)



Die Kennlinienfunktion lautet:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{\frac{l_{\text{Fe}}}{\mu_{\text{Fe}}} + 2s}. \qquad (1)$$

mit μ_0 als absolute Permeabilität des Vakuums und μ_{Fe} als relative Permeabilität des Eisenkerns. N ist die Windungszahl, A der Querschnitt des magnetischen Weges der Spule und s drückt die Hälfte des Luftweg aus. L_{Fe} entspricht dem Weg der Magnetfeldlinien im Eisenkern.

a) Berechnen Sie die Empfindlichkeit des Sensors als allgemeine Funktion. **9 Pkte**

b) Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus dem Verlauf der statischen Kennlinie für die Dimensionierung eines linearisierten Anzeigebereiches optimaler Empfindlichkeit ziehen? **6 Pkte**

Aufgabe 7 insg. 15 Punkte

Wegen zunehmender Reklamationen sieht sich ein Unternehmen der Schaltgerätebranche genötigt, die Prozessfähigkeit seiner Fertigung für Schaltstößel zu untersuchen. Der Nenndurchmesser des Stößels beträgt $d = 2{,}80$ mm. Die Maßtoleranz beträgt bei gleich großen Abmaßen $T = 0{,}06$ mm.

Es werden 8 Stichproben mit einen Stichprobenumfang zu je 10 Teilen genommen und der Durchmesser der Teile gemessen. Die Werte können als normalverteilt angesehen werden. In einem ersten Schritt der Auswertung wurden die folgenden Mittelwerte $\bar{x}$ und die Standardabweichungen S_{xj} der Stichproben berechnet:

	Stichprobe							
Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\bar{x}$ in mm	2,795	2,796	2,794	2,801	2,789	2,802	2,799	2,797
S_{xj} in µm	11,0	9,2	10,7	9,2	9,8	8,7	8,9	9,8

a) Berechnen Sie aus den gegebenen und den bisher berechneten Werten **11 Pkte**
   (1) den Prozessfähigkeitsindex c_{p},
   (2) den Prozessfähigkeitsindex c_{pk}.

b) Stellen Sie anhand **beider** ermittelter Prozessfähigkeitsindizes fest, wie der untersuchte Prozess eingeschätzt und wie daraufhin in den Prozess eingegriffen werden muss. **4 Pkte**

HAMBURGER · FERN-HOCHSCHULE · HFH
UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Korrekturrichtlinie zur Prüfungsleistung Messtechnik/Qualitätssicherung am 18.06.2005 Wirtschaftsingenieurwesen WI-MQS-P12–050618

Für die Bewertung und Abgabe der Prüfungsleistung sind folgende Hinweise verbindlich:

- Die **Vergabe der Punkte** nehmen Sie bitte so vor, wie in der Korrekturrichtlinie ausgewiesen. Eine summarische Angabe von Punkten für Aufgaben, die in der Korrekturrichtlinie detailliert bewertet worden sind, ist nicht gestattet.
- Nur dann, wenn die Punkte für eine Aufgabe nicht differenziert vorgegeben sind, ist ihre Aufschlüsselung auf die einzelnen Lösungsschritte Ihnen überlassen.
- Stoßen Sie bei Ihrer Korrektur auf einen anderen richtigen als den in der Korrekturrichtlinie angegebenen Lösungsweg, dann nehmen Sie bitte die Verteilung der Punkte sinngemäß zur Korrekturrichtlinie vor.
- Bitte achten Sie auf **Folgefehler**. Wurden bezogen auf eine falsche Lösung zu Folgefragen richtige Antworten bzw. Lösungen angegeben, dann sind diese ohne Punktabzug zu bewerten. **Das bezieht sich auf Aufgaben jeglicher Art, nicht nur auf numerisch zu lösende.**
- Ihre Korrekturhinweise und Punktbewertung nehmen Sie bitte in einer **zweifelsfrei lesbaren Schrift** vor.
- Die von Ihnen vergebenen Punkte und die daraus sich gemäß dem nachstehenden Notenschema ergebende Bewertung tragen Sie in den **Klausur-Mantelbogen** sowie in die **Ergebnisliste** ein.
- Die vorliegende Klausur enthält 3 Wahlaufgaben, von denen zwei zu lösen sind. **Sollten alle drei Wahlaufgaben bearbeitet worden sein, wird Aufgabe 7 nicht bewertet.**
- Gemäß der Diplomprüfungsordnung ist Ihrer Bewertung folgendes **Notenschema** zugrunde zu legen:

