

Prof. Dr. – Ing. F. Worlitz
Bearbeiter: Dr.-Ing. St. Gärtner

Mai 2016

1 Versuchsziel

Experimentelle Bestimmung von Eigenschaften und Kenngrößen induktiver Sensoren.

2 Grundlagen

2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Kernstück eines induktiven Sensors ist eine Anordnung aus Spule und Ferritkern (Bild 1). Bei Anlegen einer Wechselspannung wird die Spule mit einem Wechselstrom durchflossen. Das resultierende Magnetfeld wird durch den Ferritschalenkern geführt und so gerichtet, dass es definiert an einer Seite (aktive Fläche) austritt. Elektrisch leitfähige oder magnetische Materialien im Bereich der Feldlinien beeinflussen das Magnetfeld. Es wird je nach Betriebsfrequenz, Materialart und -abstand mehr oder weniger stark deformiert (Bild 2). Die Beeinflussung führt zu einer Impedanzänderung an der Spule, was durch die Sensorelektronik ausgewertet wird.

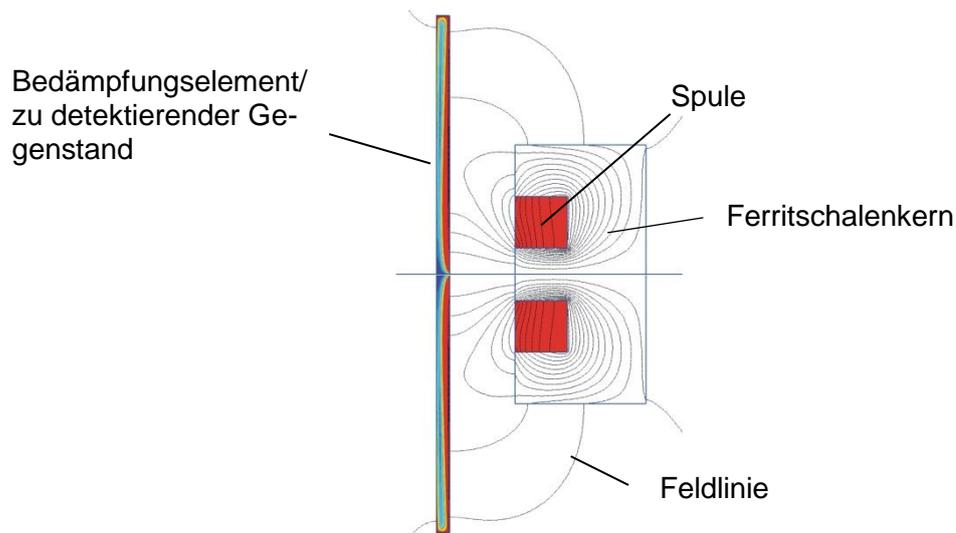


Bild 1: Prinzipskizze eines induktiven Sensors (FEM-Simulation)

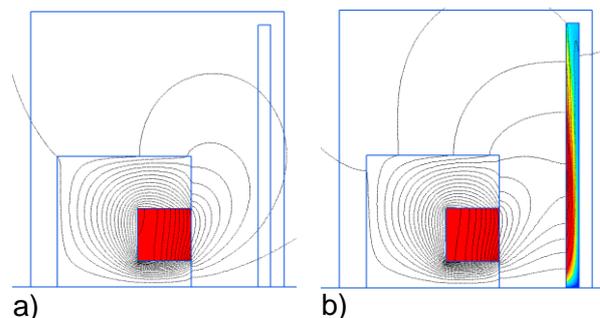
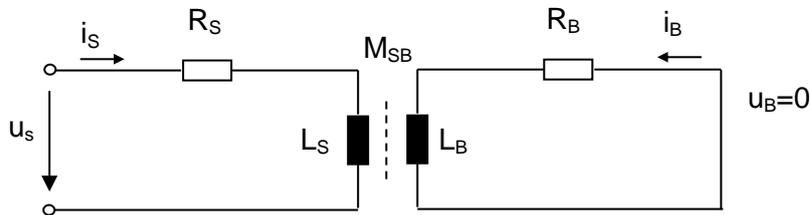


Bild 2: Induktiver Sensor (FEM-Simulation)

- a) ohne Bedämpfungselement
- b) mit Bedämpfungselement

Ein magnetisches Wechselfeld induziert im leitfähigen Material Wirbelströme. Technisch kann daher diese Anordnung aus Sensorspule (Primärkreis) und leitfähigen Material (Sekundärkreis) als Transformator mit kurzgeschlossenem Sekundärkreis aufgefasst werden.

