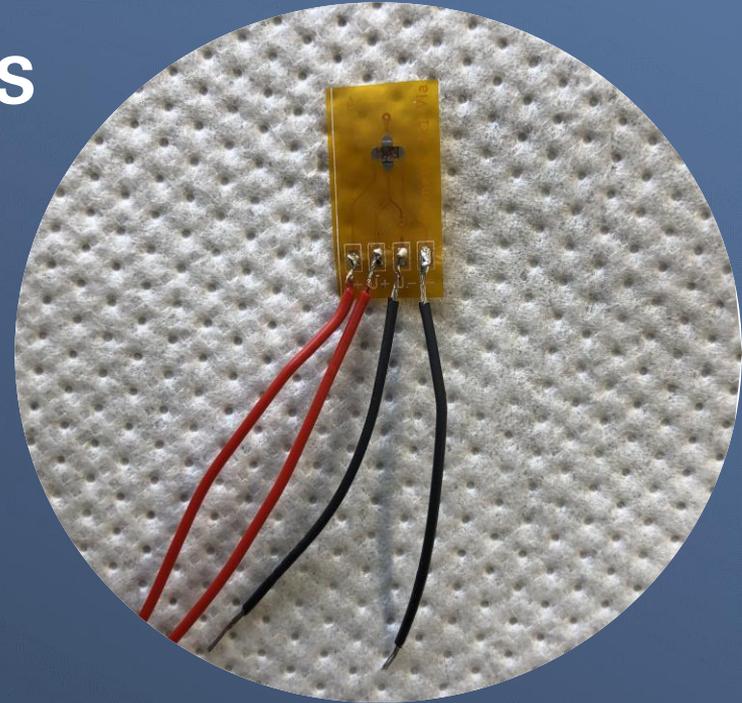


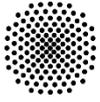
**University of Stuttgart**  
Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

# ENTWICKLUNG UND AUFBAU EINES FOLIENBASIERTEN HALL-EFFEKT-SENSORS

Development and design of a thin film  
Hall-effect-sensor

Vortragender: Alexander Gans  
Fachvortrag 17. Tagung DGFT 2024

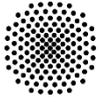




**University of Stuttgart**

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

- 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign**
- 2) Technische Grundlagen**
- 3) Konzeption und Entwicklung**
- 4) Validierung und Charakterisierung**
- 5) Zusammenfassung und Ausblick**



**University of Stuttgart**

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

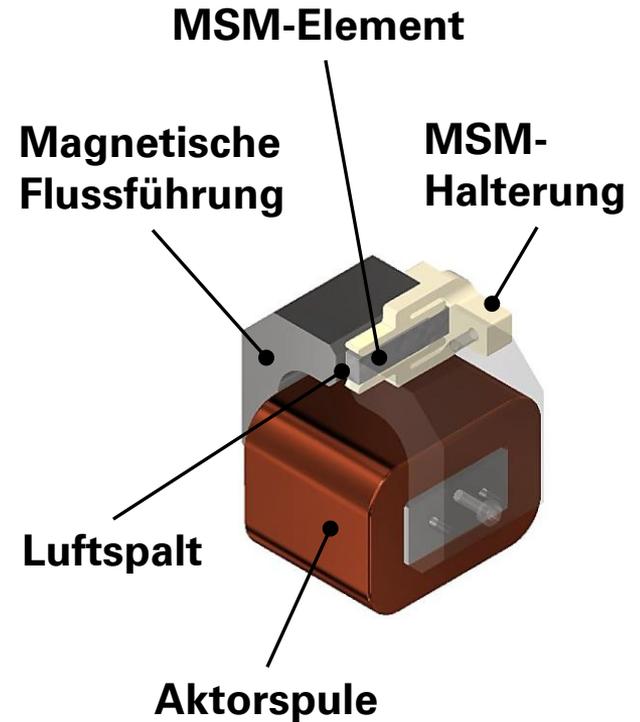
- 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign**
- 2) Technische Grundlagen**
- 3) Konzeption und Entwicklung**
- 4) Validierung und Charakterisierung**
- 5) Zusammenfassung und Ausblick**

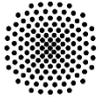
# 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign

- Sensorentwicklung basierend auf Aktoren mit magnetischen Formgedächtnislegierungen → **MSM-Element**
- Aktorprinzip: Magnetfeld induzierten Längenänderung des MSM-Elements → **Permeabilitätsänderung**
- Kleine Luftspalte unvermeidbar für effiziente magnetische Kreise →  **$s < 0,8 \text{ mm}$**
- Magnetische Flussdichte im Luftspalt zu kennen ist wichtig → **Steuerung, Überwachung und Charakterisierung**

## Ziel:

- Ziel ist es, einen dünnen, flexiblen Hall-Sensor zu entwickeln, der den magnetischen Fluss im relevanten Bereich misst





**University of Stuttgart**

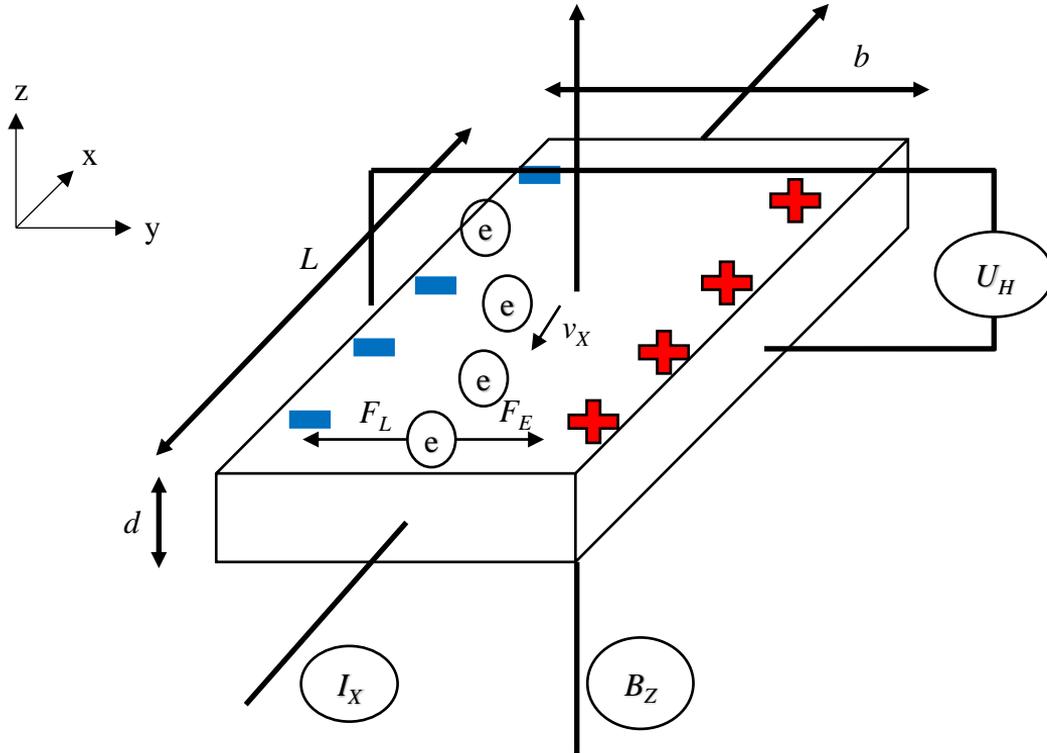
Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

- 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign**
- 2) Technische Grundlagen**
- 3) Konzeption und Entwicklung**
- 4) Validierung und Charakterisierung**
- 5) Zusammenfassung und Ausblick**



## 2) Technische Grundlagen

### Der Hall-Effekt



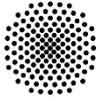
- Lorentz Kräfte:

$$F_L = -e \cdot v_X \cdot B_Z$$

- Elektrisches Gegenfeld:  $F_E$

➔ Hall-Spannung:  $U_H = A_H \frac{I_X \cdot B_Z}{d} = \frac{I_X \cdot B_Z}{n \cdot e \cdot d}$

