

Zweidimensionale Charakterisierung Tunnel-Magnetoresistiver Winkelsensoren

Thorben Schütte und Karl-Ragmar Riemschneider

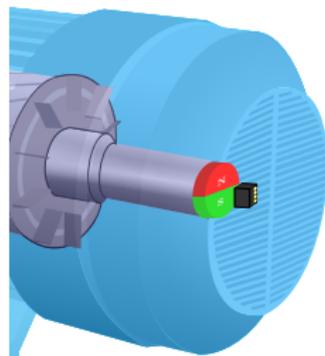
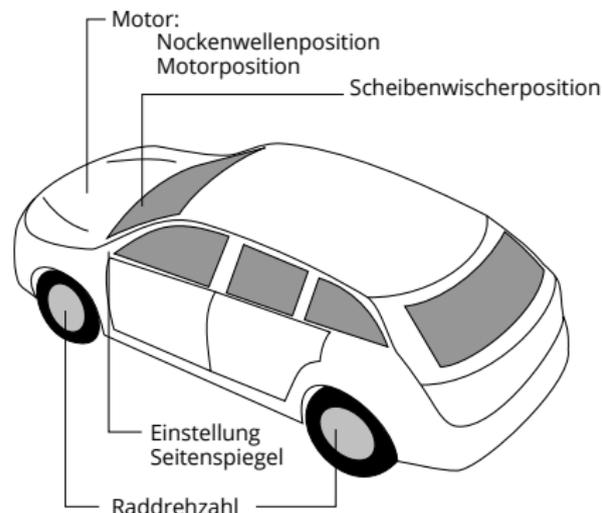
11. September 2019



- 1 Anwendungsgebiete magnetischer Sensoren
- 2 Sensorisch genutzte Effekte
- 3 Funktionsprinzip und Aufbau Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren
- 4 Sensor-Charakterisierung
- 5 Anwendung der Kennfelddaten

Anwendungsgebiete magnetischer Sensoren

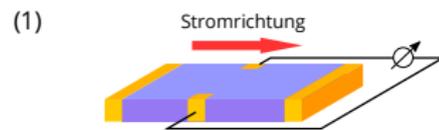
- Feld- oder Winkelsensoren
 - ▶ Feldsensoren: Feldstärke z.B. Inkrementalsensoren mit Polrad
 - ▶ Winkelsensoren: Feldrichtung z.B. Rotorlagegeber mit rotierendem Magneten
- Anwendungsgebiete
 - ▶ Automobilelektronik – ABS, Nocken- und Kurbelwelle, Drosselklappe
 - ▶ Robotik – Servomotoren, Stromsensor für Antriebe
 - ▶ Medizintechnik – Positionssensor in Augenoptik



Winkelsensor als Rotorlagegeber im Elektromotor

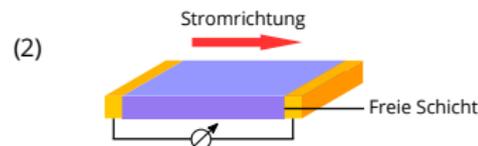
(1) Hall-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta U/U \approx 0,25\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1980



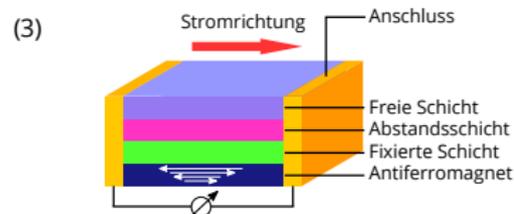
(2) AMR: Anisotroper-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Stromverdrängung führt zur Doppeldeutigkeit
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 3\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1995



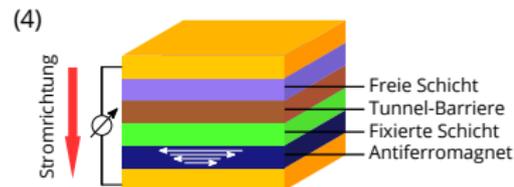
(3) GMR: Gigantischer-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 15\%$
- ▶ Automobilverwendung wenig



(4) TMR: Tunnel-Magnoresistiver-Effekt

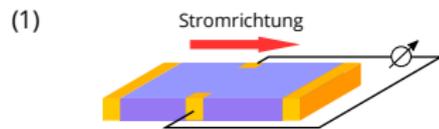
- ▶ Effekt in der Vertikalen
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 100\%$
- ▶ Keine Verstärkerschaltung
- ▶ Automobilverwendung geplant



Quellen: [2, 3]

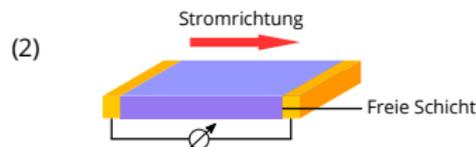
(1) Hall-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta U/U \approx 0,25\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1980



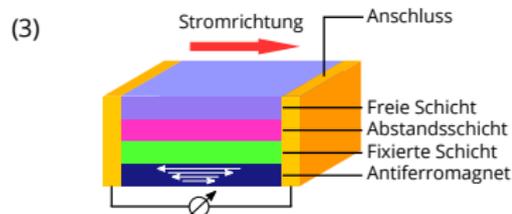
(2) AMR: Anisotroper-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Stromverdrängung führt zur Doppeldeutigkeit
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 3\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1995



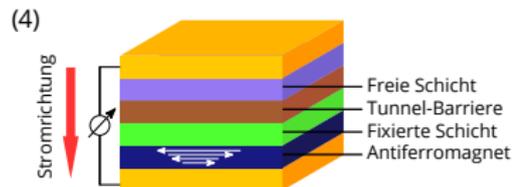
(3) GMR: Gigantischer-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 15\%$
- ▶ Automobilverwendung wenig



(4) TMR: Tunnel-Magnoresistiver-Effekt

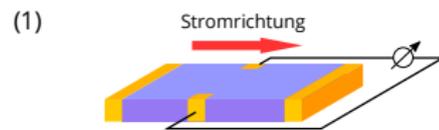
- ▶ Effekt in der Vertikalen
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 100\%$
- ▶ Keine Verstärkerschaltung
- ▶ Automobilverwendung geplant



Quellen: [2, 3]

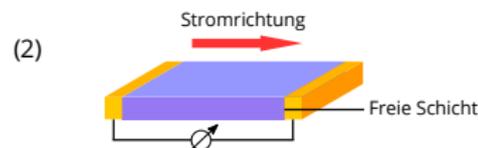
(1) Hall-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta U/U \approx 0,25\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1980



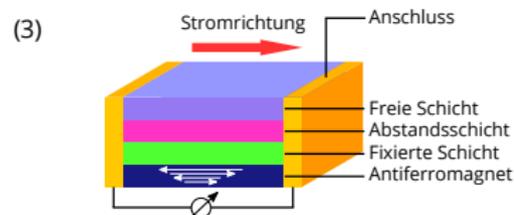
(2) AMR: Anisotroper-Magneto-resistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Stromverdrängung führt zur Doppeldeutigkeit
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 3\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1995



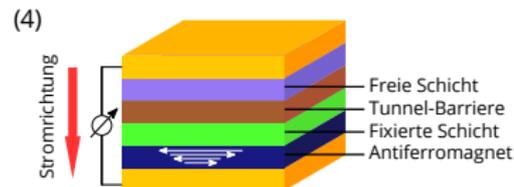
(3) GMR: Gigantischer-Magneto-resistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 15\%$
- ▶ Automobilverwendung wenig



(4) TMR: Tunnel-Magneto-resistiver-Effekt

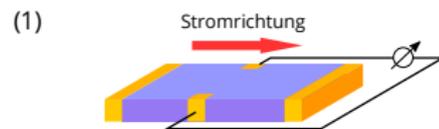
- ▶ Effekt in der Vertikalen
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 100\%$
- ▶ Keine Verstärkerschaltung
- ▶ Automobilverwendung geplant



Quellen: [2, 3]

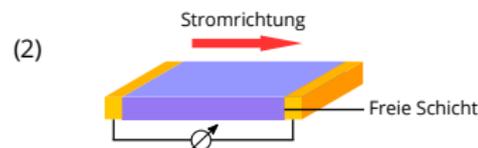
(1) Hall-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta U/U \approx 0,25\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1980



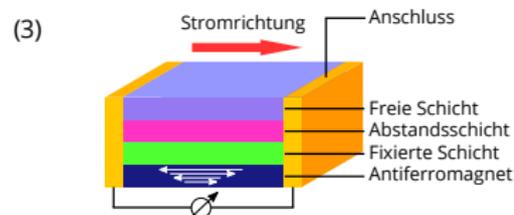
(2) AMR: Anisotroper-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene / Fläche
- ▶ Stromverdrängung führt zur Doppeldeutigkeit
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 3\%$
- ▶ Automobilverwendung ab 1995



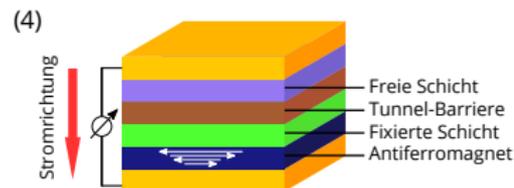
(3) GMR: Gigantischer-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Ebene
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 15\%$
- ▶ Automobilverwendung wenig



(4) TMR: Tunnel-Magnoresistiver-Effekt

- ▶ Effekt in der Vertikalen
- ▶ Empfindlichkeit $\Delta R/R \approx 100\%$
- ▶ Keine Verstärkerschaltung
- ▶ Automobilverwendung geplant



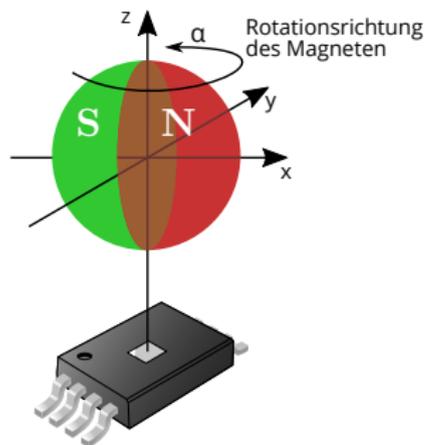
Quellen: [2, 3]

- **Winkelsensor erfasst Feldrichtung**

- ▶ Aufbau als Brückenschaltung
- ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung

- **TMR-Stack**

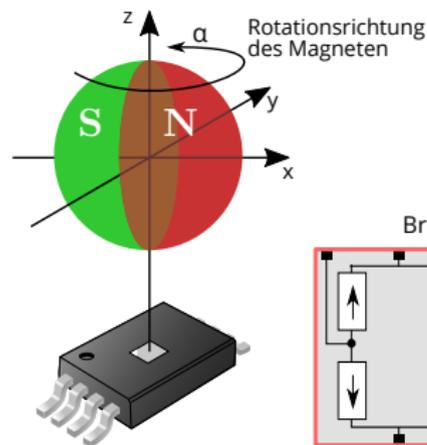
- ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
- ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
- ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
- ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