Punktzahl		Note	
von	bis einschl.		
95	100	1,0	sehr gut
90	94,5	1,3	sehr gut
85	89,5	1,7	gut
80	84,5	2,0	gut
75	79,5	2,3	gut
70	74,5	2,7	befriedigend
65	69,5	3,0	befriedigend
60	64,5	3,3	befriedigend
55	59,5	3,7	ausreichend
50	54,5	4,0	ausreichend
0	49,5	5,0	nicht ausreichend

- Die korrigierten Arbeiten reichen Sie bitte spätestens bis zum

06. Juli 2005

in Ihr Studienzentrum ein. Dies muss persönlich oder per Einschreiben erfolgen. Der **angegebene Termin ist unbedingt einzuhalten.** Sollte sich aus vorher nicht absehbaren Gründen ein Terminüberschreitung abzeichnen, so bitten wir Sie, dies unverzüglich Ihrem Studienzentrenleiter anzuzeigen.

Pflichtaufgaben
Alle 4 Aufgaben sind zu bearbeiten.

Lösung 1 vgl. SB 1: Kap. 5, 6 insg. 24 Punkte

a) ***Alternative Lösungen:*** ***Entweder***

1. Ableitung: **10 Pkte**

Der Lösungsansatz für Gl.(2) lautet nach dem Unsicherheitsfortpflanzungsgesetz [s. SB 1, Gl. (6.22)) mit Bezug auf Gl. (1)]:

$$u_v \approx \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial n} u_n\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial d} u_d\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} u_{\hat{\gamma}}\right)^2}$$ (3 Pkte)

(Ersatzweise kann – infolge der Identität der Empfindlichkeitskoeffizienten – auch das lineare Fortpflanzungsgesetz zugrunde gelegt werden.)

Die Empfindlichkeits-Koeffizienten errechnen sich zu

$$\frac{\partial v}{\partial n} = d \cdot \hat{\gamma} \cdot (-1) - n^{-2} = \frac{d \cdot \hat{\gamma}}{n^2}$$ (3 Pkte)

Hinweis: Es ist zweckmäßig, hierzu die Gl. (1) nach $v \approx \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot d \cdot \hat{\gamma}$ umzustellen.

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{n-1}{n} \cdot \hat{\gamma}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{n-1}{n} \cdot d \, .$$ (2 Pkte)

Anmerkung: Verkürzt lassen sich die Koeffizienten als Vielfache von v ausdrücken zu:

$$\frac{\partial v}{\partial n} = \frac{v}{n^2} \cdot \frac{1}{\frac{n-1}{n}} = \frac{v}{n(n-1)} \, .$$

Entsprechend folgt:

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{n-1}{n} \cdot \hat{\gamma} = \frac{v}{d} \quad \text{und} \quad \frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{n-1}{n} \cdot d = \frac{v}{\hat{\gamma}} \, .$$

Die verkürzte, auf das Vielfache von v bezogene Lösungsdarstellung wird nicht gefordert. Insofern sind die Ableitungen in der ausführlichen Fassung als vollständig ausreichende Lösungen zu werten.