- Hall-Koeffizient:  $A_H$

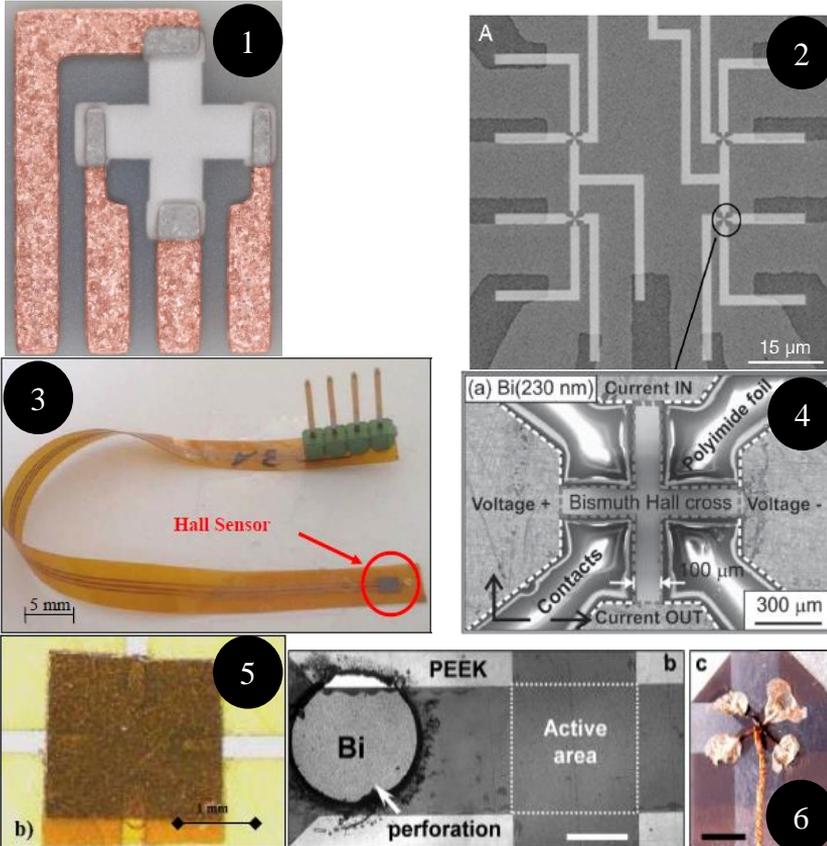


**University of Stuttgart**

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

- 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign
- 2) Technische Grundlagen
- 3) Konzeption und Entwicklung**
- 4) Validierung und Charakterisierung
- 5) Zusammenfassung und Ausblick

### 3) Konzeption und Entwicklung



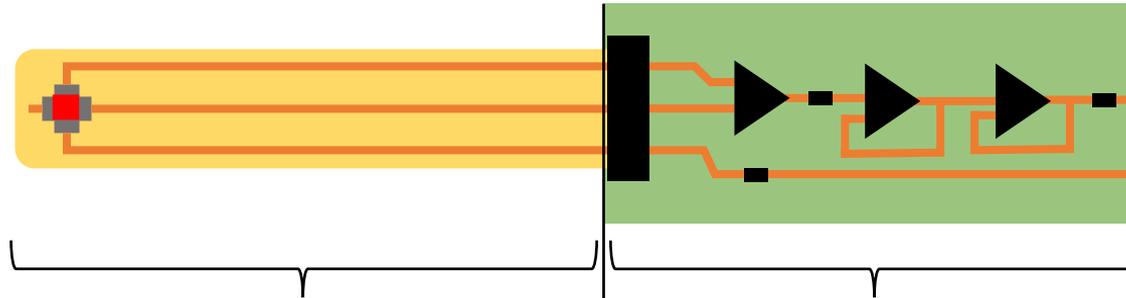
Veröffentlichung Nr.	(3.)	(5.)	(6.)
Quellennachweis	[1]	[2]	[3]
Kreuzlänge [mm]	-	-	4
Aktive Fläche [mm <sup>2</sup> ]	1	1x1	1x1
Bismut-Dicke [µm]	2	0,050	2
Sensitivität [V/(AT)]	0,1	0,230	-0,23
Bias Strom $I_X$ [mA]	10	1	50
Elektrische Widerstand [ $\Omega$ ]	$25 \pm 5$	$35 \pm 5$	15
Mag. Feld $B_Z$ [T]	1 – 2	0,4	2
Hall Spannung $U_H$ [mV]	-50 bis 50	-0,1 bis 0,1	-20 bis 20
Hall-Koeffizient $A_H$ [m <sup>3</sup> /C]	$0,8 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$

- Material: Bismut
- Einflussfaktoren: Material und Herstellung
- Zusätzlicher Einflussfaktor: Geometrie

$$U_H = \frac{G_H \cdot A_H \cdot I_X \cdot B_Z}{d} \quad (G_H: \text{Geometriefaktor})$$

[1],[2],[3],[4],[5],[6]

### 3) Konzeption und Entwicklung Folienbasierter Hall-Sensor



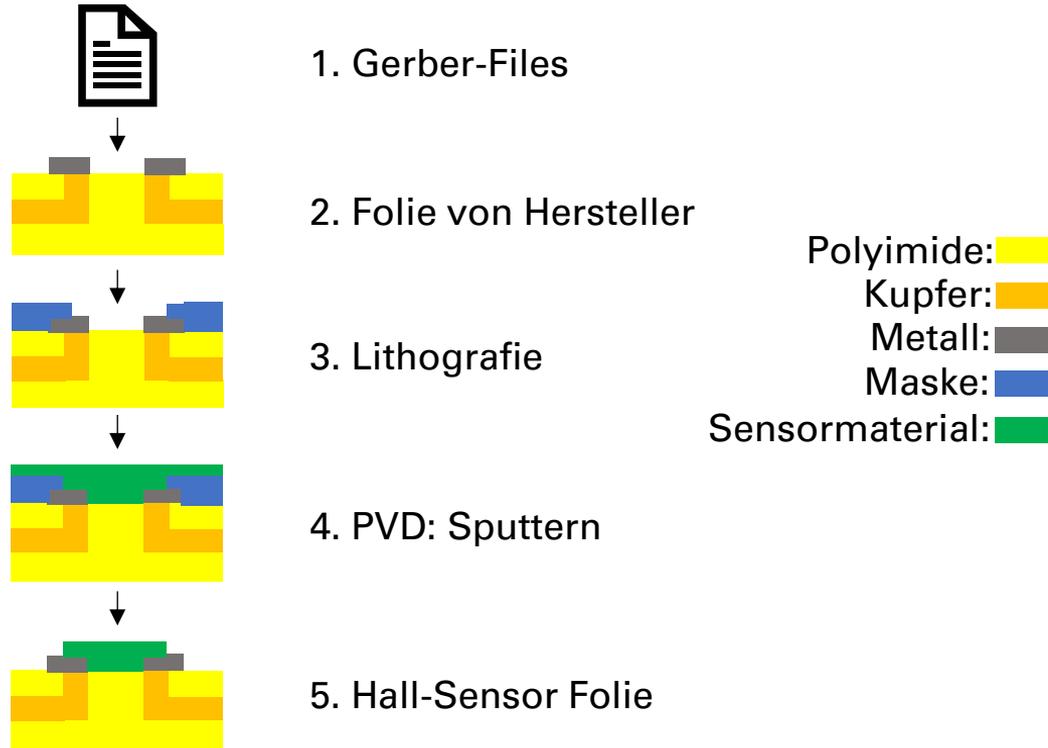
**Sensorelement (Folie)**

- Aktive Sensorelement
- Signal-/ Versorgungsleitungen
- Polyimid-Folie (Dicke 110  $\mu\text{m}$ )
- Dient zur Detektion der mag. Flussdichte