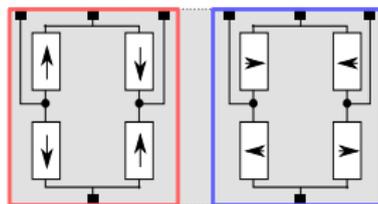
Funktionsprinzip Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren (Winkelsensor)

- Winkelsensor erfasst Feldrichtung
 - ▶ Aufbau als Brückenschaltung
 - ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung
- TMR-Stack

- ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
- ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
- ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
- ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



Brückenschaltung

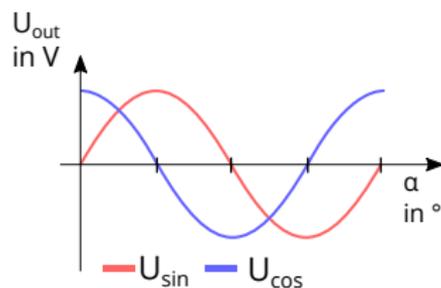
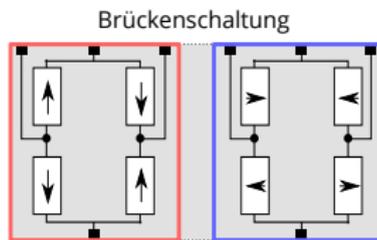
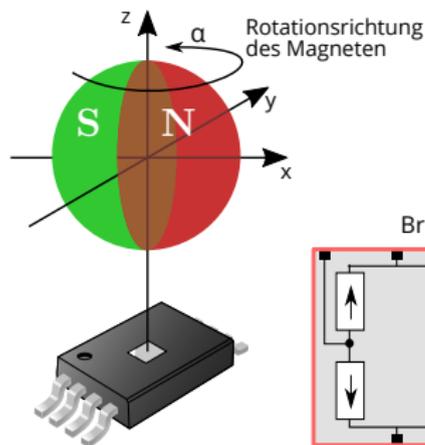


Funktionsprinzip Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren (Winkelsensor)

- Winkelsensor erfasst Feldrichtung
 - ▶ Aufbau als Brückenschaltung
 - ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung

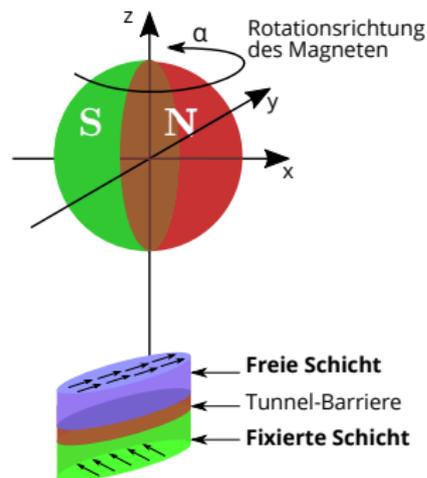
- TMR-Stack

- ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
- ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
- ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
- ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



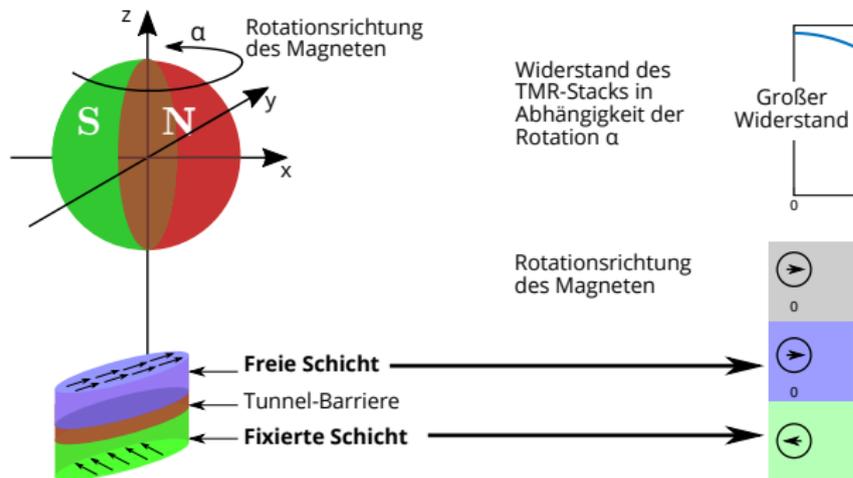
Funktionsprinzip Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren (Winkelsensor)

- Winkelsensor erfasst Feldrichtung
 - ▶ Aufbau als Brückenschaltung
 - ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung
- **TMR-Stack**
 - ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
 - ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
 - ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
 - ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



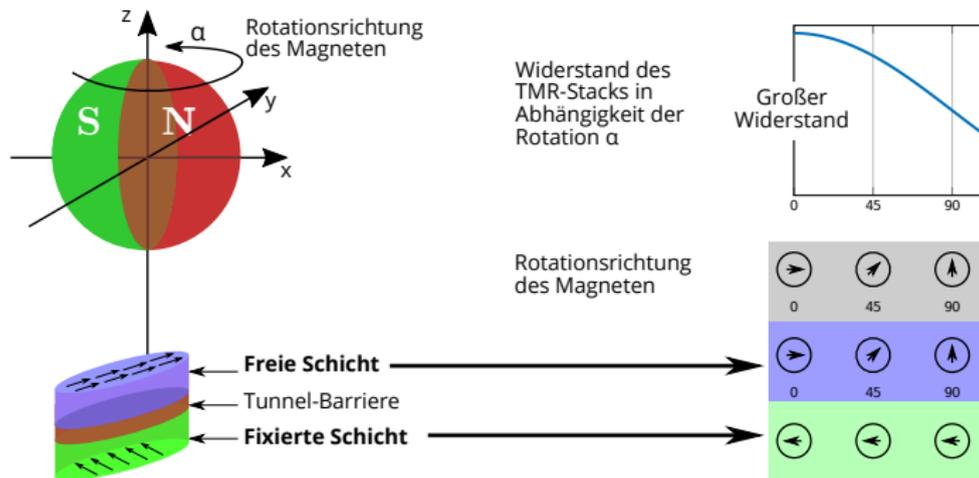
Funktionsprinzip Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren (Winkelsensor)

- Winkelsensor erfasst Feldrichtung
 - ▶ Aufbau als Brückenschaltung
 - ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung
- **TMR-Stack**
 - ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
 - ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
 - ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
 - ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



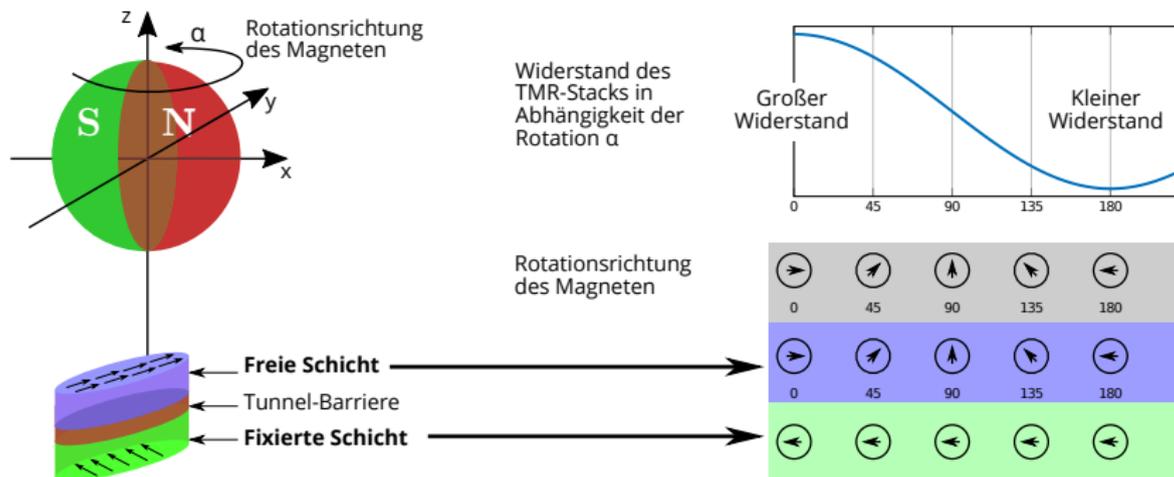
Funktionsprinzip Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren (Winkelsensor)

- Winkelsensor erfasst Feldrichtung
 - ▶ Aufbau als Brückenschaltung
 - ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung
- **TMR-Stack**
 - ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
 - ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
 - ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
 - ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



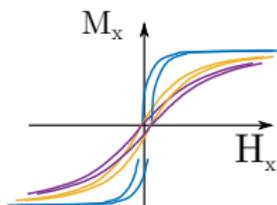
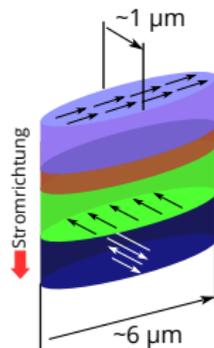
Funktionsprinzip Tunnel-Magneto-resistiver Sensoren (Winkelsensor)

- Winkelsensor erfasst Feldrichtung
 - ▶ Aufbau als Brückenschaltung
 - ▶ Cosinus- und Sinus-Ausgangsspannung
- **TMR-Stack**
 - ▶ Fixierte Schicht gibt Richtung der Sensitivität an
 - ▶ Freie Schicht ändert sich mit dem externen Magnetfeld
 - ▶ Antiparallele Ausrichtung \Rightarrow Großer Widerstand
 - ▶ Parallele Ausrichtung \Rightarrow Kleiner Widerstand



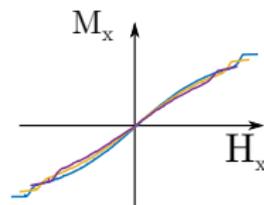
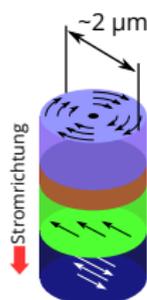
• TMR

- ▶ Freie Schicht hat durch ovalen Stack eine gleichgerichtete magnetische Ausrichtung
- ▶ Hohe Empfindlichkeit bei kleinen Feldern
- ▶ Starker Einfluss des Querfeldes



• TMR mit Wirbel (TMR-Vortex)

- ▶ Freie Schicht hat durch runden Stack einen magnetischen Wirbel
- ▶ Linearer und gesättigter Bereich
- ▶ Linearer Bereich unabhängig vom Querfeld

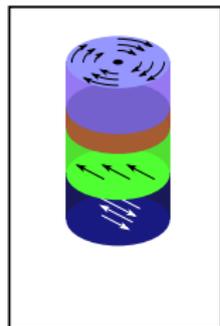


Quellen: [4–6]