Transformator Ersatzschaltbild:



Primärseite:

$$(R_S + j\omega \cdot L_S) \cdot i_S + j\omega \cdot M_{SB} \cdot i_B = u_S \quad (1)$$

Sekundärseite:

$$(R_B + j\omega \cdot L_B) \cdot i_B + j\omega \cdot M_{SB} \cdot i_S = u_B = 0 \quad (2)$$

mit:

M_{SB} - Gegeninduktivität

R_B - Widerstand Bedämpfungselement (Sekundärkreis)

R_S - Widerstand Sensor (Primärkreis)

i_B - Induzierter Wirbelstrom Bedämpfungselement (Sekundärkreis)

i_S - Strom Primärkreis

u_B - Spannung (Sekundärkreis)

u_S - Betriebsspannung

L_B - Induktivität (Sekundärkreis)

L_S - Induktivität Sensor (Primärkreis)

Z - Impedanz

Durch Einsetzen von (2) in (1) ergibt sich mit

$$Z = \frac{u_s}{i_s} = (R_S + j\omega \cdot L_S) + \frac{\omega^2 \cdot M_{SB}^2}{R_B + j\omega \cdot L_B} \quad (3)$$

nach Trennung von Realteil und Imaginärteil:

$$\operatorname{Re}\{Z\} = R_S + R_B \cdot \frac{\omega^2 \cdot M_{SB}^2}{R_B^2 + \omega^2 \cdot L_B^2} \quad (4) \quad \operatorname{Im}\{Z\} = \omega \cdot L_S - \frac{\omega^3 \cdot L_B \cdot M_{SB}^2}{R_B^2 + \omega^2 \cdot L_B^2} \quad (5)$$

2.2 Reduktionsfaktor

Die Beeinflussung der Spule durch den zu detektierenden Gegenstandes ist abhängig u.a. von dessen Material, insbesondere von der Leitfähigkeit und der Permeabilität.

Die größte Änderung ergibt sich bei Baustahl St37. Man normiert deshalb die Schaltabstände \bar{s} (Einschaltspunkt \rightarrow Annäherung Sensor-Bedämpfungselement) der verschiedenen Materialien auf den Schaltabstand für St37 (Nennschaltabstand) s_n . Der Reduktionsfaktor ergibt sich dann zu:

$$R = \frac{\bar{s}}{s_n} \quad (6)$$

Der Reduktionsfaktor beschreibt damit, auf welchen Wert der Schaltabstand bei unterschiedlichem Material absinkt.

3 Versuchsvorbereitung

Machen Sie sich mit dem Aufbau und der Wirkungsweise eines induktiven Sensors vertraut.

Welche Eigenschaften kennzeichnen induktive Sensoren?

Was versteht man unter Dia-, Para-, und Ferromagnetismus?

Was verstehen Sie unter folgenden Begriffen:

- Schaltabstand und Hysterese
- Reduktionsfaktor
- Axiale und tangentielle Ansprechkurve
- Maximale Schaltfrequenz

Verschaffen Sie sich einen Überblick zu den Ausführungsformen induktiver Sensoren.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Versuchsaufbau

Eine Übersicht zum Versuchsaufbau gibt Bild 3.

Geräteliste:

- Rasterplatte
- Höhenausgleich
- Führungsschlitten mit Probenhalter
- Wegmesseinrichtung (Ultraschall-Wegmesseinrichtung oder Messschieber)
- Anzeigeeinheit akustisch
- Materialprobenkoffer
- Induktiver Sensor NJ
- Motoreinheit mit Regler
- Zähler-/Frequenzbaustein
- Verteilerbaustein
- Netzteil 24 V
- (PC für Anzeige der Ultraschall-Wegmessung)

Der zu verwendende Sensortyp trägt die Bezeichnung: NJ – 1827 003 261 bzw. 645. Versuchsaufbau, Justierung und Herstellung der elektrischen Anschlüsse erfolgen entsprechend Bild 3 bzw. Bild 4 und dem ausliegenden Plan.