**Messelektronik (Platine)**

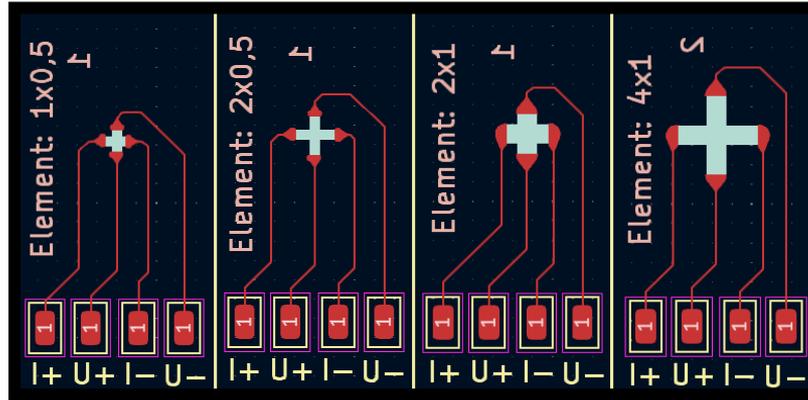
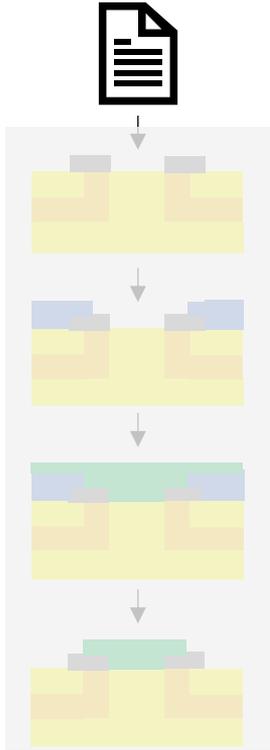
- Mess- / Verstärkerschaltung
- Verstärkung des Signals
- Filterung unerwünschter Rauschsignale
- Signalaufbereitung für übergeordnete Regelelektronik

### 3) Konzeption und Entwicklung Sensor-Folie: Aufbautechnik



### 3) Konzeption und Entwicklung

#### Sensor-Folie: Design der PI-Folie



#### Designregel 1:

Einfluss Aspektverhältnis

➔ Je größer, desto größer die Hall-Spannung

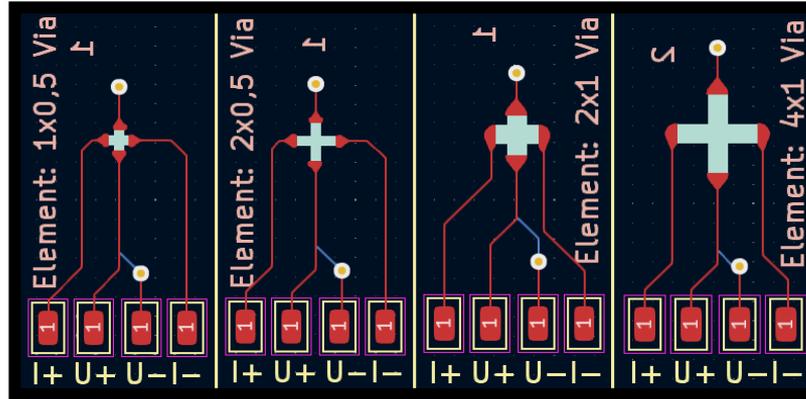
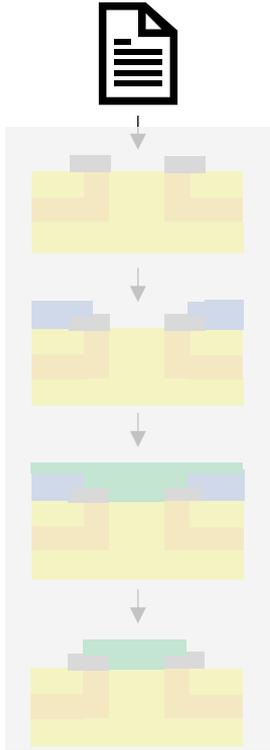
#### Designregel 2:

Einfluss der aktiven Fläche

➔ Je größer, desto größer die Hall-Spannung

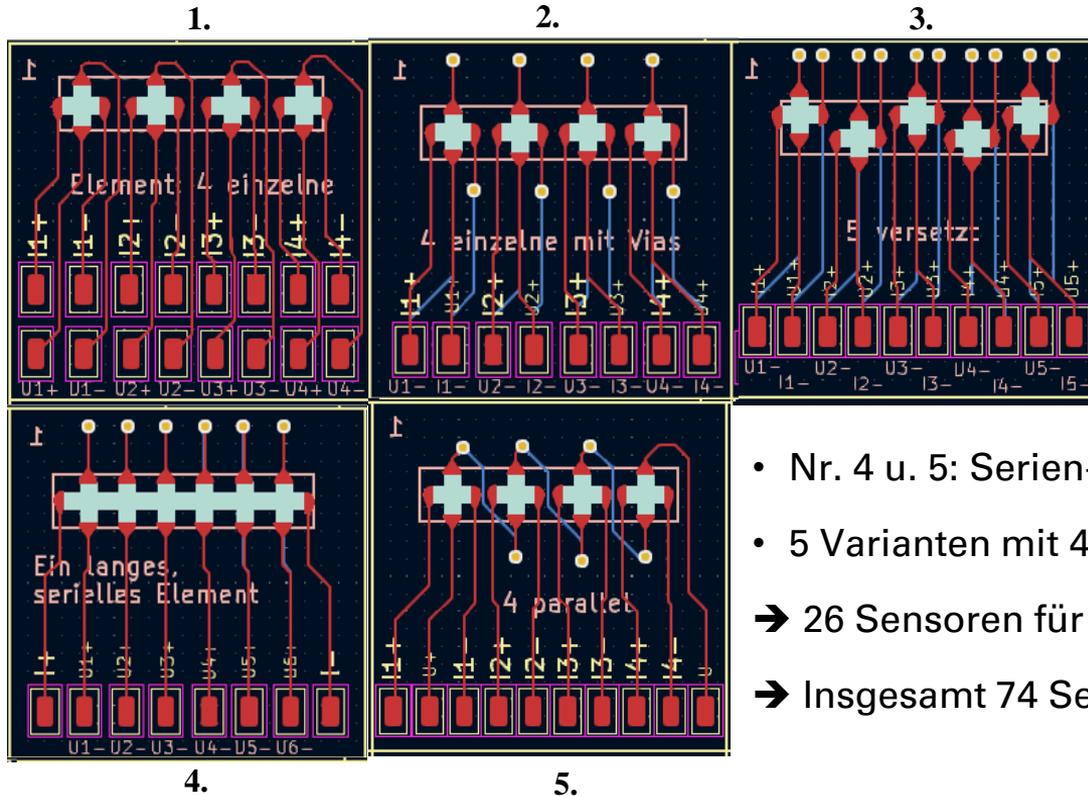
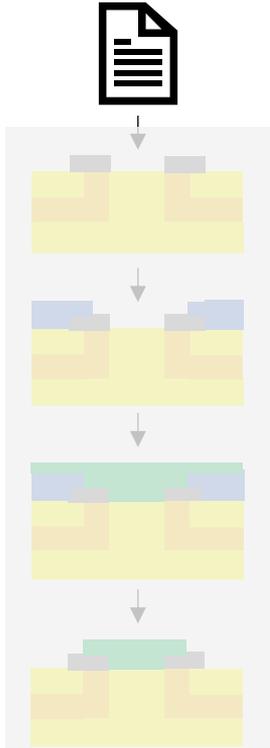
Parameter	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Länge [mm]	1	2	2	4
Breite [mm]	0,5	0,5	1	1
Aspektverhältnis $[L/b]$	2:1	4:1	2:1	4:1
Größe aktive Fläche [mm <sup>2</sup> ]	0,5 x 0,5	0,5 x 0,5	1 x 1	1 x 1

### 3) Konzeption und Entwicklung Sensor-Folie: Design der PI-Folie



- $U+$  und  $U-$  werden übereinander geführt
- ➔ Reduzierung von Interferenzen
- 8 Einzelkreuzvarianten mit jeweils 6 Stück
- ➔ 46 Einzelkreuzvarianten für die Geometrieuntersuchung