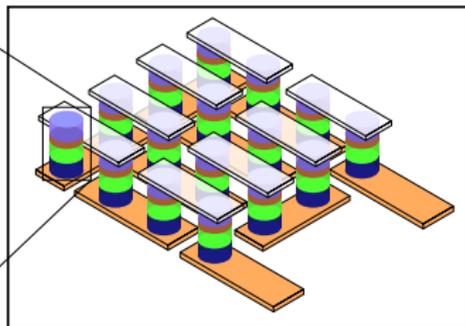
TMR-Stacks in Brückenschaltung

- Reihenschaltung vieler Stacks im Mäander Strombedarf sinkt, Spannungsfestigkeit gesichert
- Vier Mäander bilden Brückenschaltung
- Zur Winkelmessung zwei Brücken um 90° gedreht (cos, sin)

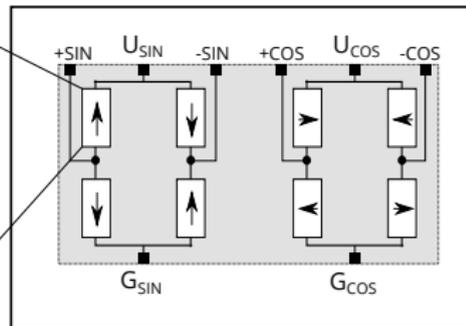
Einzelner TMR-Stack



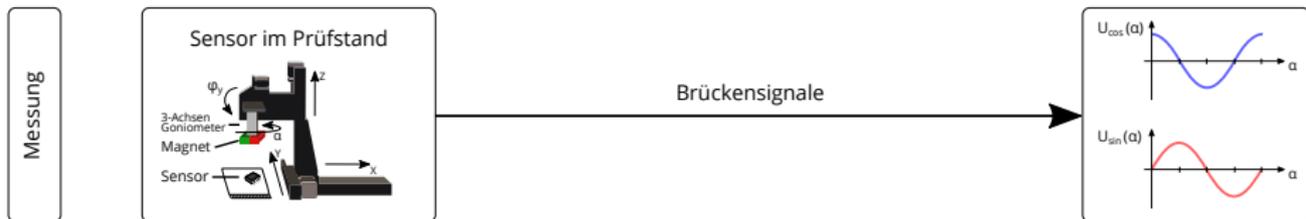
Mäander aus TMR-Stacks



TMR-Sensor in Brückenschaltung

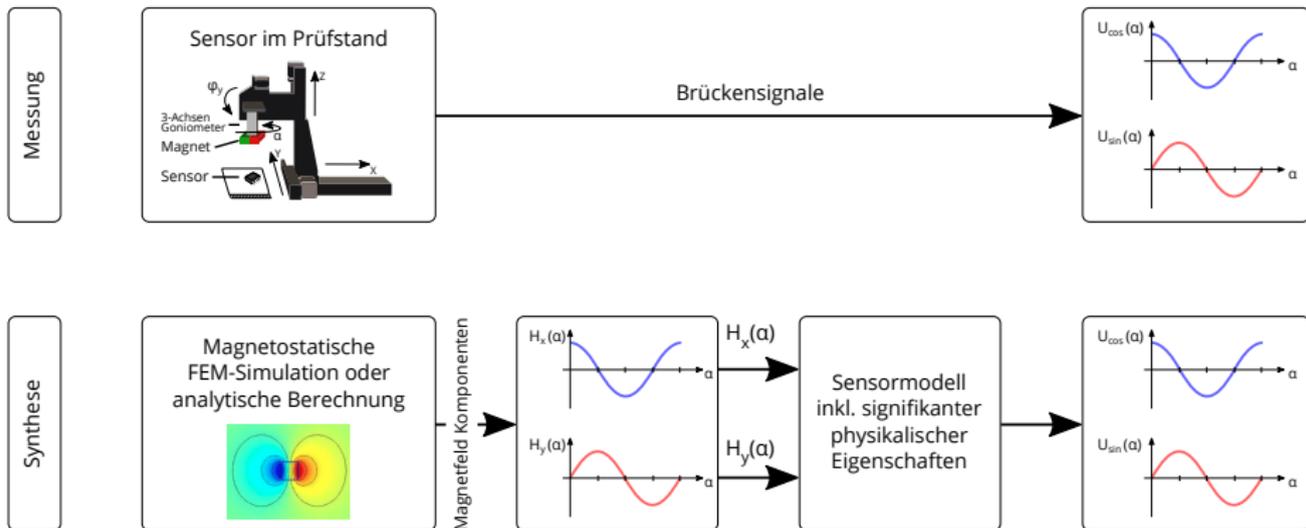


Sensor-Charakterisierung — Wofür ?



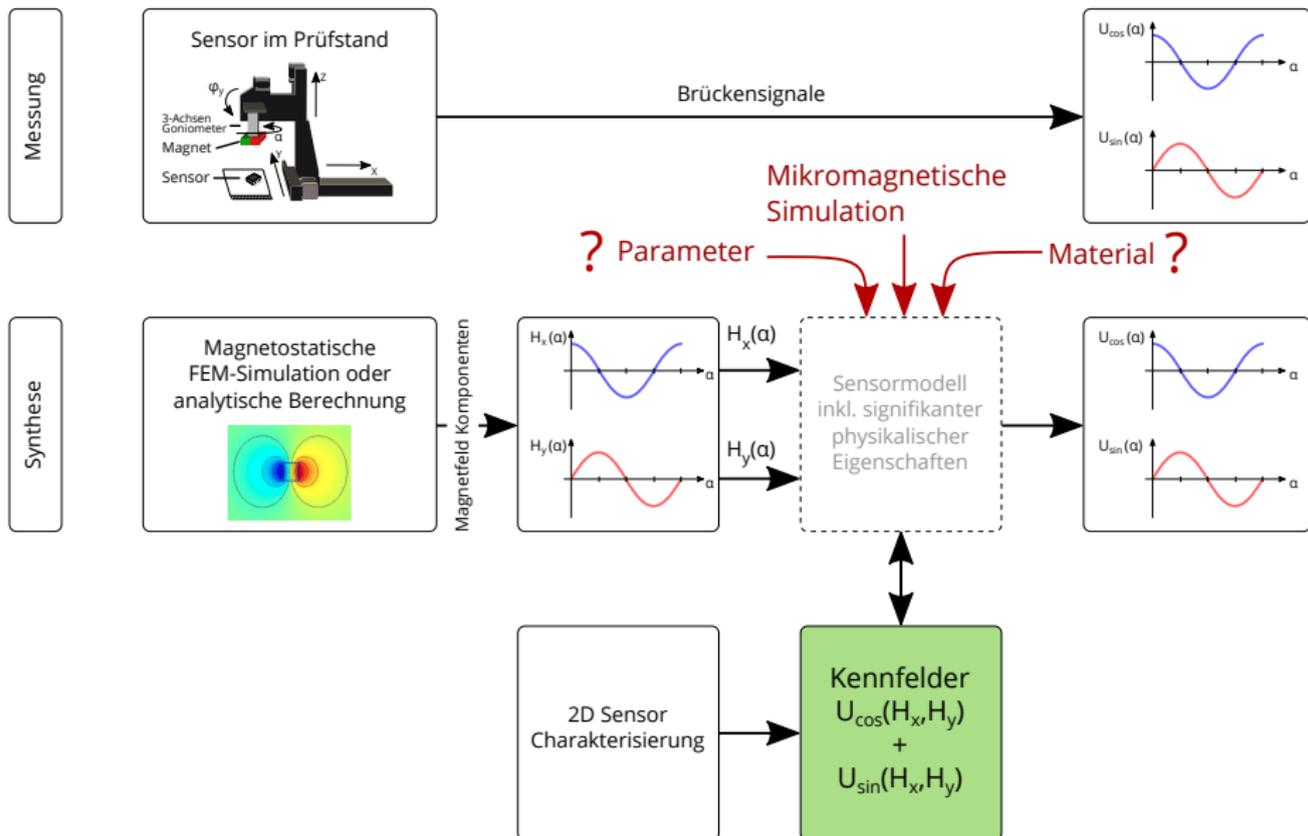
Angepasst nach [7]

Sensor-Charakterisierung — Wofür ?



Angepasst nach [7]

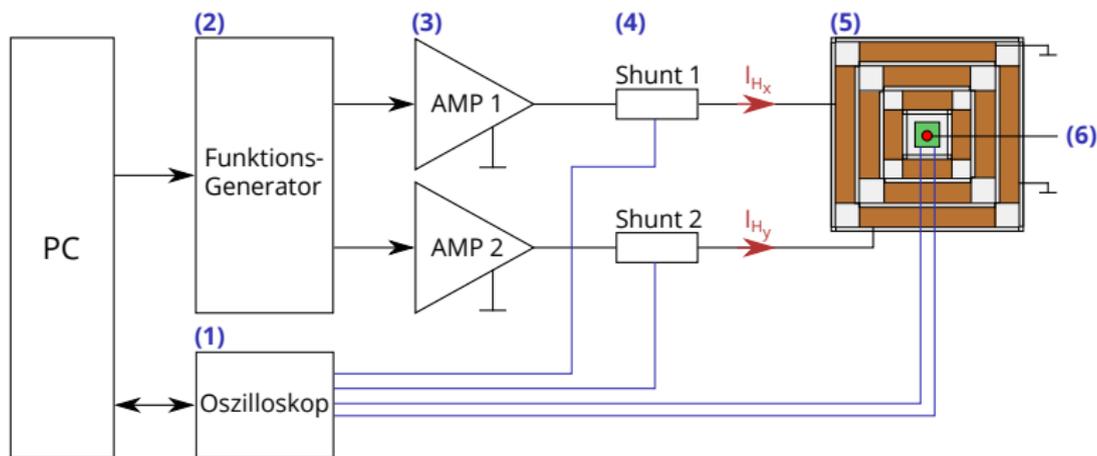
Sensor-Charakterisierung — Wofür ?