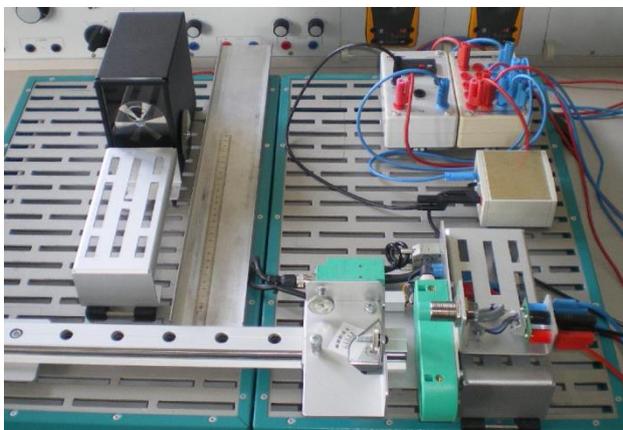


Bild 3: Versuchsaufbau (Steck-Modul)

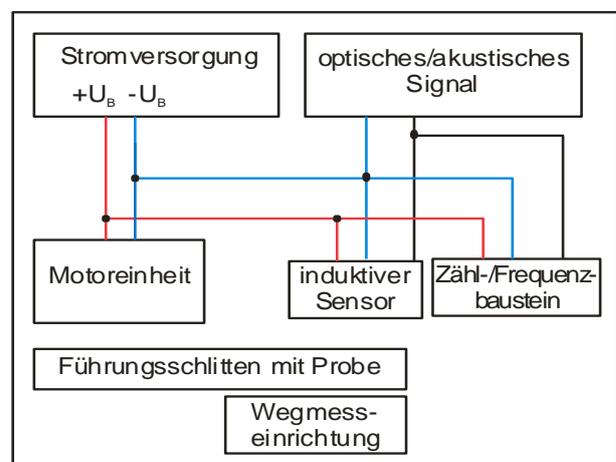


Bild 4: Schaltplan

4.2 Materialerkennung

Bestimmen Sie für verschiedene Materialproben die in der Tabelle 1 genannten Eigenschaften durch Sichtprüfung, Messungen und Tabellenbücher.

Stellen Sie fest, welche dieser Materialien mittels induktiver Sensoren erkannt werden. Führen Sie dazu nacheinander die verschiedenen Materialproben an den Sensor heran und kontrollieren Sie den Zustand der LED-Anzeige des Sensors bzw. der akustischen Anzeigeeinheit

Stellen Sie die Ergebnisse zusammen (Tabelle 1) und klassifizieren Sie nach folgenden Kriterien:

- Dicke der Materialprobe
- Oberflächengüte (glatt, rau)
- Elektrische Leitfähigkeit und Permeabilität

Material	Dicke	Oberfläche	elektr. Leitfähigkeit	Permeabilität μ_r Ferromagn. (F) Diamagn. (D) Paramagn. (P)	Probe erkannt? Ja/Nein
Stahl (St37)					
Kunststoff weiß (4/6mm)					
Kunststoff schwarz					
Kunststoff klar					
Kupfer					
Messing					
Aluminium					
Aluminium hellgrau					
Pappe					
Blatt Papier					
Schaumstoff					
V2A					
Magnet					

Tabelle 1: Materialerkennung

4.3 Bestimmung des Schaltabstandes und der Schalthysterese

Definitionen:

Schaltabstand s

Abstand bei dem bei Annäherung der Messplatte an die aktive Fläche entlang der Bezugsachse ein Signalwechsel am Ausgang des Sensors verursacht wird.

Schalthysterese H

Der Schaltabstand ist bewegungsrichtungsabhängig.
Schalthysterese = Ausschaltpunkt – Einschaltpunkt

$$H = \Delta s = s^+ - s^- \quad (7)$$

Relative Schalthysterese H_{rel}

$$H_{rel} = \frac{H}{s_n} \cdot 100\% \quad (8)$$

Bestimmen Sie Schaltabstand und Schalthysterese für das Material St37!

Hinweis:

Beim Versuchsstand mit Ultraschall-Wegmesseinrichtung kann der Weg s direkt am PC dargestellt oder im Bereich 0 - 300 mm als Stromsignal 4 - 20 mA abgebildet und als Strom i am Digitalmultimeter abgelesen werden. Die Umrechnung in den Weg s erfolgt dann mit Gleichung (9):

$$s = (i - 4 \text{ mA}) \cdot k \quad (9)$$

mit

s :	Weg in mm
i :	gemessener Strom in mA
k :	Umrechnungsfaktor = $\frac{300 \text{ mm}}{16 \text{ mA}} = 18,75 \text{ mm/mA}$

Runden Sie die berechneten bzw. abgelesenen Werte bei allen Messungen auf eine Stelle nach dem Komma.