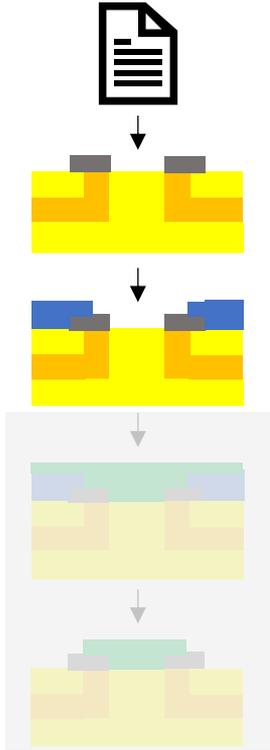
### 3) Konzeption und Entwicklung Sensor-Folie: Design der PI-Folie



- Nr. 1: Einzelkreuze
- Nr. 2: Mit Vias
- Nr. 3: Radbereiche des MSM- Sticks

- Nr. 4 u. 5: Serien-/ Parallelschaltung
- 5 Varianten mit 4x6 und 1x2 Stück
- ➔ 26 Sensoren für MSM-Stick Untersuchung
- ➔ Insgesamt 74 Sensoren auf einer PI-Folie

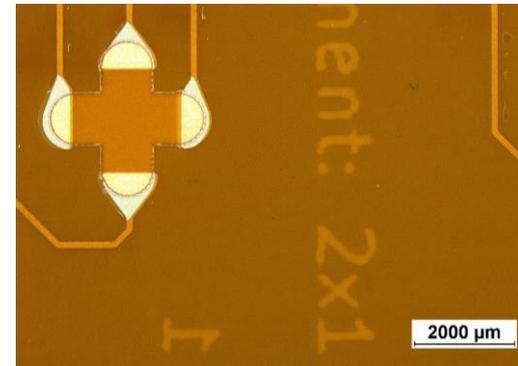
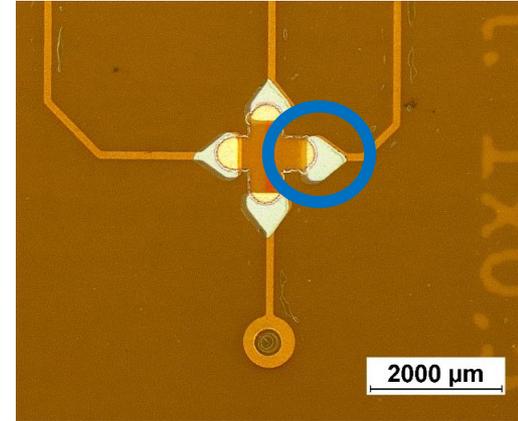
### 3) Konzeption und Entwicklung Sensor-Folie: Lithografie



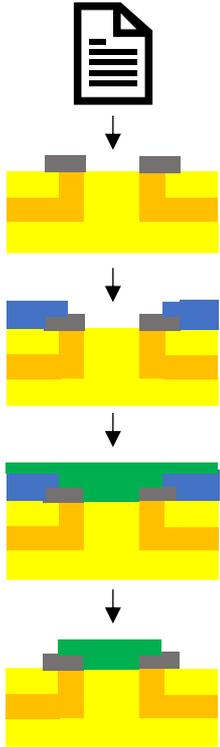
#### Nicht optimale Maskierung

- Fehlerhafte Referenzierung zwischen Computer und Direktbelichter
- Fertigungstoleranzen

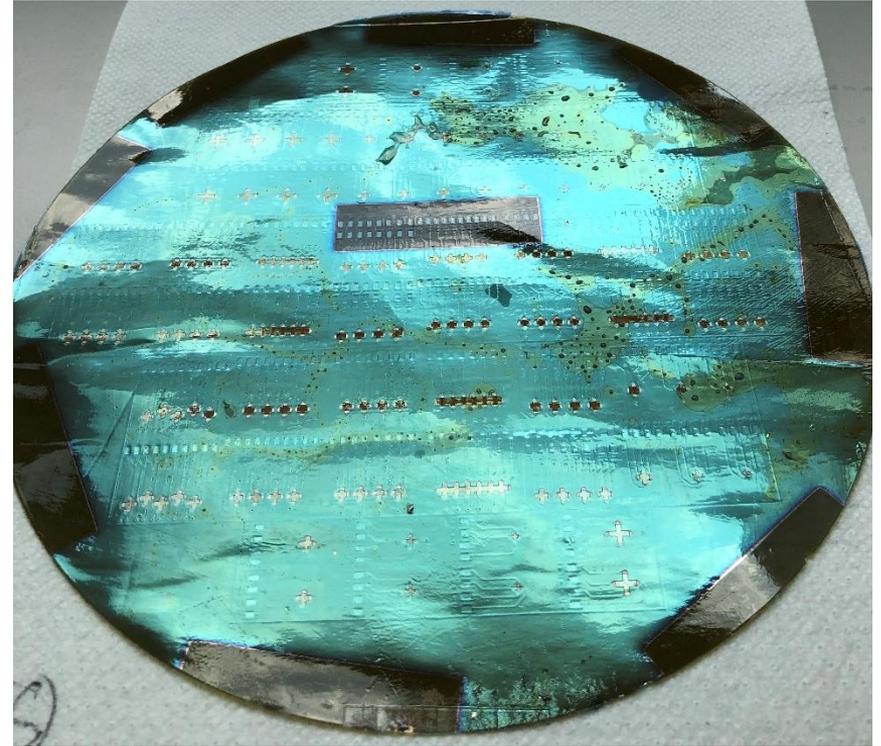
#### Optimale Maskierung



### 3) Konzeption und Entwicklung Sensor-Folie: PVD Sputtern

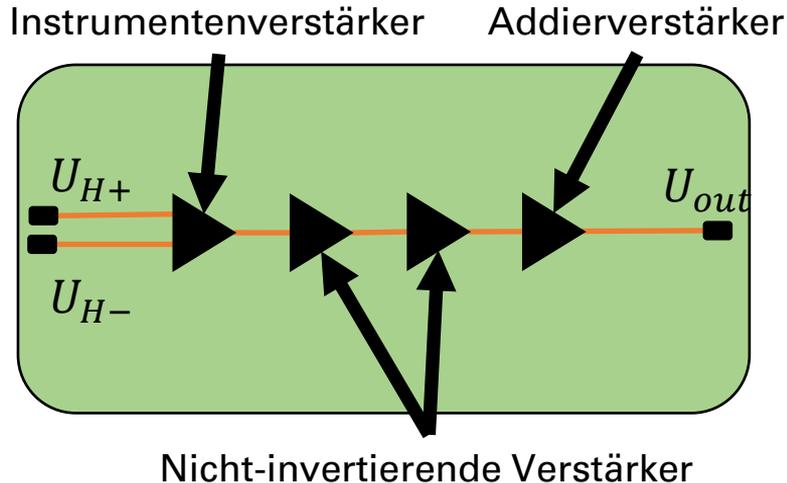


- Folie mit Indium-Zinn-Oxid (ITO) gesputtert
- 1x Folie
- Dicke: 200 nm
- An dem Partnerinstitut war die Anlagenverfügbarkeit gegeben