Angepasst nach [7]

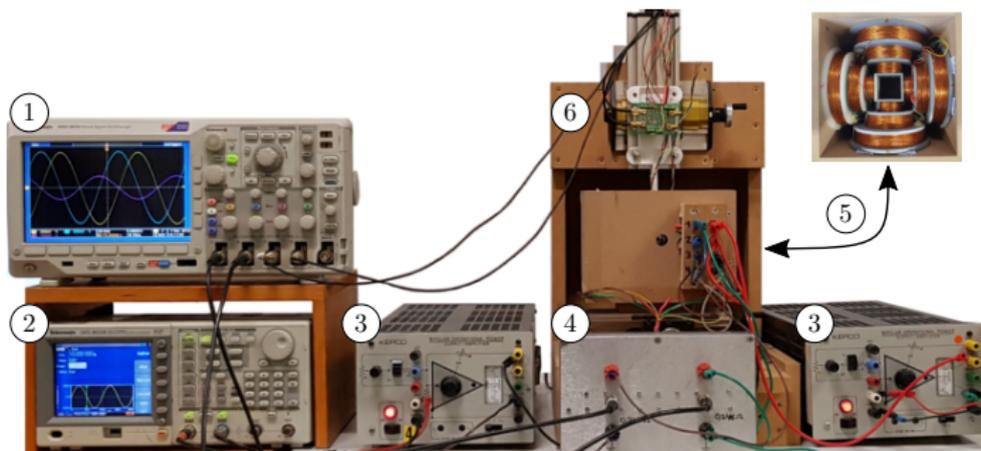
Messplatz für die 2D Sensor-Charakterisierung

- (1) Oszilloskop: Aufzeichnung von Spulenströmen und Sensorsignalen
- (2) Funktionsgenerator: Einspeisung der Anregefunktionen
- (3) Leistungsverstärker: Verstärkung der Anregung in die Spulen
- (4) Shuntwiderstände: Messung des Spulenstroms
- (5) Kreuzspulen-Anordnung: Feldstärkengenerierung in X- und Y-Richtung mit Luftspulen
- (6) DUT: Magnetischer Sensor innerhalb des Messplatzes



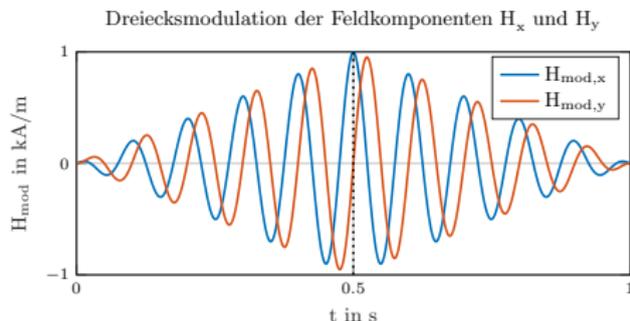
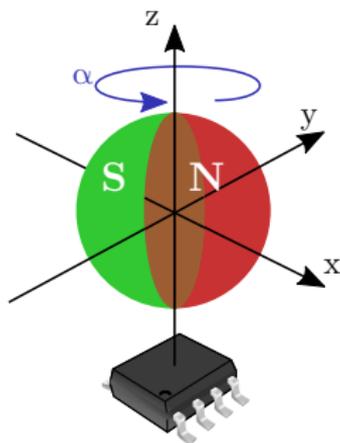
Messplatz für die 2D Sensor-Charakterisierung

- (1) Oszilloskop: Aufzeichnung von Spulenströmen und Sensorsignalen
- (2) Funktionsgenerator: Einspeisung der Anregefunktionen
- (3) Leistungsverstärker: Verstärkung der Anregung in die Spulen
- (4) Shuntwiderstände: Messung des Spulenstroms
- (5) Kreuzspulen-Anordnung: Feldstärkengenerierung in X- und Y-Richtung mit Luftspulen
- (6) DUT: Magnetischer Sensor innerhalb des Messplatzes

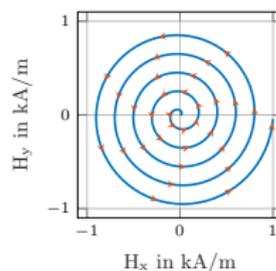


Anregungsfunktion für Winkelsensoren

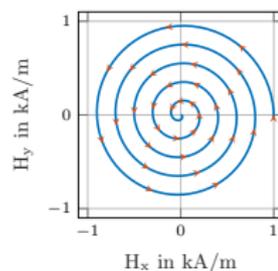
- Spiralförmige Anregungsfunktion, Drehung des Magneten mit verändertem Abstand
- Steigende und fallende Feldstärke
- Trennung beider Fälle
- Zwei Kennfelder für jeden Sensorausgang



Steigende Feldstärke



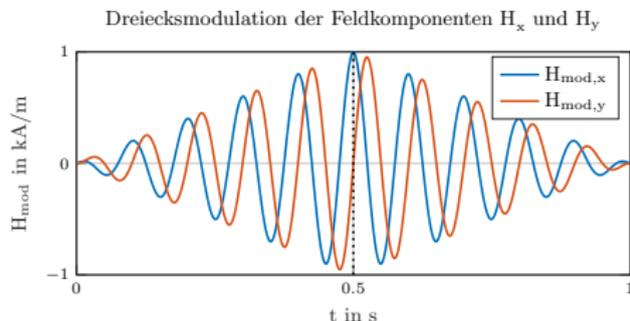
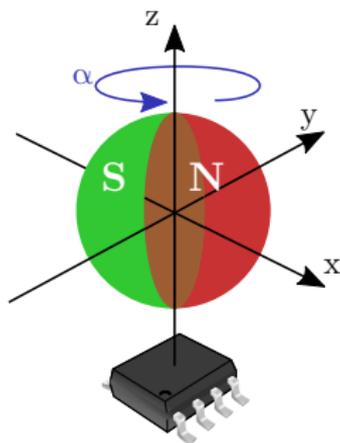
Fallende Feldstärke



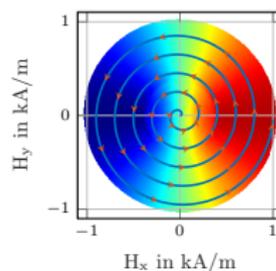
Vereinfachte Darstellung der Anregungsfunktion. Für die Kennfelder werden enge Spiralen verwendet.

Anregfunktion für Winkelsensoren

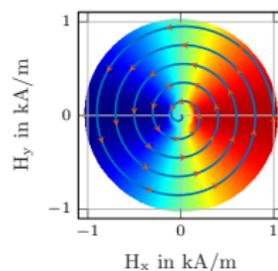
- Spiralförmige Anregfunktion, Drehung des Magneten mit verändertem Abstand
- Steigende und fallende Feldstärke
- Trennung beider Fälle
- Zwei Kennfelder für jeden Sensorausgang



Steigende Feldstärke



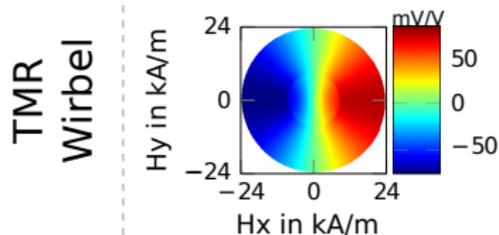
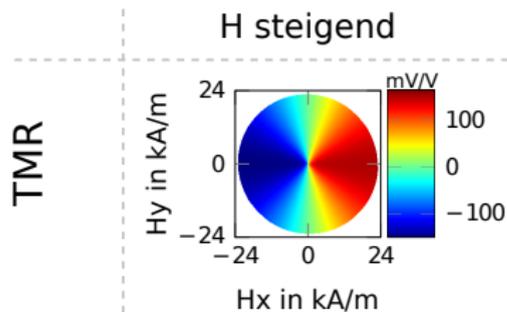
Fallende Feldstärke



Vereinfachte Darstellung der Anregfunktion. Für die Kennfelder werden enge Spiralen verwendet.

Kennfelder der TMR-Sensoren

- Kennfeld für Cosinus-Signal $U_{\cos}(H_x, H_y)$, Sinus-Signal äquivalent
- Farbe entspricht Sensor-Ausgangsspannung vgl. Farbskala



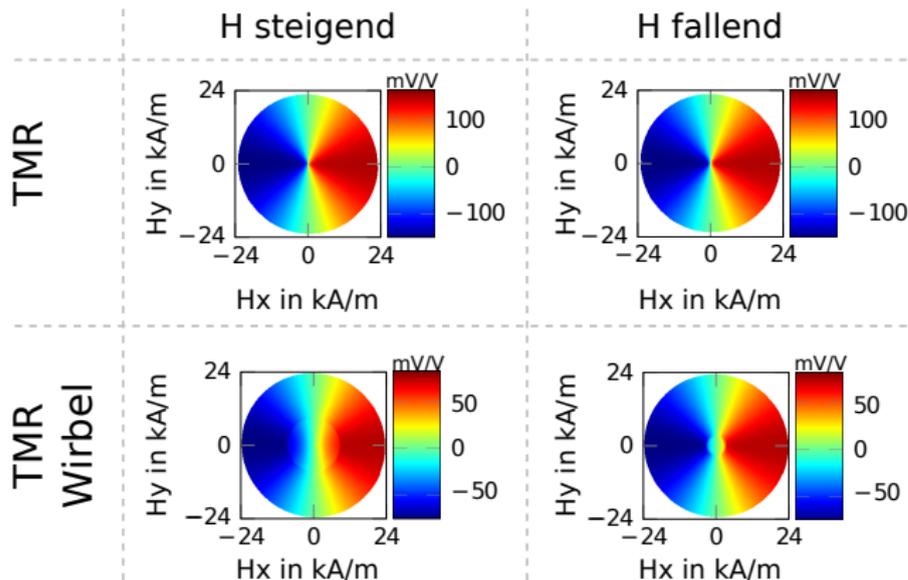
Spiralförmige Anregung

Feldstärke $H_{\max} = 24 \text{ kA/m}$

Versorgung $U_{CC} = 4,5 \text{ V}$

Kennfelder der TMR-Sensoren

- Kennfeld für Cosinus-Signal $U_{\cos}(H_x, H_y)$, Sinus-Signal äquivalent
- Farbe entspricht Sensor-Ausgangsspannung vgl. Farbskala



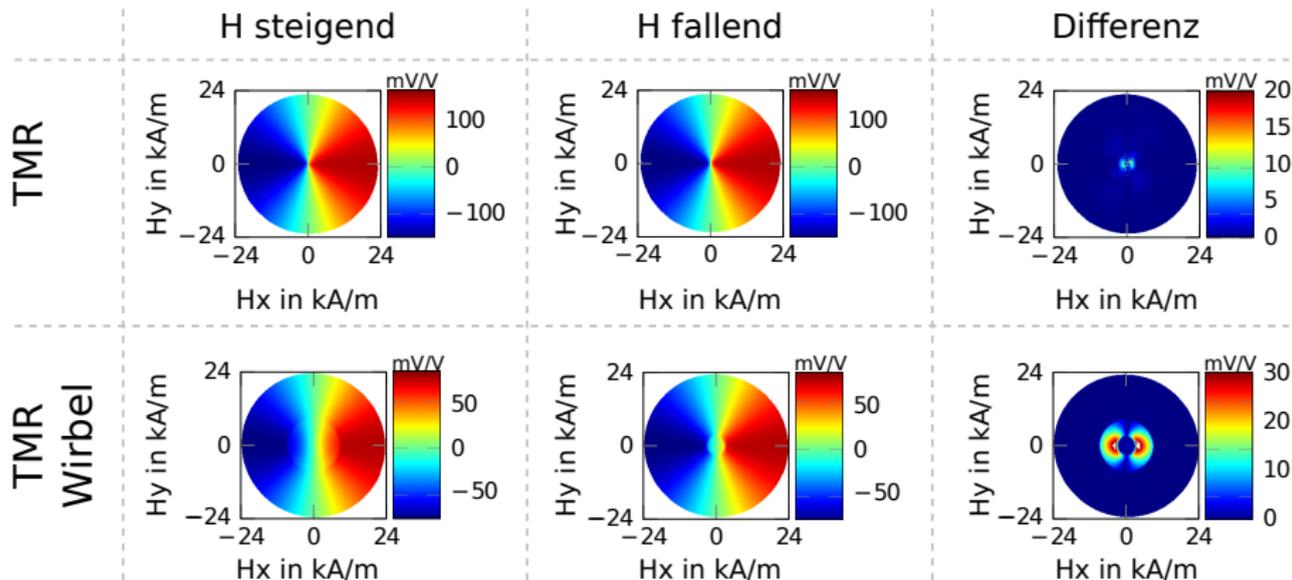
Spiralförmige Anregung

Feldstärke $H_{\max} = 24 \text{ kA/m}$

Versorgung $U_{CC} = 4,5 \text{ V}$

Kennfelder der TMR-Sensoren

- Kennfeld für Cosinus-Signal $U_{\cos}(H_x, H_y)$, Sinus-Signal äquivalent
- Farbe entspricht Sensor-Ausgangsspannung vgl. Farbskala