Alternativ

2. Reproduktion: **10 Pkte**

Reproduktion aus Gl. (2) setzt die Erkenntnis voraus, dass die Empfindlichkeits-Koeffizienten jeweils die partiellen Differentialquotienten sind und damit als Faktoren der quadrierten Messunsicherheitskomponenten im Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes abgelesen werden können. (3 Pkte)

Sie liefert unmittelbar:

$$\frac{\partial v}{\partial n} = \frac{v}{n(n-1)}$$ (3 Pkte)

$$\frac{\partial v}{\partial d} = \frac{v}{d}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{v}{\hat{\gamma}} \, .$$ (2 Pkte)

b) Relation der Empfindlichkeitswerte: **6 Pkte**

(1) $\frac{\partial v}{\partial \hat{\gamma}} : \frac{\partial v}{\partial n} : \frac{\partial v}{\partial d} \approx 100:17{,}5:1{,}25\,.$ (2 Pkte)

(2)
- Dominant ist der Einfluss von $u_{\hat{\gamma}}$, sie ist daher die kritische Größe zur Minimierung der kombinierten Standardunsicherheit u_v. (2 Pkte)
- Unkritisch ist dagegen der Einfluss der Abweichung der Plattendicke Δd. Der Einfluss der Winkelabweichung ist rund 80 x größer als dieser und wiederum 4 x größer als der der Brechzahl. (Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Plattenabweichung deutlich größer zugelassen werden kann.) (2 Pkte)

c) Umstellung von Gl. (3) der Aufgabenstellung nach $u_{\hat{\gamma}}$ liefert: **8 Pkte**

$$u_v{}^2 \approx v^2\left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 + 30\cdot 10^{-8} \text{ bzw. } \left(\frac{u_v}{v}\right)^2 \approx \left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 + 30\cdot 10^{-8}$$

$$\left(\frac{u_{\hat{\gamma}}}{\hat{\gamma}}\right)^2 \approx \left(\frac{u_v}{v}\right)^2 - 30\cdot 10^{-8}$$

$$u_{\hat{\gamma}} \approx \hat{\gamma}\cdot\sqrt{\left(\frac{u_v}{v}\right)^2 - 30\cdot 10^{-8}}\,. \qquad (4)$$ (4 Pkte)

Nach Gl. (4) wird:

$$u_{\hat{\gamma}} \approx 8\frac{\pi}{180}\sqrt{\left(\frac{1{,}2\cdot 10^{-3}}{0{,}55}\right)^2 - 30\cdot 10^{-8}} = 0{,}1396\cdot 10^{-4}\sqrt{\frac{144}{0{,}3025} - 30} =$$ (3 Pkte)

$$= 0{,}1396\cdot 10^{-4}\cdot\sqrt{446{,}03} = 2{,}948\cdot 10^{-4}\,\text{rad}$$

$$u_{\gamma''} \approx u_{\hat{\gamma}}\cdot 2\cdot 10^5 = 21{,}25\cdot 10^{-5}\cdot 2\cdot 10^5 = 58{,}96 \approx 1'\,.$$ (1 Pkt)

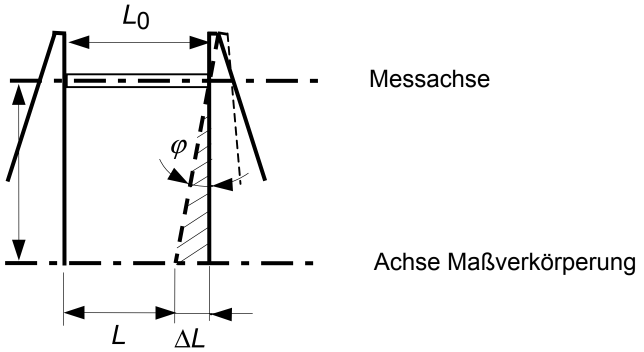
Lösung 2 — vgl. SB 2: Kap. 3 — insg. 21 Punkte

a) **4 Pkte**

Der ABBEsche Grundsatz ist <u>nicht</u> erfüllt. (1 Pkt)