### 3) Konzeption und Entwicklung

#### Messelektronik: Schaltungskonzept

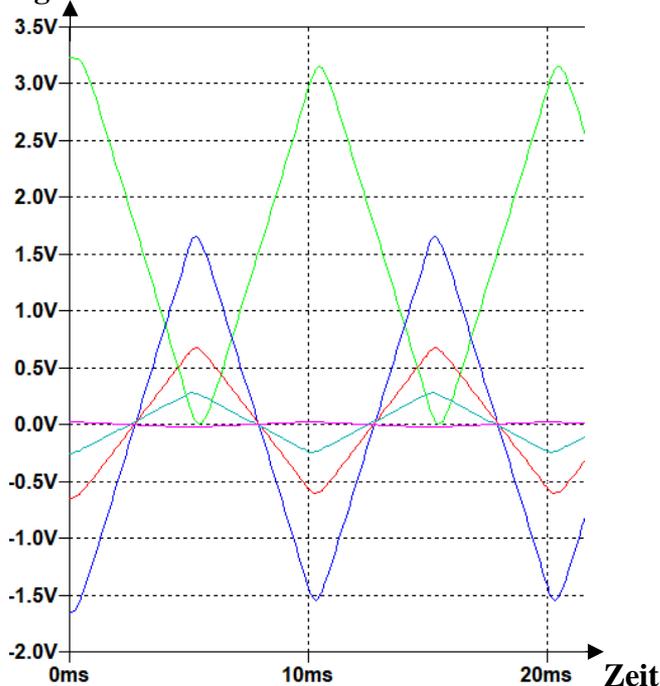


- Instrumentenverstärker: Hohe Eingangsimpedanz
- ➔ Keine Beeinflussung des Messsignals
- Kaskaden-Verstärker: Besser einstellbare Verstärkung und bessere Rauschunterdrückung
- Addierverstärker: Offset Verschiebung für ADC-Messung mit Mikrocontroller
- Gesamtverstärkung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal: 65

### 3) Konzeption und Entwicklung

## Messelektronik: Simulation in LTSpice

Spannung



$V(\text{Vin2}, \text{Vin}) = U_{H+}$  und  $U_{H-}$

$V(\text{vout1})$  = Nach dem Instrumentenverstärker

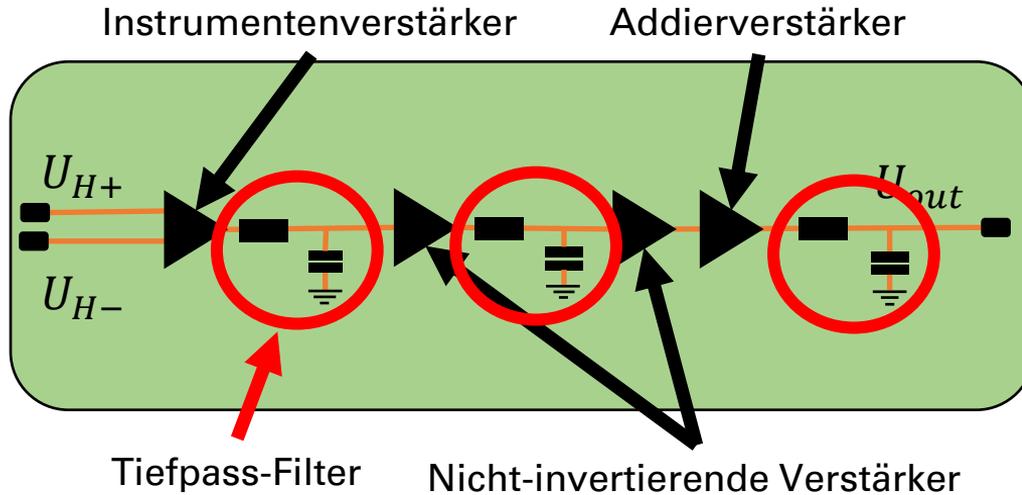
$V(\text{vout2})$  = Nach erstem nicht-invertierenden Verstärker

$V(\text{vout3})$  = Nach zweitem nicht-invertierenden Verstärker

$V(\text{vout4})$  = Nach Addierer

- Auslegung des Schaltungskonzepts anhand LTSpice
- Funktionalitätsprüfung
- Eingangssignal: 50 mVpp Dreiecksignal
- Ausgangssignal: 0 bis 3,3 V
- Gesamtverstärkung: 65
- Offset: 1,65 V

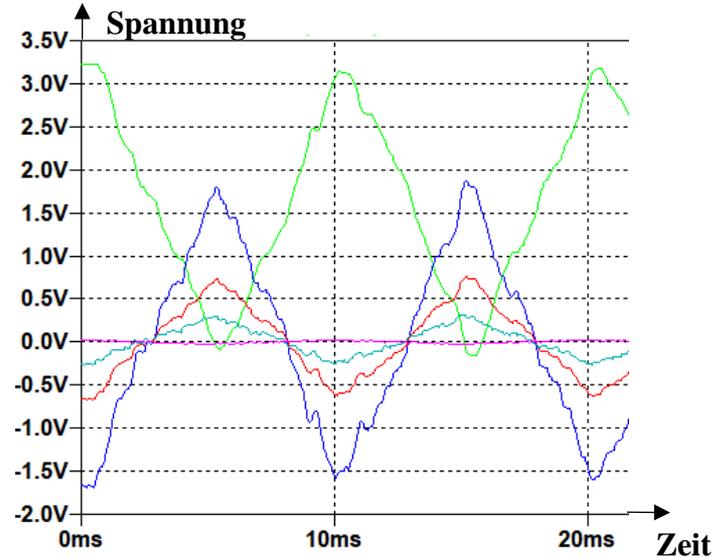
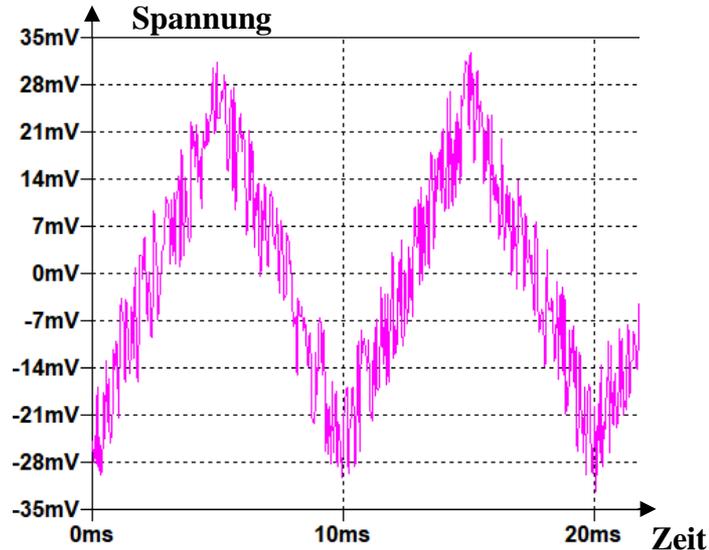
### 3) Konzeption und Entwicklung Messelektronik: Filterung



- Drei Tiefpass-Filter mit einer Grenzfrequenz von 1 kHz
- Funktion: Filterung von Störsignalen
- MSM-Stick wird mit max. 0,1 kHz betrieben

### 3) Konzeption und Entwicklung

#### Messelektronik: Simulation mit Rauschquelle



$V(\text{vin2}, \text{vin}) = U_{H+}$  und  $U_{H-}$

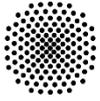
$V(\text{vout1})$  = Nach IN-Verstärker

$V(\text{vout2})$  = Nach erstem NI- Verstärker

$V(\text{vout3})$  = Nach zweitem NI- Verstärker

$V(\text{vout4})$  = Nach Addierer

- PWM- Frequenz der MSM-Aktorspule beträgt 20 kHz
  - Rauschquelle: 20 kHz auf das Eingangssignal
- ➔ Gefiltert und verstärkt

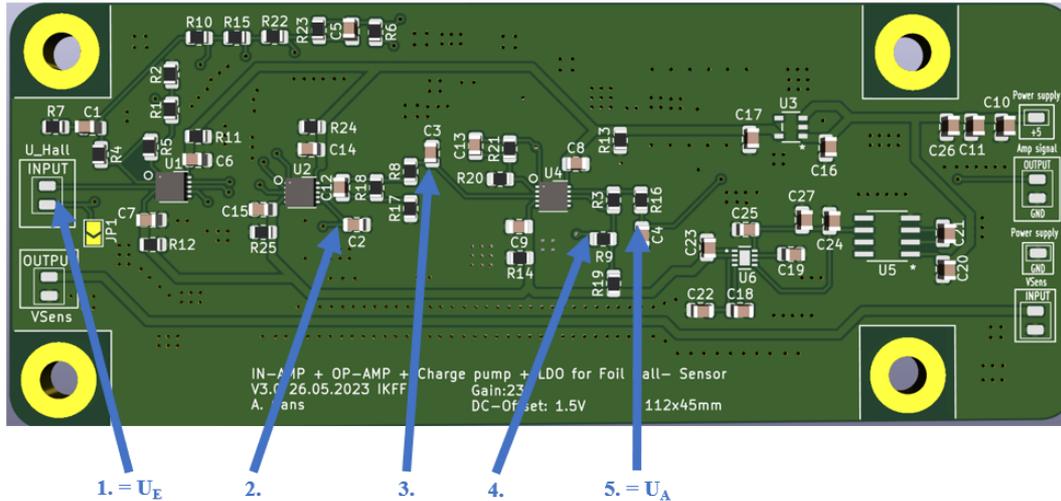


**University of Stuttgart**

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

- 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign
- 2) Technische Grundlagen
- 3) Konzeption und Entwicklung
- 4) **Validierung und Charakterisierung**
- 5) Zusammenfassung und Ausblick