Aufbau:

Platzieren Sie die Geräte aus der Geräteliste entsprechend Bild 3 bzw. Bild 5 auf der Rasterplatte und stellen Sie die elektrischen Verbindungen her.

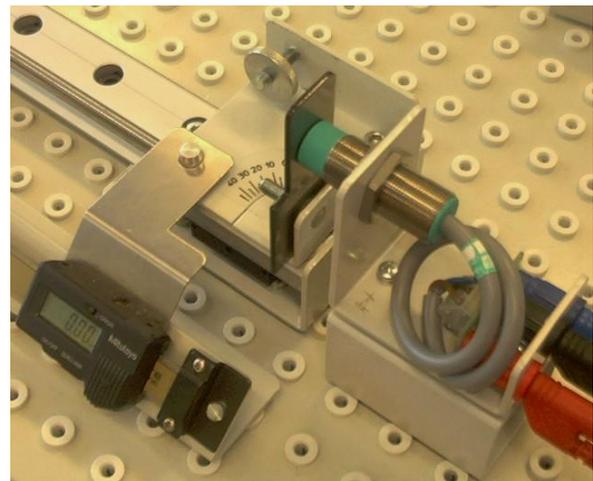
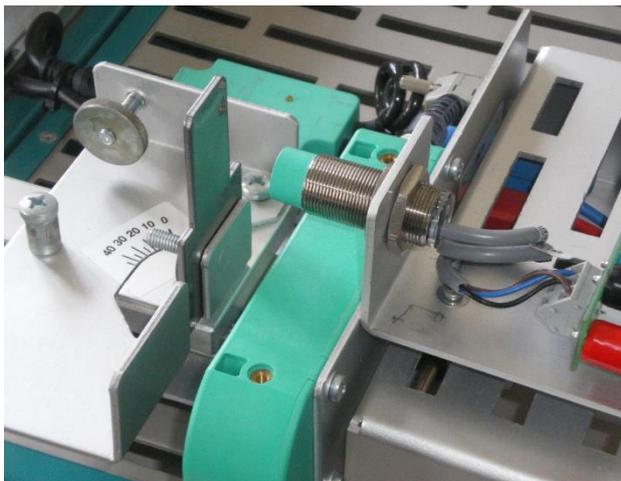


Bild 5: Versuchsaufbau Schaltabstand Snap-In und Steck-Modul (Messschieber)

Befestigen Sie die Materialprobe (Normmessfahne aus St37, Breite $b = 24 \text{ mm}$) am Probenhalter.

Hinweis:

Die Breite $b = 24 \text{ mm}$ der Normmessfahne aus St37 ist mit 3x dem Nennschaltabstand oder 1x dem Spulendurchmesser (es gilt der größere Wert) für den induktiven Sensor vorgeschrieben.

Schieben Sie den Führungsschlitten in Richtung des Sensors, bis die Probe die Sensorstirnfläche berührt. Schalten Sie die Wegmesseinrichtung ein und setzen Sie die Anzeige auf Null (Referenzposition). Fahren Sie danach den Führungsschlitten ca. 20 mm vom Sensor weg.

Versuchsdurchführung:

Fahren Sie die Materialprobe langsam mit dem Führungsschlitten an den Sensor heran, bis er einschaltet. (LED leuchtet bzw. akustisches Signal ertönt).

Bestimmen Sie den Abstand (bezogen auf die Referenzposition) mit Hilfe der Wegmesseinrichtung und notieren Sie den Wert (Tabelle 2).

Führen Sie die Messung 5-mal durch und berechnen Sie den Mittelwert \overline{M} des Einschaltpunktes s^- . Dieser Wert entspricht bei einer Umgebungstemperatur von $23^\circ\text{C} \pm 5\text{ K}$ und der Nennbetriebsspannung $U_N = 22\text{ V}$ dem **Nennschaltabstand** s_n .

Fahren Sie die Materialprobe langsam mit dem Führungsschlitten vom Sensor weg, bis er ausschaltet. Führen Sie die Messung 5-mal durch und berechnen Sie den Mittelwert \overline{M} des Ausschaltpunktes s^+ .