Unbekannte Messstrecke (Achse der Messgröße) und bekannte Messstrecke (Achse der Maßverkörperung = Messspindel) sind parallel zueinander angeordnet. (3 Pkte)

b) **8 Pkte**



(5 Pkte)

Für das Fehlerdreieck gilt:

$$\Delta L = (-)\; a\cdot\tan\varphi \approx a\cdot\hat{\varphi}\,.$$ (3 Pkte)

(Hier keine Bewertung des Vorzeichens.)

c) **3 Pkte**

Vorzeichen (–) (1 Pkt)

Begründung:
Messlänge (auf Messachse) ist infolge Messabweichung um ΔL kürzer als die Messlänge am Prüfling (Länge ohne Kippung). Da nach der Definition gilt:

$$\Delta L = L - L_0$$

folgt

$$L = \Delta L + L_0 \,.$$ (2 Pkte)

d) Mit **6 Pkte**

$G = \Delta L_{\max}$ wird $G = -a_{\max} \cdot \hat{\varphi}_{\max}$. (2 Pkte)

Umgestellt folgt daraus

$$\hat{\varphi}_{\max} = -\frac{G}{a_{\max}}$$

$$= -\frac{7 \cdot 10^{-3}\,\text{mm}}{30\,\text{mm}} = -2{,}333 \cdot 10^{-4}\,\text{rad}.$$ (2 Pkte)

Umrechnung in Winkelminuten:

$$\varphi'_{\max} \approx \hat{\varphi}_{\max} \cdot 3{,}4 \cdot 10^3 = -2{,}333 \cdot 10^{-4} \cdot 3{,}4 \cdot 10^3 = -0{,}79 \approx -1' \,.$$ (2 Pkte)

Lösung 3 vgl. SB 2: Kap. 2.5 insg. 9 Punkte

a) **5 Pkte**

Der TG ist mit Einschränkungen erfüllt. (2 Pkte)
(Fehlerhafter Auswahl einer der vorgegebenen Antwortvarianten ist mit 0 Pkte zu bewerten.)

Einschränkung: (3 Pkte)

Teilflächenberührung statt Punktberührung bei der Erfassung der(s) Istmaße(s) infolge der teilzylindrischen Gestaltung des Lehrenkörpers.

(Aussage Linienberührung anstelle von Teilflächenberührung ist als Lösung akzeptierbar.)

b) **4 Pkte**

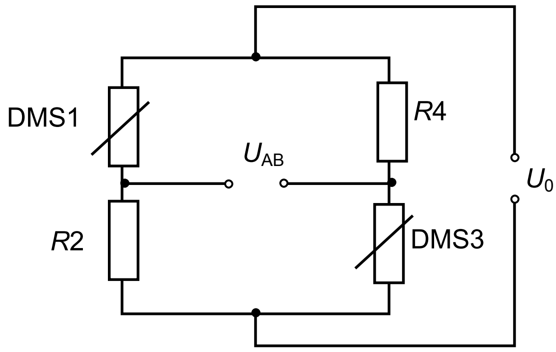
Gutseitenbedingung (Paarungslehrung):
Alle Bestimmungsgrößen der geometrischen Gestalt (Maß und Form) sind gleichzeitig und damit unter völliger Umhüllung zu prüfen. (2 Pkte)

Ausschussseitenbedingung (Maßlehrung):
Jede Bestimmungsgröße für Maß und Form ist einzeln zu prüfen und gilt jeweils als qualitätskennzeichnend für die gesamte Gestalt. (2 Pkte)

Lösung 4 vgl. SB 4: Kap. 2.4, 3.2 insg. 16 Punkte

a) Die DMS sind gemäß folgender Schaltskizze zu positionieren: **6 Pkte**

(Brückenschaltbild 2 Pkte, DMS-Positionen 2 Pkte)



Gleichwertige Schaltvarianten:

(1) Zweifach diagonaler Platztausch:

DMS3	$R2$
$R4$	DMS1

(2) Horizontale Spiegelung mit $U_{AB} \approx -U_0 \frac{1}{2}\frac{\Delta R}{R}$:

$R2$	DMS3
DMS1	$R4$

(3) Vertikale Spiegelung mit $U_{AB} \approx -U_0 \frac{1}{2}\frac{\Delta R}{R}$:

$R4$	DMS1
DMS3	$R2$

*(Varianten (2) und (3) erbringen bei Gleichspannungsbetrieb den gleichen Abweichungs**betrag** wie die skizzierte Anordnung und Variante (1).)*

b) **5 Pkte**

Bei vorher **abgeglichener Halbbrücke** folgt (mit Bezug auf SB 4, Kap.: 2.4, Gl. (2.16) und Kap.: 3.2.2, Text sowie Beispiel 3.3 bei einsetzender Beanspruchung der DMS entsprechend der Vorgabe:

Dehnung $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ bzw. DMS1, DMS3: $(R + \Delta R)$; R_2, R_4: R. (1 Pkt)

Für die Halbbrücke gilt:

$$U_{AB} \approx U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon\,. \qquad \text{(2 Pkte)}$$

Für die gegebenen Werte folgt

$$U_{AB} \approx U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon = 6\,\mathrm{V} \cdot \frac{2{,}05}{2} \cdot \frac{780 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m}}{1\,\mathrm{m}} = 4{,}797\,\mathrm{mV}\,. \qquad \text{(2 Pkte)}$$

(Es bedarf keines Nachweises der Lösungsgleichung!)

Lösungsgleichung folgt aus

1. der allgemeinen Brückengleichung

$$U_{AB} \approx U_0 \cdot \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right) = U_0 \cdot \frac{k}{4}\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4\right). \qquad \text{(a)}$$

Für den applizierten Fall zweier baugleicher gedehnter DMS, folgt DMS1, DMS3:

$$+\varepsilon_1 = +\varepsilon_3 = \varepsilon \text{ und } \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 0\,.$$

Eingesetzt in (a) folgt daraus geforderte größtmögliche Messsignal zu

$$U_{AB} \approx U_0 \cdot \frac{k}{4}\left(+\varepsilon + \varepsilon\right) = U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon\,. \qquad \text{(b)}$$

***2. der Ableitung** (für den gegebenen Belastungsfall):*

Nach dem Maschensatz gilt für die oberer Masche der Brücke $U_{AB} = U_1 - U_4$, gemäß Spannungsteilerregel

$$\frac{U_1}{U_0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}; \quad \frac{U_4}{U_0} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

und folglich

$$U_{AB} = U_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right). \qquad \text{(c)}$$

Infolge Baugleichheit der DMS gilt $R_i = R$ und $\Delta R_i = \Delta R$ mit $i = 1,2,...,4$.

Für den Lastfall folgt DMS1, DMS3: $R + \Delta R$, für $R2$, $R4$: R. Eingesetzt in Gl. (c) ergibt

$$U_{AB} = U_0 \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R} - \frac{R}{R + \Delta R + R} \right)$$

$$= U_0 \left(\frac{\Delta R}{2R + \Delta R} \right) \approx U_0 \cdot \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} = U_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot k \cdot \varepsilon \qquad \text{(d)}$$

c) **5 Pkte**

(1) Nach Gl. (3.8)

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \qquad \text{(1 Pkt)}$$

folgt

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon = 120\,\Omega \cdot 2{,}05 \cdot 780 \frac{10^{-6}\,\text{m}}{\text{m}} = 19{,}19 \cdot 10^{-2}\ \Omega \approx 0{,}2\,\Omega.. \qquad \text{(2 Pkte)}$$

(2) Die prozentuale Widerstandsänderung lautet

$$\Delta R_{\%} = \frac{\Delta R}{R} \cdot 10^2 = k \cdot \varepsilon \cdot 10^2 \qquad \text{(1 Pkt)}$$

mit den Werten

$$\Delta R_{\%} = 2{,}05 \cdot 780 \cdot \frac{10^{-6}\,\text{m}}{1\text{m}} \cdot 10^2 = 0{,}16\,\%. \qquad \text{(1 Pkt)}$$

Wahlaufgaben
Von drei sind zwei Aufgaben auszuwählen und zu lösen.
(Werden alle drei Wahlaufgaben bearbeitet, so sind die Ergebnisse der 7. Aufgabe nicht zu werten.)