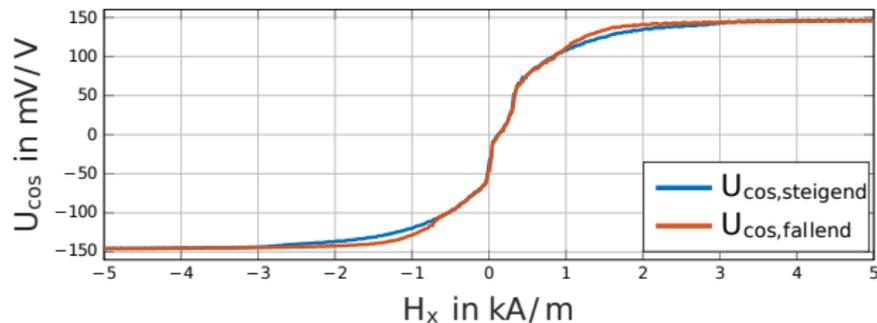
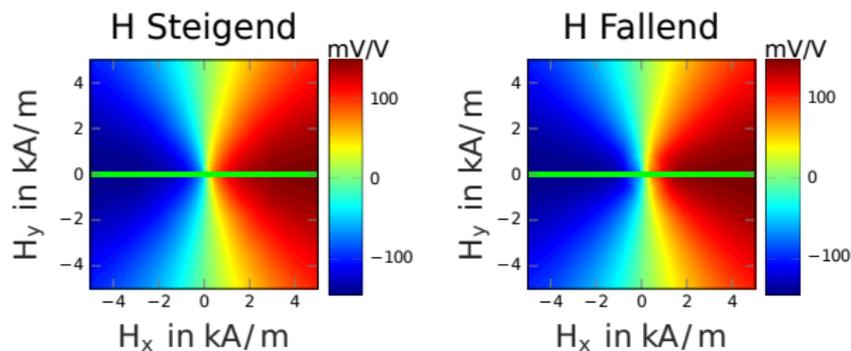


Spiralförmige Anregung

Feldstärke $H_{\max} = 24 \text{ kA/m}$

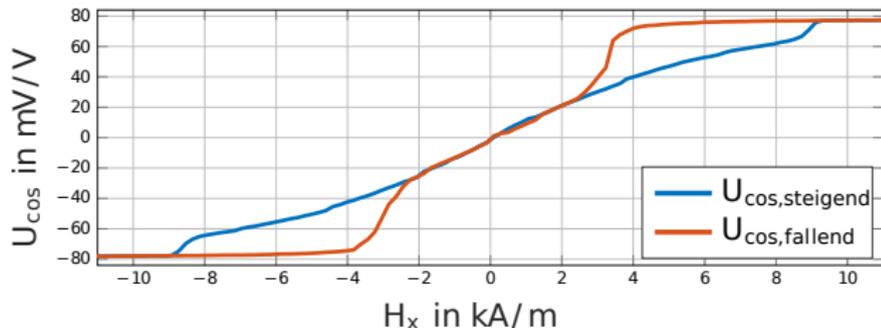
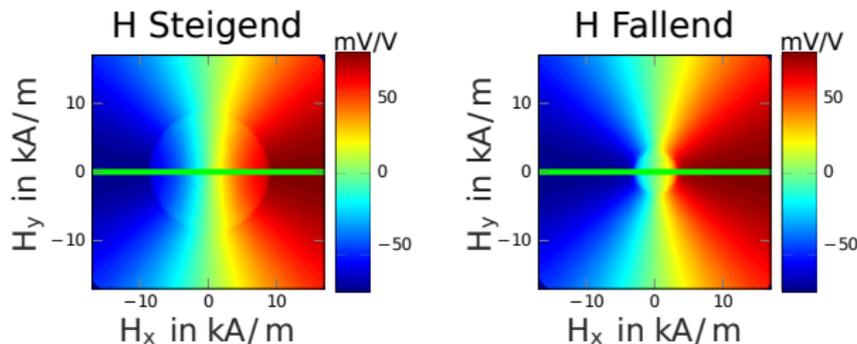
Versorgung $U_{CC} = 4,5 \text{ V}$

- Cosinus-Kennfeld für $|H| = \pm 5 \text{ kA/m}$
- Schnitt bei $H_y = 0 \text{ kA/m}$ (unten)
- Sättigung ab $H = \pm 4 \text{ kA/m}$
 $U_{\text{out}} = \pm 150 \text{ mV/V}$
- Differenz im Bereich von $|H| = 1 \dots 2 \text{ kA/m}$



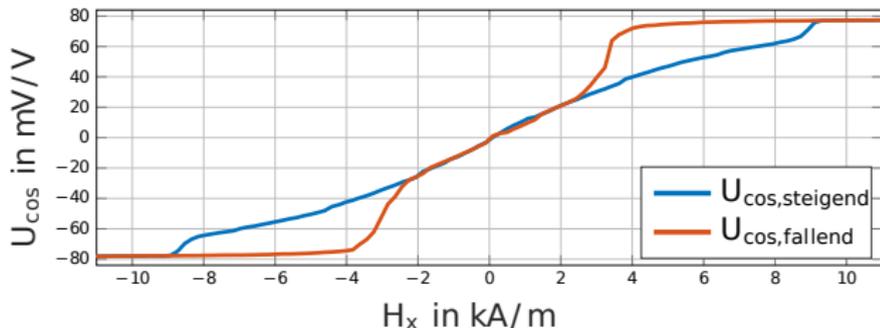
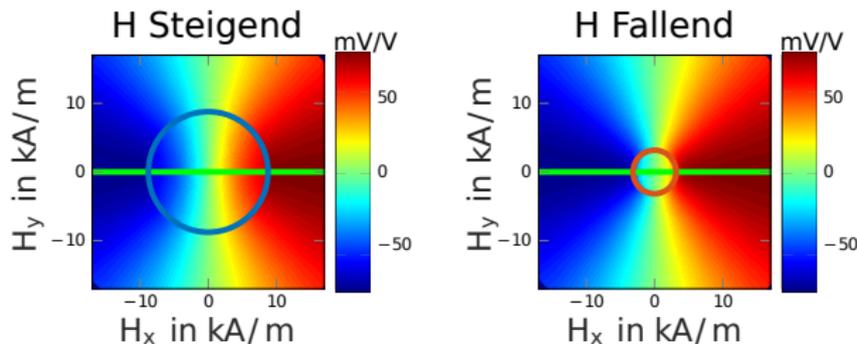
Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

- Cosinus-Kennfeld für steigende und fallende Feldstärke
- Schnitt bei $H_y = 0$ kA/m (unten)
- Zentrum zeigt lineare Abhängigkeit
 - ▶ Steigend großer „Teller“
 - ▶ Fallend kleiner „Teller“
- Sättigungsbereich außerhalb der „Teller“
 $U_{\text{out}} = \pm 80$ mV/V



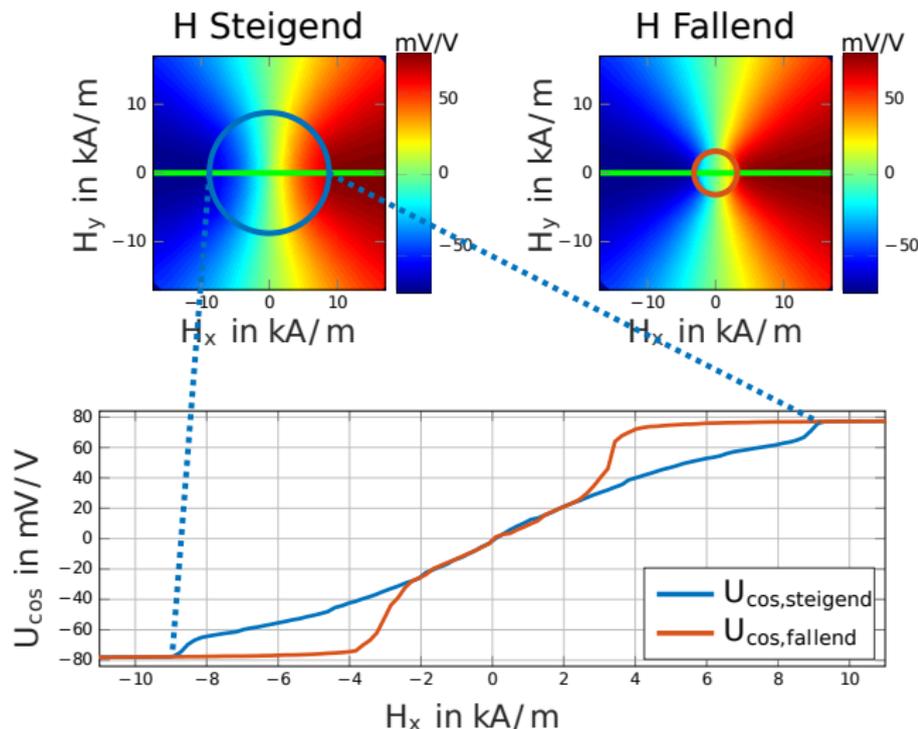
Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

- Cosinus-Kennfeld für steigende und fallende Feldstärke
- Schnitt bei $H_y = 0 \text{ kA/m}$ (unten)
- Zentrum zeigt lineare Abhängigkeit
 - ▶ Steigend großer „Teller“
 - ▶ Fallend kleiner „Teller“
- Sättigungsbereich außerhalb der „Teller“
 $U_{\text{out}} = \pm 80 \text{ mV/V}$