	M1	M2	M3	M4	M5	\overline{M}
Einschaltpunkt s^- [mm]						
Ausschaltpunkt s^+ [mm]						

Tabelle 2: Schaltabstand

Berechnen Sie H und H_{rel} und stellen Sie die Hysterese in einem Diagramm dar.

4.4 Bestimmung des Reduktionsfaktors R

Aufbau:

Verwenden Sie den gleichen Aufbau wie beim vorhergehenden Versuch.

Befestigen Sie die Materialprobe (St37, **b = 40 mm**) am Probenhalter. Schieben Sie den Führungsschlitten in Richtung des Sensors, bis die Probe die Sensorstirnfläche berührt. Schalten Sie die Wegmesseinrichtung ein und setzen Sie die Anzeige auf Null (Referenzposition)

Versuchsdurchführung:

Bestimmung von $s_{\text{St37}} = s_n$

Verschieben Sie den Schlitten so weit vom Sensor weg, bis die LED am Sensor bzw. das akustische Signal erlischt und dann wieder in Richtung des Sensors, bis dieser **einschaltet**.

Bestimmen Sie diesen Abstand (Einschaltpunkt, bezogen auf die Referenzposition) mit Hilfe der Wegmesseinrichtung und notieren Sie den Wert (Tabelle 3).

Führen Sie die Messung 5-mal durch und berechnen Sie den Mittelwert \overline{M} des Schaltabstandes s_{St37} (Nennschaltabstand s_n).

s^-	M1	M2	M3	M4	M5	\overline{M}
s_{St37} [mm]						

Tabelle 3: Schaltabstand s_{St37}

Wiederholen Sie die oben beschriebene Messung für die in der Tabelle 4 angegebenen Materialien. Überprüfen bzw. korrigieren Sie nach dem Wechsel der Materialprobe die korrekte Referenzposition (Nullpunkt)!

Material	Einschaltpunkt s^- [mm]						Reduktionsfaktor	
	M1	M2	M3	M4	M5	\bar{M}	R	R [%]
Kupfer								
Aluminium								
V2A								
Messing								
St37 b=18mm								

Tabelle 4: Reduktionsfaktor

Bestimmen Sie den Reduktionsfaktor R und stellen Sie den Reduktionsfaktor für die unterschiedlichen Materialien in einem Balkendiagramm grafisch dar.

4.5 Bestimmung der Ansprechkurve $s = f(x)$

Aufbau:

Platzieren Sie die Geräte aus der Geräteliste entsprechend Bild 6 auf der Rasterplatte und stellen Sie die elektrischen Verbindungen her. Befestigen Sie die Materialprobe (St37, **b = 18 mm** oder $b = 24$ mm) **seitlich** am Probenhalter.

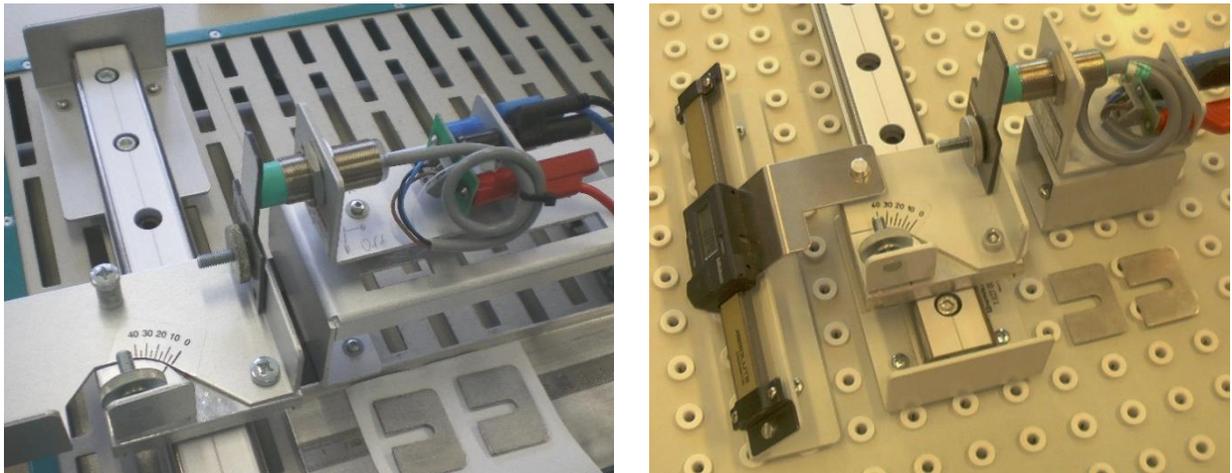


Bild 6: Versuchsaufbau Ansprechkurve Snap-In und Steck-Modul (Messschieber)