Lösung 5 — vgl. SB 3: Kap. 4; SB 5: Kap. 5.2 — insg. 15 Punkte

a) **max. 9 Pkte**

(1) Komplexität der Prüfaufgabenstellung für ein Messobjekt in Bezug auf (3 Pkte)

- die Dimensionalität der Messgrößen (1-D bis 3-D-Messungen),
- die gleichzeitige Ermittlung von Maß-, Form- und Lageabweichungen;

(2) Spezifik der Messgrößen, wofür die konventionellen Abstandsmessung keine Alternative darstellt, wie z.B. (3 Pkte)

- Vermessung von Freiformflächen, Verzahnungsgeometrien,
- Funktionsprüfungen im Einbauzustand,
- Lehrensimulation,
- Fertigungssimulation;

(3) Messinformationsgewinn durch repräsentative Messpunkterfassung an geometrischen Formelementen bis hin zur kontinuierlichen Messung z. B. von Formabweichungen (Scanning-Modus); (3 Pkte)

(4) Höhere Messgenauigkeit durch
- Verminderung geometrisch bedingter Messabweichungen durch System dreier orthogonaler Messachsen und (3 Pkte)
- geräteinterne rechnergestützte Korrektur von Messabweichungen.

b) **max. 6 Pkte**

(1) Kurze Messzeiten; (2 Pkte)

(2) Geringer Rüstaufwand (insbesondere bei mehrdimensionalen Messaufgaben) – Ersatz aufwendiger Prüfvorrichtungen und Ausrichtarbeiten durch Aufnahme des Werkstückes in „einer Aufspannung“ ohne Ausrichtarbeiten (Koordinatentransformation); (2 Pkte)

(3) Hohe Flexibilität; (2 Pkte)

(4) Automatisierter Messablauf (Generierung von CNC-Messprogrammen durch informationstechnische Kopplung mit Konstruktion und Fertigung.); (2 Pkte)

(5) Allgemein bzw. z. T. relativ hohe Kosten, wobei das Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei komplexen Messaufgaben sich eher günstig gestaltet; (2 Pkte)

(6) Verwertung der Messinformationen in Qualitätsregelkreisen und damit zur Prozessqualifikation. (2 Pkte)

Lösung 6 vgl. SB 1: Kap. 4.2.1; SB 4: Kap. 3.2.1.2 insg. 15 Punkte

a) Für die Empfindlichkeit des Sensors folgt nach SB 1, Gl. (4.5) **9 Pkte**

$$E = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}s}.$$ (1 Pkt)

Die Differentation von Gl. (1) verlangt die Anwendung der Kettenregel. Zweckmäßig erfolgt deshalb die substituierte Darstellung der Funktion:

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot \left[\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2\,s\right]^{-1} \text{ mit } \left[\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2s\right] = K$$

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot K^{-1}.$$ (2 Pkte)

Damit folgt nach der Kettenregel:

$$E = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}s} = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}K}\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}s}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}K} = -\mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot K^{-2}$$ (2 Pkte)

$$\frac{\mathrm{d}K}{\mathrm{d}s} = 2$$ (1 Pkt)