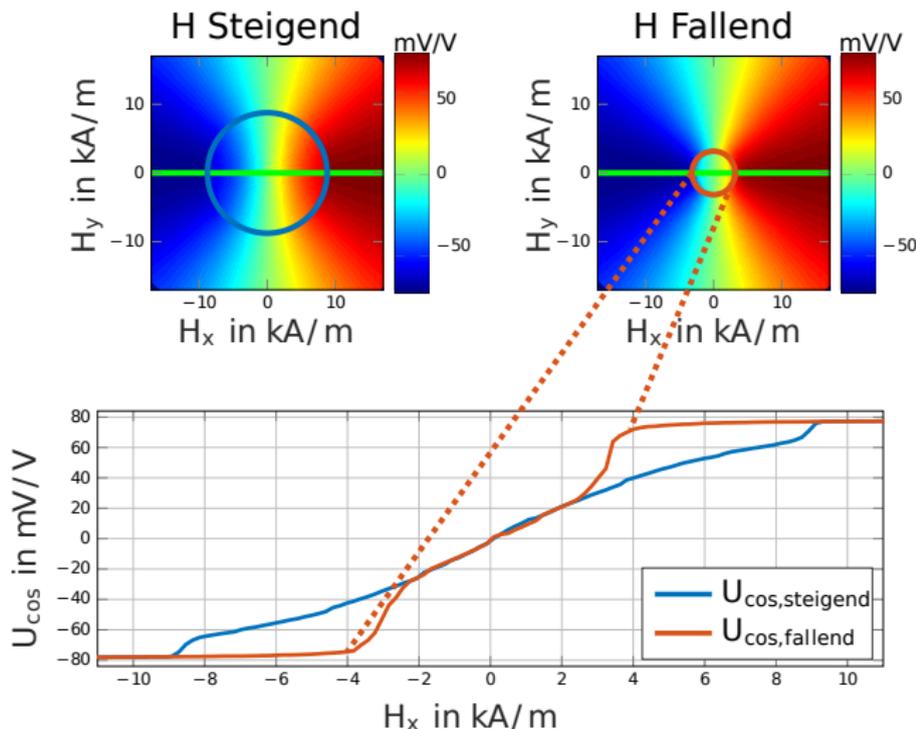
Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

- Cosinus-Kennfeld für steigende und fallende Feldstärke
- Schnitt bei $H_y = 0$ kA/m (unten)
- Zentrum zeigt lineare Abhängigkeit
 - ▶ Steigend großer „Teller“
 - ▶ Fallend kleiner „Teller“
- Sättigungsbereich außerhalb der „Teller“
 $U_{\text{out}} = \pm 80$ mV/V



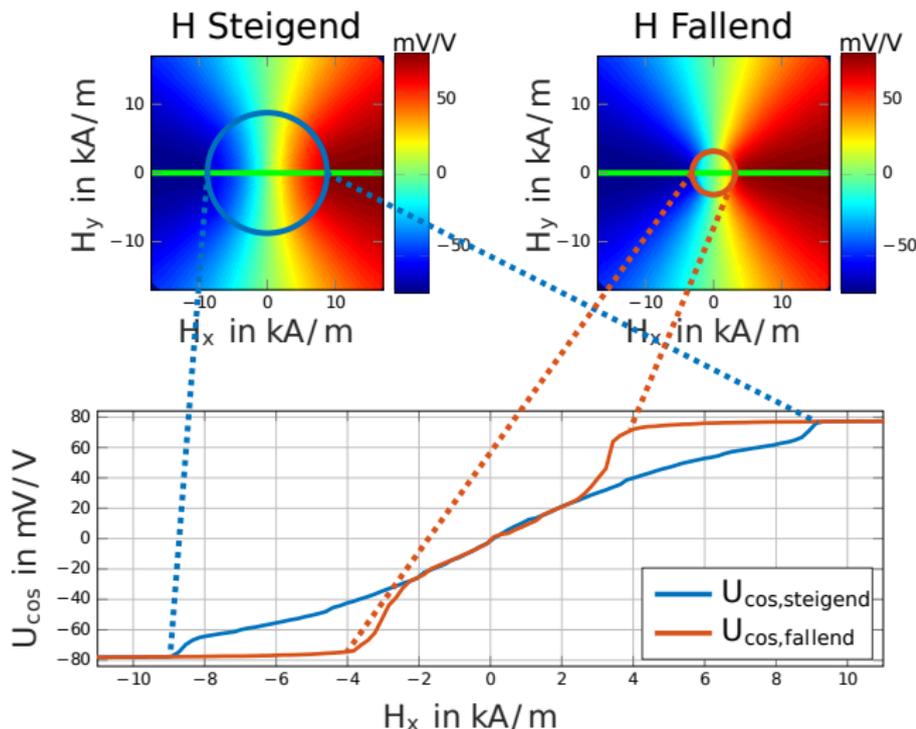
Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

- Cosinus-Kennfeld für steigende und fallende Feldstärke
- Schnitt bei $H_y = 0$ kA/m (unten)
- Zentrum zeigt lineare Abhängigkeit
 - ▶ Steigend großer „Teller“
 - ▶ Fallend kleiner „Teller“
- Sättigungsbereich außerhalb der „Teller“
 $U_{\text{out}} = \pm 80$ mV/V



Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

- Cosinus-Kennfeld für steigende und fallende Feldstärke
- Schnitt bei $H_y = 0$ kA/m (unten)
- Zentrum zeigt lineare Abhängigkeit
 - ▶ Steigend großer „Teller“
 - ▶ Fallend kleiner „Teller“
- Sättigungsbereich außerhalb der „Teller“
 $U_{\text{out}} = \pm 80$ mV/V

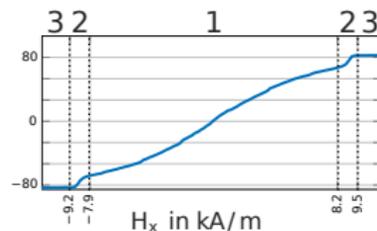
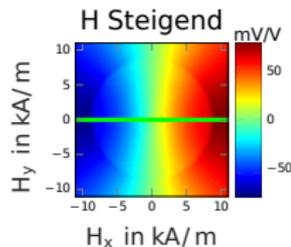


Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

● Steigende Feldstärke:

- 1 Linear $H \approx -8,0 \dots 8,0 \text{ kA/m}$
- 2 Annihilation $|H| \approx 8,0 \dots 9,5 \text{ kA/m}$
- 3 Gesättigt $|H| > 9,5 \text{ kA/m}$

*Annihilation: Wirbel-Auslöschung



● Fallende Feldstärke:

- 4 Linear $H = -2,2 \dots 2,5 \text{ kA/m}$
- 5 Nucleation $|H| \approx 2,5 \dots 4,0 \text{ kA/m}$
- 6 Gesättigt $|H| > 4,0 \text{ kA/m}$

*Nucleation: Wirbel-Bildung

● Differenz:

- 7 Klein $\Delta \leq 3,0 \text{ mV/V}$
- 8 Groß $\Delta \leq 35,0 \text{ mV/V}$
- 9 Klein $\Delta \leq 1,0 \text{ mV/V}$

Weiterführende Literatur [4]

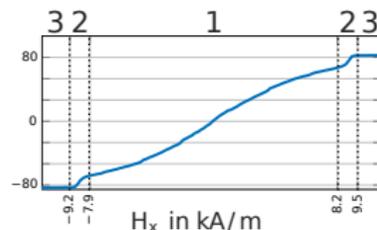
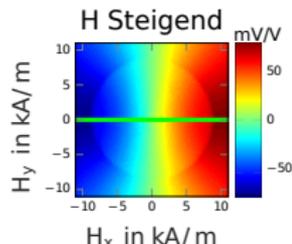
Ergebnisse abhängig vom Design des TMR-Stack. Linearer Bereich kann auf mehrere kA/m erweitert werden.

Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

Steigende Feldstärke:

- 1 Linear $H \approx -8,0 \dots 8,0 \text{ kA/m}$
- 2 Annihilation $|H| \approx 8,0 \dots 9,5 \text{ kA/m}$
- 3 Gesättigt $|H| > 9,5 \text{ kA/m}$

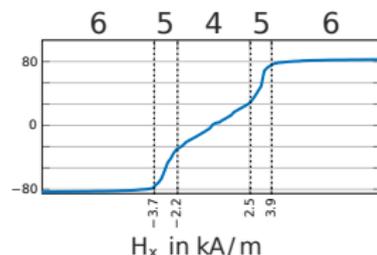
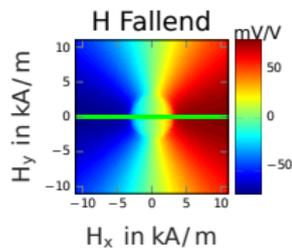
*Annihilation: Wirbel-Auslöschung



Fallende Feldstärke:

- 4 Linear $H = -2,2 \dots 2,5 \text{ kA/m}$
- 5 Nucleation $|H| \approx 2,5 \dots 4,0 \text{ kA/m}$
- 6 Gesättigt $|H| > 4,0 \text{ kA/m}$

*Nucleation: Wirbel-Bildung



Differenz:

- 7 Klein $\Delta \leq 3,0 \text{ mV/V}$
- 8 Groß $\Delta \leq 35,0 \text{ mV/V}$
- 9 Klein $\Delta \leq 1,0 \text{ mV/V}$

Weiterführende Literatur [4]

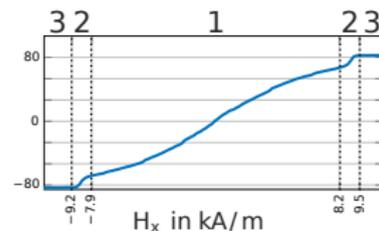
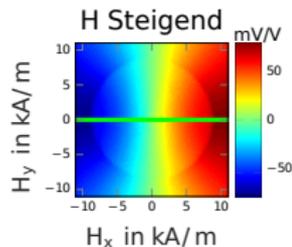
Ergebnisse abhängig vom Design des TMR-Stack. Linearer Bereich kann auf mehrere kA/m erweitert werden.

Kennfeld des TMR-Sensors mit Wirbel

Steigende Feldstärke:

- 1 Linear $H \approx -8,0 \dots 8,0 \text{ kA/m}$
- 2 Annihilation $|H| \approx 8,0 \dots 9,5 \text{ kA/m}$
- 3 Gesättigt $|H| > 9,5 \text{ kA/m}$

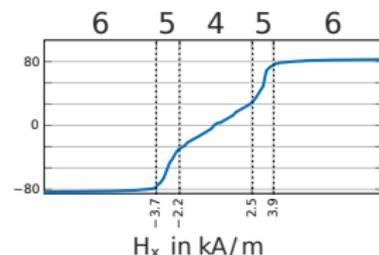
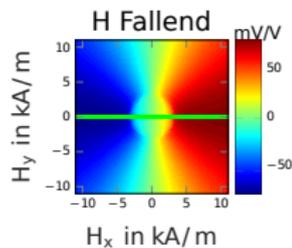
*Annihilation: Wirbel-Auslöschung



Fallende Feldstärke:

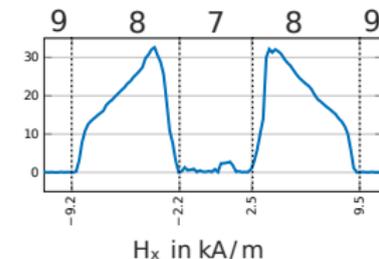
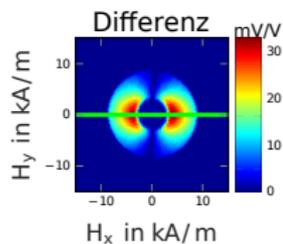
- 4 Linear $H = -2,2 \dots 2,5 \text{ kA/m}$
- 5 Nucleation $|H| \approx 2,5 \dots 4,0 \text{ kA/m}$
- 6 Gesättigt $|H| > 4,0 \text{ kA/m}$