Fahren Sie die Materialprobe mit dem Führungsschlitten so an die Stirnfläche des Sensors heran, dass er vollständig überdeckt ist und die **Sensorachse sich genau in der Mitte der Materialprobe** befindet. Der Schlitten des Messschiebers (Messschiebervariante) sollte sich in der Mittenposition befinden. Justieren Sie den Sensor durch Lösen der Muttern und verschieben Sie den Sensor im Haltewinkel so, dass er die Materialprobe berührt. ($s = 0$).

Schalten Sie die Wegmessenrichtung ein und setzen Sie die Anzeige auf Null (Referenzposition).

Versuchsdurchführung:

Fahren Sie die Materialprobe nach **rechts**, bis der Sensor ausschaltet (LED bzw. akustisches Signal aus). Fahren Sie dann zurück, bis der Sensor wieder **einschaltet**. Bestimmen Sie diese seitliche Verschiebung x^- (Einschaltpunkt, bezogen auf die Referenzposition) mit Hilfe der Wegmessenrichtung und notieren Sie den Wert (Tabelle 5).

Führen Sie die Messung 5-mal durch und berechnen Sie den Mittelwert \bar{M} der seitlichen Verschiebung \bar{x} .

Da die Ansprechkurve symmetrisch zur Sensorachse ist, können Sie die Messgenauigkeit noch erhöhen, indem Sie die Messung von der anderen Seite wiederholen (**links**), ohne den Referenzpunkt zu verändern.

Fügen Sie Abstandsplatten zwischen Materialprobenhalter und Materialprobe ein, so dass der Abstand s zwischen Sensor und Materialprobe 2 mm beträgt und wiederholen Sie die vorhergehende Versuchsdurchführung. Bestimmen Sie abermals die seitlichen Verschiebungen und notieren Sie die Werte (Tabelle 5).

Wiederholen Sie die Messungen mit den Abständen: 4 mm, 6 mm, 7 mm und 8 mm.

Abstand s [mm]	Seitliche Verschiebung \bar{x} [mm]											
	M1		M2		M3		M4		M5		\bar{M}	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links
0												
2												
4												
6												
7												
8												

Tabelle 5: Ansprechkurve

Ermitteln Sie aus den Messwerten die Breite der Ansprechkurve und tragen Sie diese in das Diagramm $s = f(\bar{x})$ ein.

Bestimmen Sie die notwendige aktive Sensorfläche (als Fläche und als Flächenanteil von der Gesamtsensorfläche in %) in Abhängigkeit vom Sensorabstand und stellen Sie dies in einem Diagramm dar ($A\% = f(s)$).

Hinweis:

- Alle Maße beziehen sich auf den Oberflächenmittelpunkt der Materialprobe.
- Die Ansprechkurve ist durch links – und rechtsseitige Annäherung des Führungsschlittens an den Sensor zu bestimmen.
- Zur Bestimmung der notwendigen aktiven Sensorfläche benötigen Sie den Durchmesser des Sensors!

4.6 Bestimmung der maximalen Schaltfrequenz des Sensors

Aufbau:

Platzieren Sie den Sensor auf den Höhenausgleich vor der Motoreinheit (Bild 7) und stellen Sie die elektrischen Verbindungen her.