## 4) Validierung und Charakterisierung Messplatine: DC-Signal

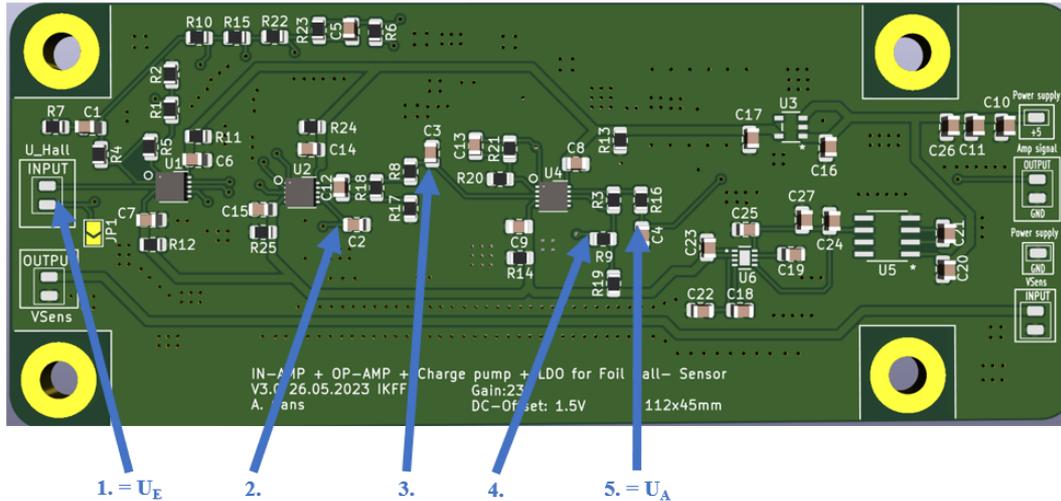


### DC-Spannung 47 mV:

- Galvanisch getrennte Versorgung mittels Batterie
  - Gesamtverstärkung: 68
- ➔ Zuverlässige Verstärkung im DC-Bereich

Messpunkt	Gemessen	Berechnet	Simuliert
1. $U_E$	46,9 mV	47,0 mV	47,0 mV
2. Nach C2 = Nach Instrumentenverstärker	520 mV	517 mV	532 mV
3. Nach C3 = Nach 1. Verstärker	1,284 V	1,292 V	1,315 V
4. Vor R9 = Nach 2. Verstärker	3,110 V	3,232 V	3,204 V
5. Nach C4 = Ausgang	-1,47 V	-1,38 V	-1,57 V

## 4) Validierung und Charakterisierung Messplatine: AC-Signal

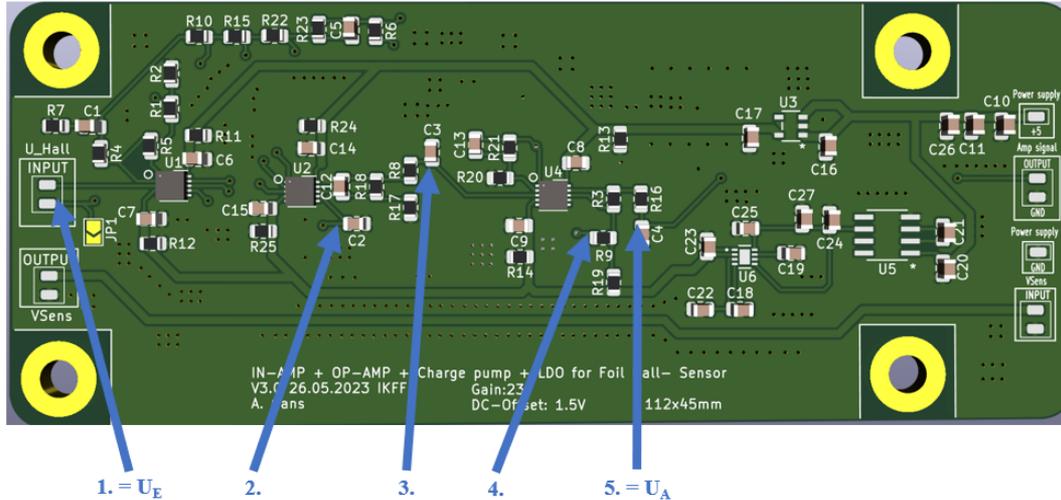


Messpunkt	Gemessen [Vpp]	Berechnet [Vpp]	Simuliert [Vpp]
1. $U_E$	0,045	0,045	0,047
2. Nach C2	0,503	0,495	0,483
3. Nach C3	1,312	1,237	1,194
4. Vor R9	3,143	3,093	2,986
5. Nach C4	3,121	3,093	2,960

### AC-Spannung 45 mVpp:

- Handheld Generator
  - Dreiecksignal
  - 10 Hz
  - Gesamtverstärkung: 68
- ➔ Zuverlässige Verstärkung im AC-Bereich