*Nucleation: Wirbel-Bildung



Differenz:

- 7 Klein $\Delta \leq 3,0 \text{ mV/V}$
- 8 Groß $\Delta \leq 35,0 \text{ mV/V}$
- 9 Klein $\Delta \leq 1,0 \text{ mV/V}$

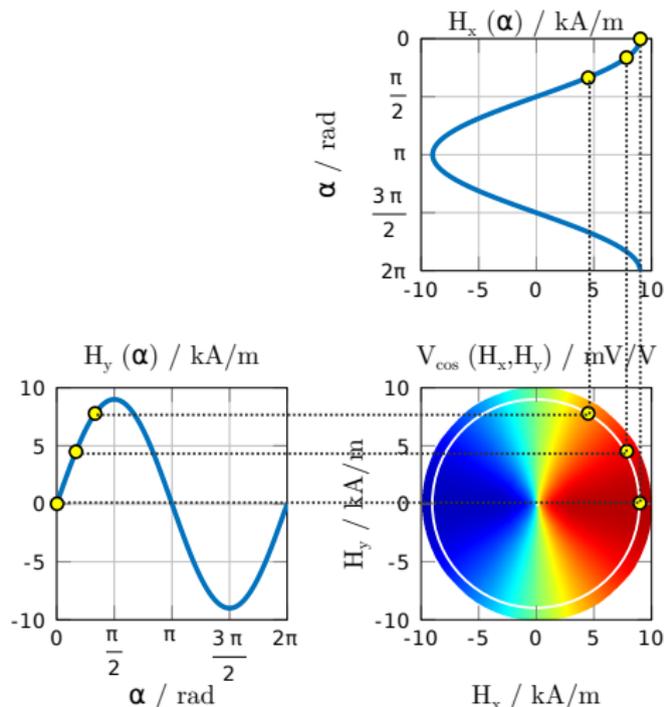
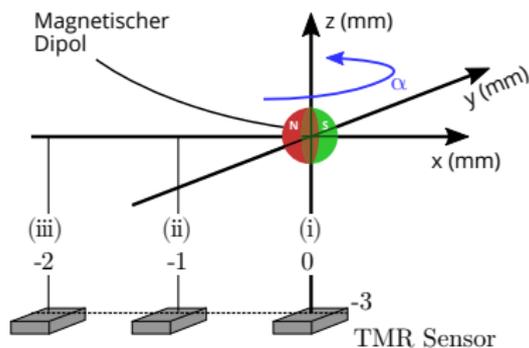


Weiterführende Literatur [4]

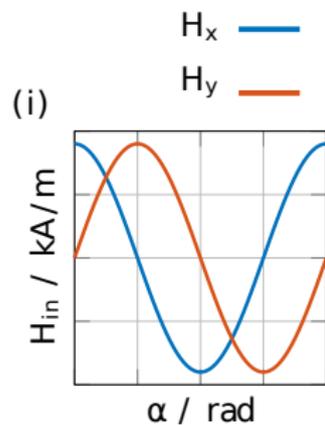
Ergebnisse abhängig vom Design des TMR-Stack. Linearer Bereich kann auf mehrere kA/m erweitert werden.

Anwendung der Kennfelddaten

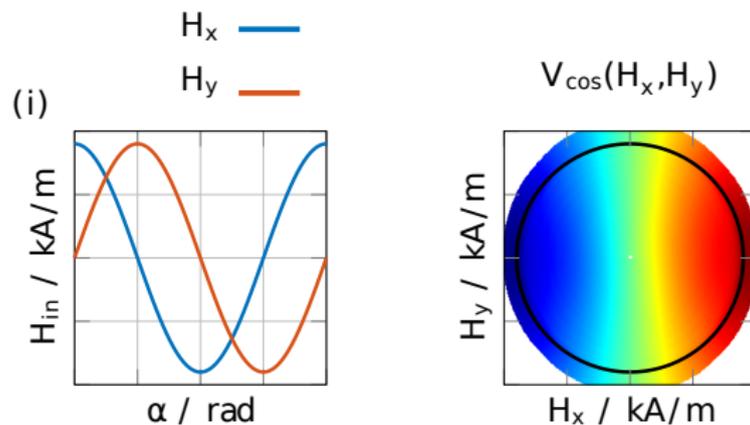
- Dipol-Simulation $H_x(\alpha)$, $H_y(\alpha)$
- Magnetfeld als Punkte der Sensor-Kennfelder
- Sensor-Ausgangswerte aus Kennfeld extrahieren



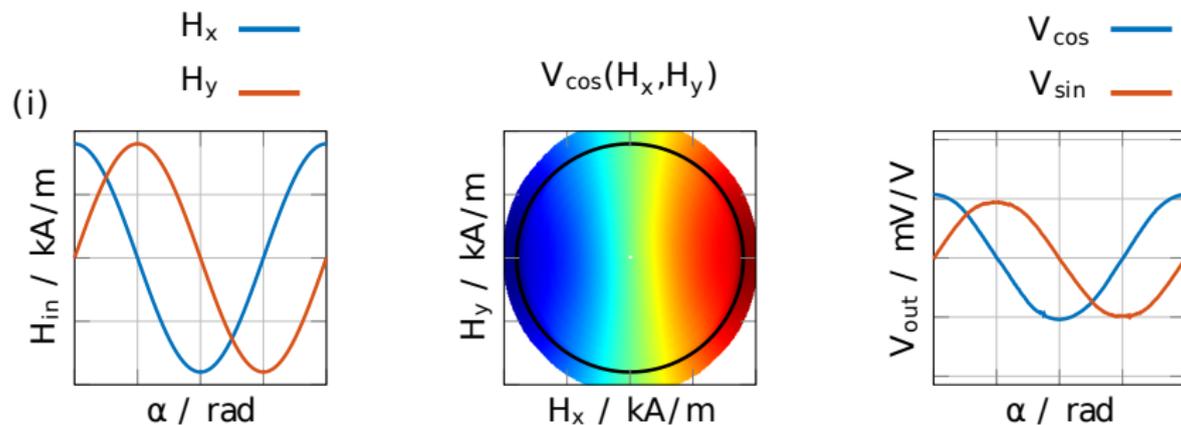
- Magnetfeldkomponenten der Dipol-Simulation
- Kreisbahn der Simulation im Kennfeld
- Extrahierte Sensorwerte



- Magnetfeldkomponenten der Dipol-Simulation
- Kreisbahn der Simulation im Kennfeld
- Extrahierte Sensorwerte



- Magnetfeldkomponenten der Dipol-Simulation
- Kreisbahn der Simulation im Kennfeld
- Extrahierte Sensorwerte

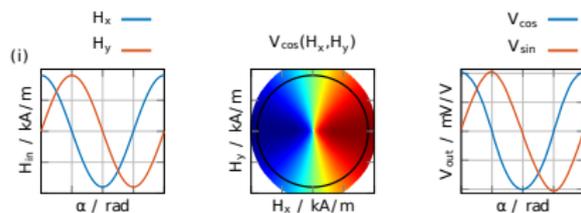


Vergleich TMR und TMR mit Wirbel

- Daten für $x = 0 \text{ mm}$ (i), -1 mm (ii), -2 mm (iii) mit $|H_{\text{max}}| = 9 \text{ kA/m}$

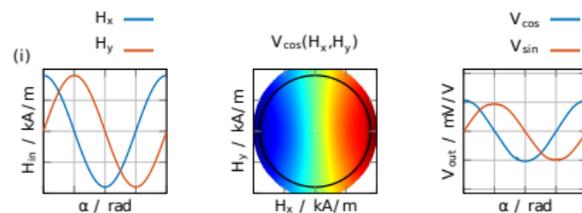
- TMR

- ▶ Amplitude nahezu konstant
- ▶ Kurvenform ändert sich



- TMR Wirbel

- ▶ Amplitude ändert sich
- ▶ Kurvenform wie Feldstärke

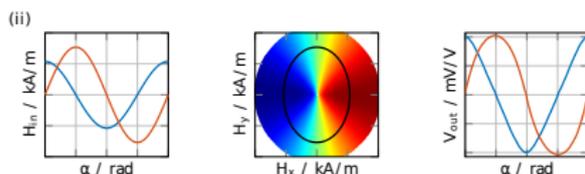
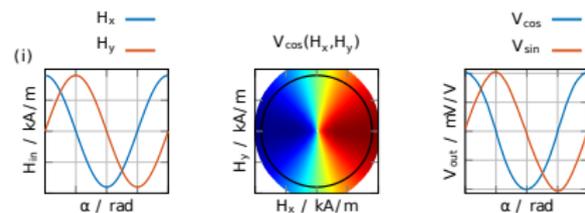


Vergleich TMR und TMR mit Wirbel

- Daten für $x = 0 \text{ mm}$ (i), -1 mm (ii), -2 mm (iii) mit $|H_{\text{max}}| = 9 \text{ kA/m}$

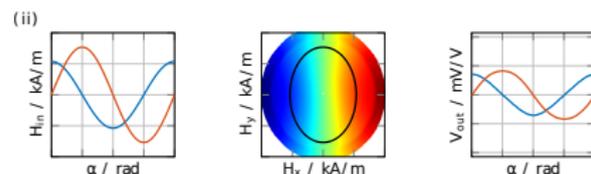
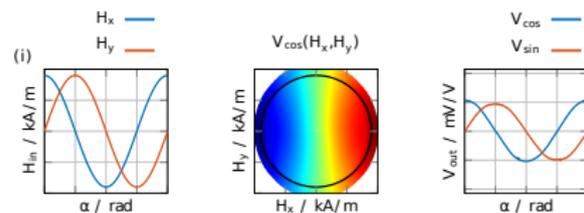
• TMR

- ▶ Amplitude nahezu konstant
- ▶ Kurvenform ändert sich



• TMR Wirbel

- ▶ Amplitude ändert sich
- ▶ Kurvenform wie Feldstärke

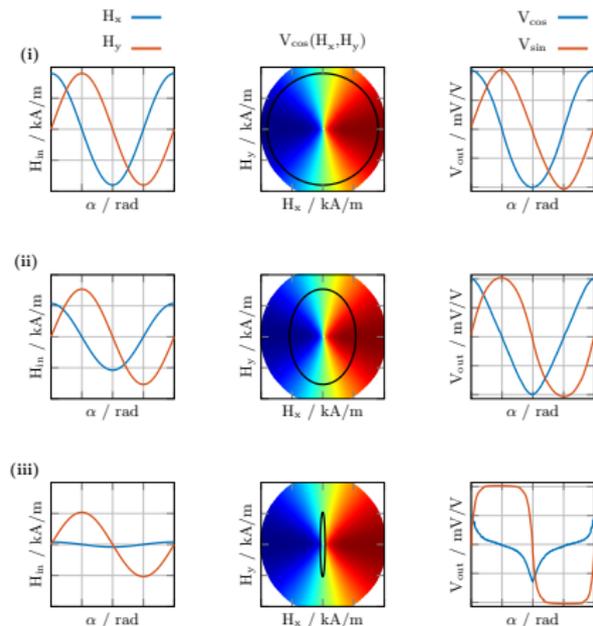


Vergleich TMR und TMR mit Wirbel

- Daten für $x = 0 \text{ mm}$ (i), -1 mm (ii), -2 mm (iii) mit $|H_{\text{max}}| = 9 \text{ kA/m}$