Mithin wird

$$E = -2\frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{\left(\frac{l_{\mathrm{Fe}}}{\mu_{\mathrm{Fe}}} + 2s\right)^2} \text{ oder verkürzt } E = -2\frac{L}{K}.$$ (1 Pkt)

b) Schlussfolgerungen: **6 Pkte**

1. Die Empfindlichkeit ändert sich mit der Spaltgröße. Sie erreicht für $s = 0$ das Maximum, für sehr große s das Minimum. (2 Pkte)
2. Größe des linearisierten Anzeigebereiche vermindert sich mit größer werdender Empfindlichkeit. (2 Pkte)
3. Optimale Empfindlichkeit durch Arbeitspunktlage im unteren Drittel der statischen Kennlinie (Grundabstand s_0 für symmetrischen Anzeigebereich erforderlich). (2 Pkte)

Lösung 7 — vgl. SB 5: Kap. 2.3 — insg. 15 Punkte

a) (1) Berechnung der Eingangsgrößen $\overline{\overline{x}}$ und $\overline{S}_x$ nach Gl. (2.11) und (2.8) aus der Wertetabelle mittels Taschenrechner im SD-Modus (Statistische Rechnungen): **11 Pkte**

$$\overline{\overline{x}} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^{k} \overline{x}_j$$

Direkte Berechnung mit dem Taschenrechner ergibt:

$$\overline{\overline{x}} = 2{,}7966 \text{ mm} .$$ (2 Pkte)

$$\overline{S}_x = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} S_{xj}^2}$$

Zwischenrechnung mittels Taschenrechner:

$$\sum_{1}^{8} S_{xj}^{\;2} = 751{,}75 \;\; (\mu\text{m}^2)$$

und mit weiterer Berechnung

$$\overline{S}_x = \sqrt{\frac{1}{8} \cdot 751{,}75} \;\mu\text{m} = 9{,}69 \;\mu\text{m}.$$ (3 Pkte)

Nach Gl. (2.7) folgt für den Prozessfähigkeitsindex c_p:

$$c_\text{p} = \frac{T}{6 \cdot \overline{S}_x}$$ (1 Pkt)

$$c_\text{p} = \frac{60 \;\mu\text{m}}{6 \cdot 9{,}69 \;\mu\text{m}} = 1{,}032$$ (1 Pkt)

(2) Nach Gl. (2.9) folgt für den kritischen Prozessfähigkeitsindex c_pk:

$$c_\text{pk} = \frac{\Delta_\text{krit}}{3 \cdot \overline{S}_x}$$ (1 Pkt)

mit $\Delta_\text{krit} = \min\left(G_\text{o} - \overline{\overline{x}};\; \overline{\overline{x}} - G_\text{u}\right) \Rightarrow$

$$\left(2{,}8300 - 2{,}7966 = 0{,}0334;\; 2{,}7700 - 2{,}7966 = 0{,}0266\right)$$

$$\Delta_\text{krit} = 0{,}0266 \text{ mm}.$$ (2 Pkte)

$$c_\text{pk} = \frac{26{,}8 \;\mu\text{m}}{3 \cdot 9{,}69 \;\mu\text{m}} = 0{,}922.$$ (1 Pkt)

b) **4 Pkte**

- Der Prozess ist mit $c_p = 1{,}032$ **potenziell gerade noch fähig**, da etwas mehr als 99,73 % der Erzeugnisse den Anforderungen genügen. (1 Pkt)
- Für die potenzielle Prozessfähigkeit bestehen fast keine Reserven. Das bedeutet, dass sich der Prozess bereits nach diesem Index in einer kritischen Phase befindet. (1 Pkt)
- Gemäß dem Index c_{pk} ist aber der Prozess eindeutig nicht fähig. Der Prozess verläuft außerdem nicht zentriert, d. h., er weicht systematisch und einseitig von geforderten Abläufen ab. (1 Pkt)
- Der Prozess muss fähig und sicher gemacht werden durch unverzügliche Untersuchung der Prozessschritte, Aufdeckung systematischer Fehler und deren Korrektur. (1 Pkt)

Es wird empfohlen, den Bewertungsrahmen für die verbale Beantwortung dieser Teilaufgabe angemessen weit zu stecken.