## 4) Validierung und Charakterisierung Messplatine: Unterschiedliche Frequenzen

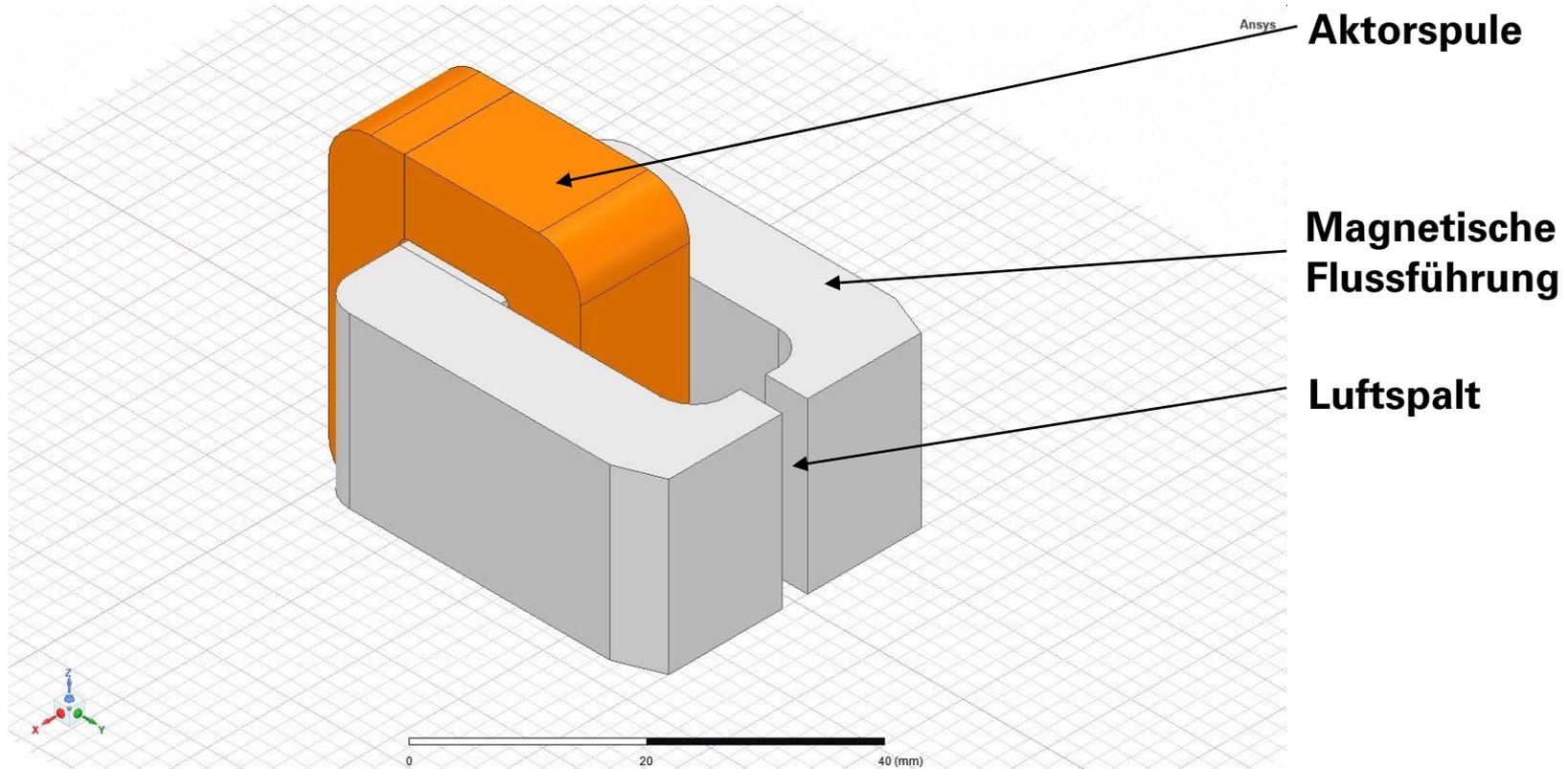


Messpunkt	Spannungen [Vpp] bei	
	10 Hz	500 Hz
1. $U_E$	0,050	0,050
2. Nach C2	0,540	0,410
3. Nach C3	1,37	0,850
4. Vor R9	3,39	2,14
5. Nach C4	3,34	1,81

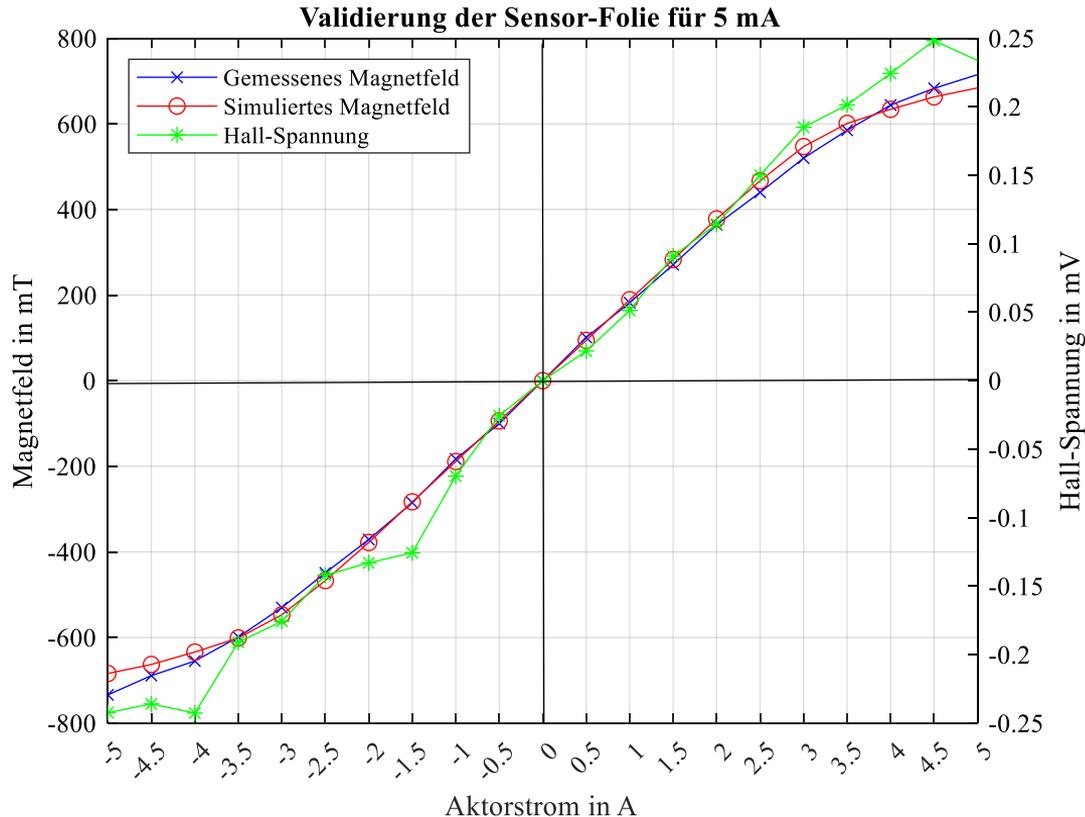
AC-Spannung 50 mVpp:

- Dreiecksignal
- Abnahme des Signals bei höherer Frequenz (Tiefpassverhalten)
- ➔ Je nach Aktorbetriebsfrequenz muss eine Kompensation erfolgen

## 4) Validierung und Charakterisierung Sensor-Folie: Referenzmagnetkreis



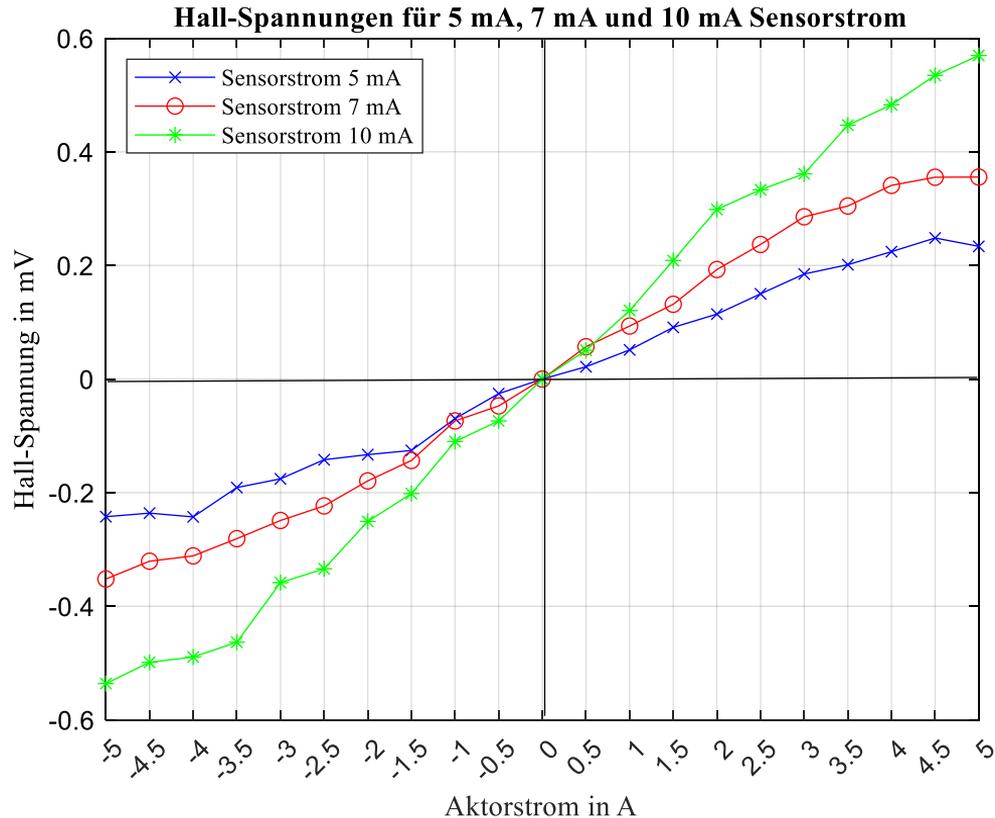
## 4) Validierung und Charakterisierung Sensor-Folie im Referenzmagnetkreis