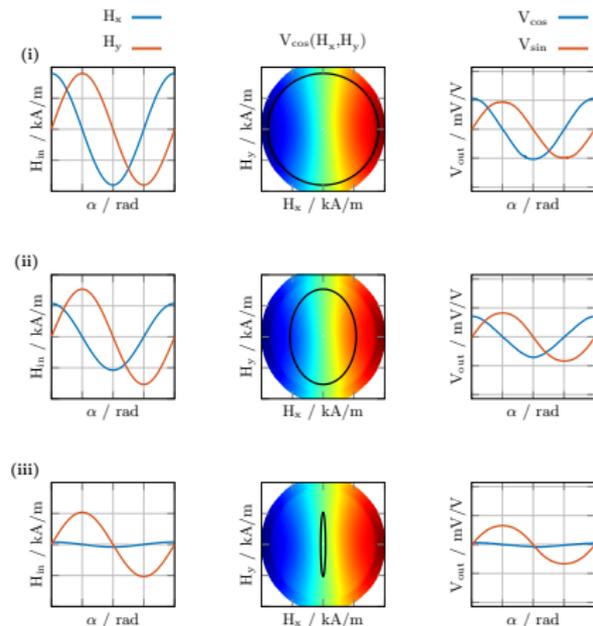
• TMR

- ▶ Amplitude nahezu konstant
- ▶ Kurvenform ändert sich

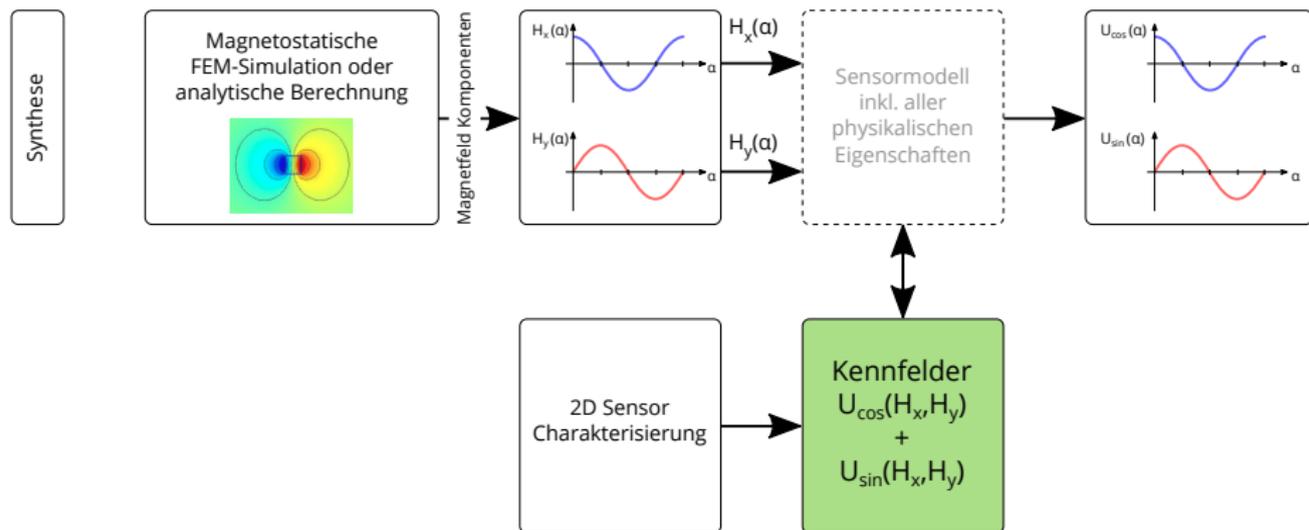


• TMR Wirbel

- ▶ Amplitude ändert sich
- ▶ Kurvenform wie Feldstärke



2D-Charakterisierung ermöglichen Synthese inklusive Sensor-Parameter

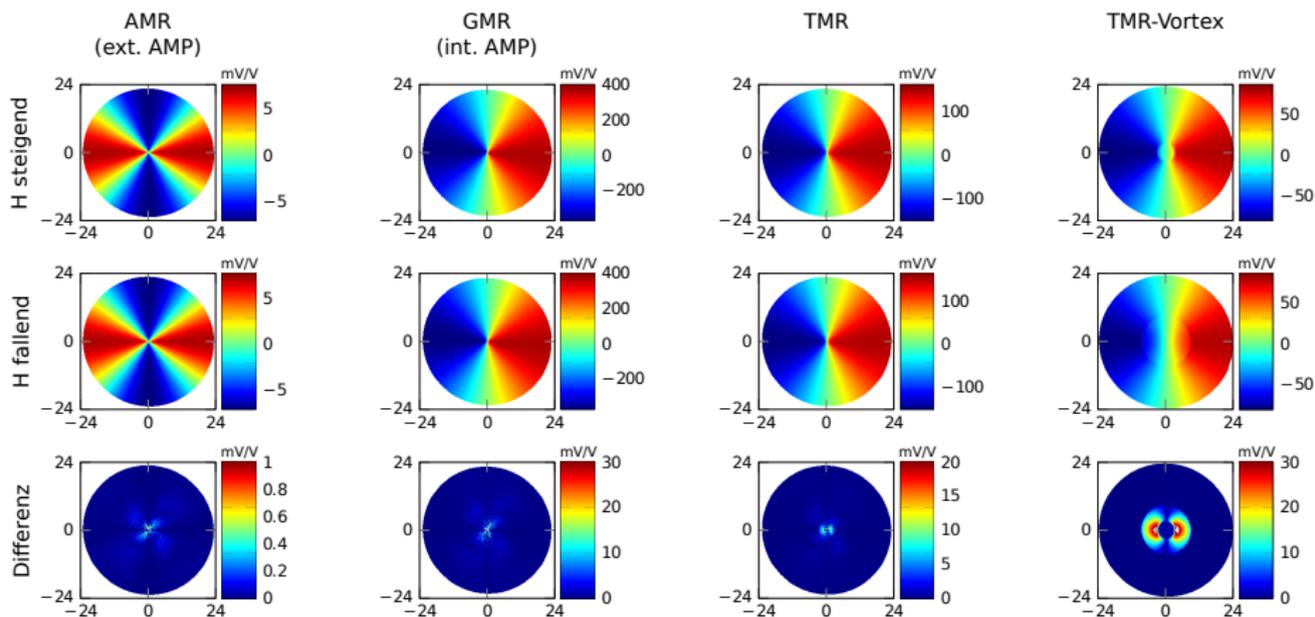


Die dargestellten Inhalte sind im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes ISAR¹ entstanden.

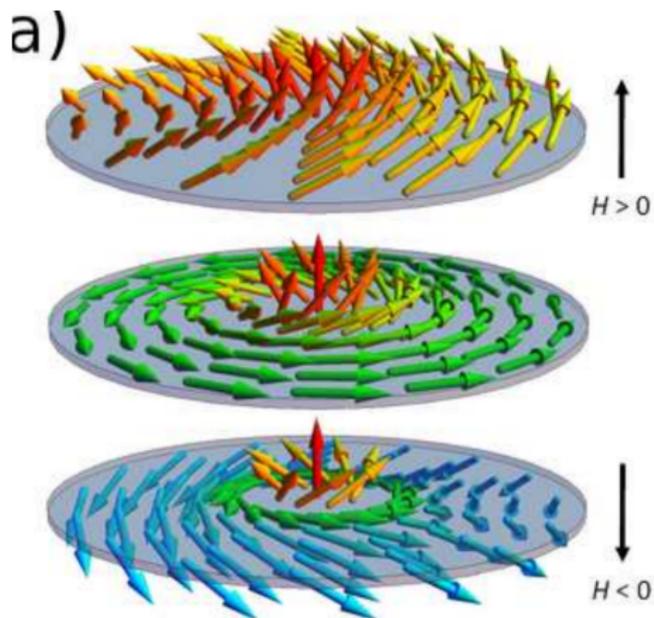
- [1] Reif, K., Sensoren im Kraftfahrzeug, Sensoren im Kraftfahrzeug, Springer, 2010.
- [2] Slatter, R., Neuartige Winkel- und Drehzahlsensoren auf Basis des Tunnelmagnetoresistiven-Effekts, 2017, Online Verfügbar: www.sensitec.com.
- [3] Slatter, R., Magnetoresistive Sensors for Angle-, Path- and Current Measurement in Harsh Environments, 2015. Online Verfügbar: www.ama-science.org.
- [4] Wurft, T., Investigation of the Magnetic Vortex State for Spin-Valve Sensors, Ph.D. Dissertation, Universität Bielefeld, 2018.
- [5] Suess, D. et al, Topologically Protected Vortex Structures to Realize Low-Noise Magnetic Sensors, 2017.
- [6] Guslienko, K., Magnetic vortex state stability reversal and dynamics in restricted geometries, Journal of nanoscience and nanotechnology, 2008.
- [7] Krey, M., Systemarchitektur und Signalverarbeitung für die Diagnose von magnetischen ABS-Sensoren, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, 13. Jan. 2015, (kooperative Promotion mit HAW Hamburg).
- [8] Schüthe, T., Albounyan, A., Riemschneider, K.-R., Two-Dimensional Characterization and Simplified Simulation Procedure for Tunnel Magnetoresistive Angle Sensors, IEEE Sensors Applications Symposium SAS, 2019.
- [9] Albounyan, A., Charakterisierung magnetischer Winkelsensoren mittels Kreuzspulenmessplatz, Bachelorthesis, 2018.

1 „Signalverarbeitung für Integrated Sensor-Arrays basierend auf dem Tunnel-Magnetoresistiven Effekt für den Einsatz in der Automobilelektronik “
Förderkennzeichen: 13FH038PA5,
Projektpartner: Ostfalia HaW, NXP Semiconductors

Backup: Charakterisierung verschiedener Sensoren



Backup: Beispiel einer mikromagnetischen Simulation



Quelle: Pigeau, B.: Magnetic vortex dynamics nanostructures, Dissertation, Universität Paris Sud-Paris XI, 2012, p. 42

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{3\mathbf{r}(\mathbf{m}^T \mathbf{r})}{r^5} - \frac{\mathbf{m}}{r^3} \right)$$

Feldstärke	$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_x & H_y & H_z \end{pmatrix}^T$
Position	$\mathbf{r} = \mathbf{r}_d - \mathbf{r}_s$
Sensorposition	\mathbf{r}_s
Dipolposition	\mathbf{r}_d hier $\mathbf{r}_d = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{r} = -\mathbf{r}_s$
Betrag Position	$r = \mathbf{r} $
Magn. Moment	$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix}^T$