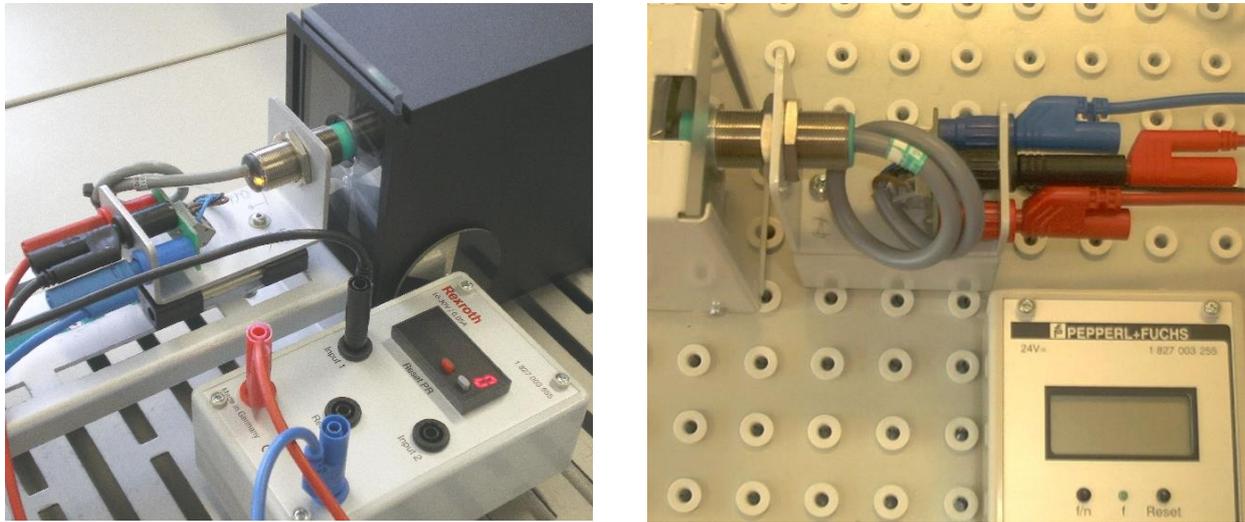


Bild 7: Versuchsaufbau Schaltfrequenz Snap-In und Steck-Modul (Messschieber)

Justieren Sie den Sensor so, dass dessen Stirnfläche ca. $a_1 = 2 \text{ mm}$ von der 6-Segmentscheibe der Motoreinheit entfernt ist.

Stellen Sie den Drehknopf der Drehzahlregelung auf linken Anschlag (minimale Drehzahl).

Versuchsdurchführung:

Schalten Sie die Motoreinheit ein. Lesen Sie die Anzahl der erfassten Impulse pro Sekunde am Zähler-/Frequenzbaustein ab. Erhöhen Sie mit dem Drehknopf der Drehzahlregelung langsam die Drehzahl der Segmentscheibe bis die Impulsanzeige instabil wird. Notieren Sie die maximale Impulszahl pro Sekunde bei der die Anzeige stabil bleibt (Tabelle 6), dies ist die maximale Schaltfrequenz des Sensors.

Führen Sie die Messung je 5-mal mit einem Abstand $a_1 = 2 \text{ mm}$ und $a_2 = 4 \text{ mm}$ durch und berechnen Sie die Mittelwerte \bar{M} der maximalen Impulszahlen.

	M1	M2	M3	M4	M5	\bar{M}
Imp/s (a_1)						
Imp/s (a_2)						

Tabelle 6: Maximale Impulszahl

Berechnen Sie die Scheibendrehzahl anhand der maximalen Schaltfrequenz des Sensors!

Stellen Sie den Drehknopf der Drehzahlregelung wieder auf linken Anschlag und schalten Sie die Motoreinheit und das Netzteil aus.

5 Versuchsauswertung

Stellen Sie die Kenngrößen grafisch dar und bewerten Sie die Ergebnisse.

Führen Sie eine Fehlereinschätzung durch.

6 Kolloquiumsschwerpunkte

1. Beschreiben Sie die Aufgaben eines Sensors in einem mechatronischen System.
2. Wodurch sind Sensoren gekennzeichnet?
Erklären Sie in diesem Zusammenhang den Begriff Initiator.
3. Machen Sie sich mit den Begriffen Induktion, Impedanz und Gegeninduktion vertraut.
4. Erklären Sie den Aufbau einer Messkette.
5. Wo werden induktive Sensoren eingesetzt?
6. Erläutern Sie Aufbau und Wirkungsweise induktiver Sensoren.
7. Welche Materialien können mit induktiven Sensoren detektiert werden? Erläutern Sie Ihre Aussage anhand des Transformatormodells.
8. Welcher Unterschied besteht zwischen induktivem Sensor und Wirbelstromsensor?
9. Was verstehen Sie unter den Begriffen: Reduktionsfaktor, Schalthysterese, relative Hysterese, Empfindlichkeit, maximale Schaltfrequenz, Schaltabstand, Nennschaltabstand, statische und dynamische Kenngrößen?

7 Literatur

- [1] Vorlesung Sensortechnik
- [2] Schnell: Sensoren in der Automatisierungstechnik
- [3] Hauptmann: Sensoren – Prinzipien und Anwendungen; Hanser-Verlag
- [4] Profos: Handbuch der industriellen Messtechnik