- Simuliert:  
MSM- Aktormagnetkreis
- Fluxmeter:  
Messung im Luftspalt
- ➔ Simulation und Messung stimmen überein
- Folie: Messung im Luftspalt
- Ausreißer durch Messdurchführung
- ➔ Höhere Hall-Spannung, bei höherem Magnetfeld

$$\rightarrow U_H = A_H \frac{I_X \cdot B_Z}{d}$$

## 4) Validierung und Charakterisierung Sensor-Folie im Referenzmagnetkreis

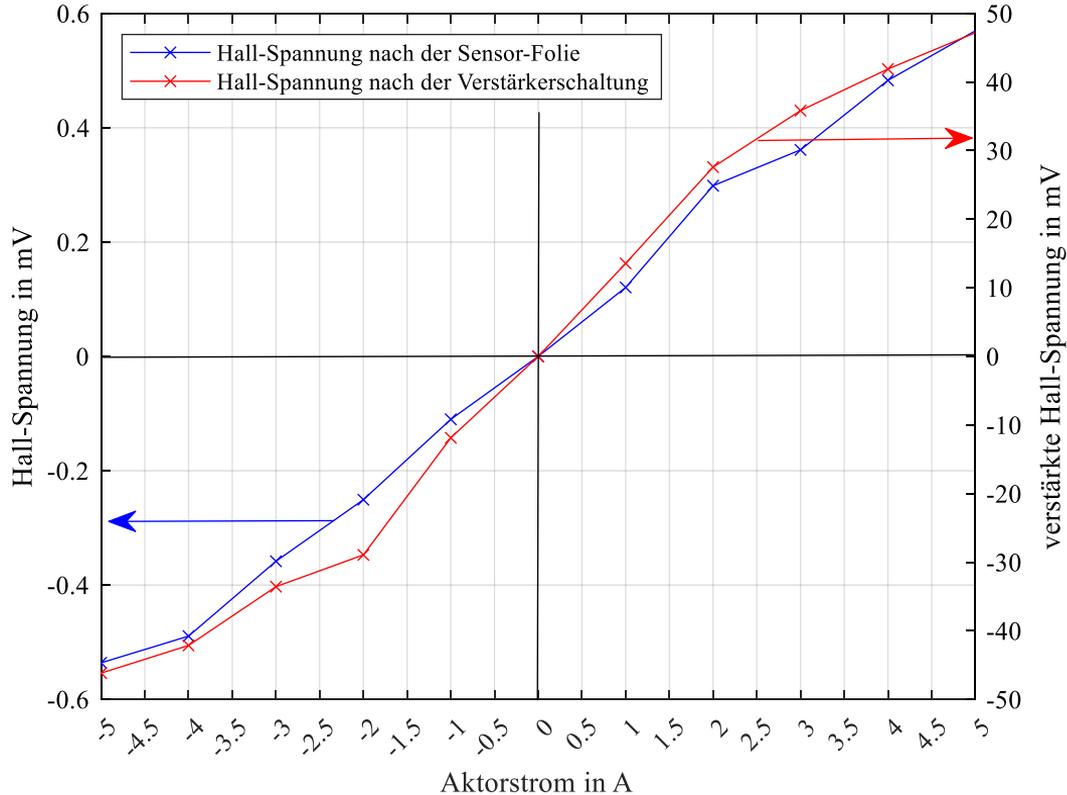


➔ Höhere Hall-Spannung bei höherem Sensorstrom

$$\rightarrow U_H = A_H \frac{I_X \cdot B_Z}{d}$$

## 4) Validierung und Charakterisierung Kompletter Hall-Sensor

Vergleich der Hall-Spannungen nach der Sensor-Folie und nach der Messelektronik



Messelektronik:

- Offset: 2,247 V
- Verstärkte Hall-Spannung: -46,16 mV bis 47,2 mV

Sensorfolie bei 10 mA:

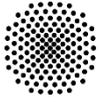
- Offset : 24,7 mV
  - Erzeugte Hall-Spannung: -0,536 mV bis 0,569 mV
- ➔ Zuverlässige Verstärkung der Hall-Spannung

## 4) Validierung und Charakterisierung

### Charakterisierung

Kriterium	ITO-Folie	[2] (5.)	[3] (6.)
Kreuzlänge [mm]	2	-	4
Aktive Fläche [mm <sup>2</sup> ]	1	1	1
ITO bzw. Bismut Dicke [μm]	0.200	0.050	2
Sensitivität [V/(AT)]	0,066 (5 mA) 0,071 (7 mA) 0,072 (10 mA)	0,230	-0,23
Bias Strom $I_X$ [mA]	5, 7, 10	1	50
Elektrische Widerstand [Ω]	200	35 ±5	15
Mag. Feld $B_z$ [T]	-0.734 bis 0.715	0.4	2
Hall Spannung $U_H$ [mV]	-0,242 bis 0,233 (5 mA) -0,352 bis 0,355 (7 mA) -0,536 bis 0,569 (10 mA)	-0,1 bis 0,1	-20 bis 20
Hall-Koeffizient $A_H$ [m <sup>3</sup> /C]	1,3·10 <sup>-8</sup> (5 mA) 1,4·10 <sup>-8</sup> (7 mA) 1,4·10 <sup>-8</sup> (10 mA)	4,4·10 <sup>-7</sup>	1,7·10 <sup>-7</sup>

- Sensitivität: Geringer
- Hall-Spannung: Geringer
- Hall-Koeffizient: Kleiner



**University of Stuttgart**

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

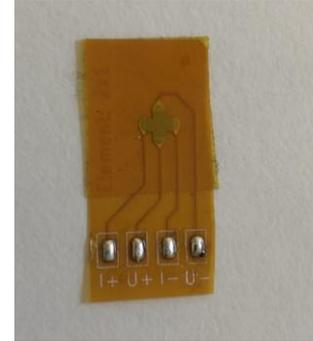
- 1) Hintergrund und Motivation für das Sensordesign**
- 2) Technische Grundlagen**
- 3) Konzeption und Entwicklung**
- 4) Validierung und Charakterisierung**
- 5) Zusammenfassung und Ausblick**

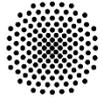


## 5) Zusammenfassung und Ausblick

### Ausblick:

- Validierung der restlichen Folienvarianten
- Anpassung der Messelektronik auf Sensorfolien
- Anbindung übergeordnete Regelelektronik (ADC)





**University of Stuttgart**

Institut für Konstruktion und Fertigung  
in der Feinwerktechnik

**Thank you!**



**Alexander Gans**

E-Mail privat: [Gans-Alexander@t-online.de](mailto:Gans-Alexander@t-online.de)

Phone: 0157 89094623

Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik

Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart



# Quellen

- [1] D. Ernstet *al.*, „Packaging technologies for (Ultra-)thin sensor applications in active magnetic bearings,“ in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE): 7 -11 May 2014, Dresden, Germany*, Dresden, Germany, M. Franz, Hg., 2014, S. 125–129, doi: 10.1109/ISSE.2014.6887577.
- [2] D. Ernstet *al.*, „Packaging of Ultrathin Flexible Magnetic Field Sensors With Polyimide Interposer and Integration in an Active Magnetic Bearing,“ *IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol.*, Jg. 10, Nr. 1, S. 39–43, 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2019.2953830.
- [3] I. J. Monchet *al.*, „Flexible Hall Sensorics for Flux-Based Control of Magnetic Levitation,“ *IEEE Trans. Magn.*, Jg. 51, Nr. 11, S. 1–4, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2015.2438232.
- [4] R. Koseva, I. Mönch, J. Schumann, K.-F. Arndt und O. G. Schmidt, „Bismuth Hall probes: Preparation, properties and application,“ *Thin Solid Films*, Jg. 518, Nr. 17, S. 4847–4851, 2010, doi: 10.1016/j.tsf.2010.02.010.
- [5] I. Āuranet *al.*, „Development of Bismuth Hall sensors for ITER steady state magnetic diagnostics,“ *Fusion Engineering and Design*, Jg. 123, S. 690–694, 2017, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.05.142.
- [6] M. Melzeret *al.*, „Wearable magnetic field sensors for flexible electronics,“ *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, Early Access. doi: 10.1002/adma.201405027.