

3.3. Signalanalyse

Die Ergebnisse aus 3.2 zeigen, daß im Unterschied zu makroskopischen Spulen mit einer Vielzahl Domänen und Domänenwänden im Kern bei den integrierten Spulen mit planaren ferromagnetischen Kernen nur die Bewegung einer oder zweier Domänenwände zur Ummagnetisierung beitragen. Die Effekte einer Mittelung über eine Schar von Einzelprozessen, die entsprechend dem zentralen Grenzwertsatz zu einem Gaußschen Normalprozeß führt, kann daher wegen des Vorhandenseins nur weniger Domänenwände nicht angenommen werden.

Zum anderen erfolgt keine vollständige Ummagnetisierung durch die auftretenden Streufeld- und Entmagnetisierungseffekte, es ist (in Abhängigkeit vom Feld H_0) mit statischen, zufälligen Ereignissen zu rechnen. Daher können auch Stationarität im engeren oder weiteren Sinne /BRA 90/ und Ergodizität /MES 91/ der Prozesse nur bedingt angenommen werden.

Diese aus den Domänenuntersuchungen abgeleiteten Aussagen sind für die Auswahl der zur Charakterisierung der Sensorauflösung anwendbaren Meßverfahren und der Bewertung der Ergebnisse wichtig.

Die statistischen Eigenschaften des Sensorsignals $u(t)$ werden im Zeitbereich bei Annahme eines Normalprozesses insgesamt durch seine Autokorrelationsfunktion beschrieben. Ausgehend von der Kreuzkorrelationsfunktion für instationäre Verhältnisse

$$\Phi_{xy}(t_1, t_2) = E\{x(t_1) \cdot y(t_2)\} = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} x_1 \cdot y_1 \cdot w(x_1, y_1; t_1, t_2) \cdot dx_1 dy_1 \quad (3.16)$$

kommt man bei der Annahme von Stationarität zu

$$\Phi_{xy}(\tau) = E\{x(t) \cdot y(t + \tau)\} = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} x_1 \cdot y_1 \cdot w(x_1, y_1; \tau) \cdot dx_1 dy_1 \quad (3.17)$$

und zusätzlicher Ergodizität zu

$$\Phi_{xy}(\tau) = E\{x(t) \cdot y(t + \tau)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot y(t + \tau) \cdot d\tau. \quad (3.18)$$

Analoge Überlegungen und Voraussetzungen führen für die Autokorrelationsfunktion zu

$$\Phi_{uu}(\tau) = E\{u(t) \cdot u(t + \tau)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} u(t) \cdot u(t + \tau) \cdot d\tau. \quad (3.19)$$

Fourier-Partner der Autokorrelationsfunktion ist das (Auto-) Leistungsdichtespektrum

$$S_{uu}(\omega) = F\{\Phi_{uu}(\tau)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{uu}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{U^*(\omega) \cdot U(\omega)}{2 \cdot T} \quad (3.20)$$

Direkte Meßverfahren für das Leistungsdichtespektrum (z.B. mittels Filterbänken oder Spektrenanalysatoren) sind sehr zeitaufwendig und erfordern teure Meßgeräte. Indirekte Messungen wie die Periodogrammschätzung mit dem FFT-Analysator

$$S_{Tuu}(\omega) = \frac{U_T^*(\omega) \cdot U_T(\omega)}{2 \cdot T} \quad (3.21)$$

als Schätzwert für

$$S_{uu}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{U^*(\omega) \cdot U(\omega)}{2 \cdot T} \quad (3.22)$$

mit

$$u_T(t) = u(t) \cdot \text{rect} \frac{t}{2 \cdot T} \quad U_T(\omega) = F\{u_T(t)\} \quad (3.23)$$

haben entsprechend /PAP 91/ eine große Varianz (> 100 %)

$$\text{Var}[S_{Tuu}(\omega)] \geq S_{uu}(\omega) \quad (3.24)$$

Zur Verminderung der Varianz kann über mehrere Periodogramme gemittelt werden. Folge ist eine Erhöhung der Meßzeit. Auch das Mitteln im Periodogramm über benachbarte Spektrallinien führt entweder zu einer Verringerung der Auflösung des Periodogramms oder, indem die ursprüngliche Auflösung erhöht wird, wieder zu einer Erhöhung der Meßzeit.

Allerdings erwies sich der Wert von Messungen der Leistungsdichtespektren zur Ermittlung der spektralen Verteilung der Rauschleistung aufgrund der Instationarität des Rauschprozesses als eher gering. Für Applikationen wird ohnehin eine bestimmte Bandbreite festgelegt, für die nach dem Rauschen des Ausgangssignals und nicht nach dessen spektraler Zusammensetzung gefragt wird.

Wegen

$$\Phi_{xx}(0) = E\{x^2(t)\} = \sigma_x^2 + \mu_x^2 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx} d\omega \quad (3.25)$$

erhält man für mittelwertfreie Signale $\mu = 0$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx} d\omega \quad (3.26)$$

$$U_{\text{Noise}}^2 = \sigma_x^2 = \Phi_{xx}(0) = E\{x(t) \cdot x(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) \cdot x(t) \cdot d\tau \quad (3.27)$$

mit der Varianz eine integrale Aussage über das Rauschen in einem bestimmten, durch T nach unten begrenzten Frequenzbereich. Nach oben wird der Frequenzbereich entweder durch das System selbst oder aber durch einen Tiefpass begrenzt.

Zur Messung (Demodulation der 1. Oberwelle U_{2f}) wurde ein DSP - Lock-in Verstärker EG & G 7260 genutzt. Die Zeitkonstante am Ausgang des Lock-in wurde zu $T_L = 10$ ms, die Abtastrate für U_{2f} zu 30 ms gewählt, um eine Korrelation der Meßwerte durch die Ausgangszeitkonstante zu vermeiden und trotzdem akzeptable Meßzeiten zu erreichen. Die Meßwerte werden im internen Buffer des LI 7260 zwischengespeichert, die Varianzberechnung erfolgt im Steuerrechner. Da die Voraussetzungen für einen Gaußschen Normalprozeß nicht sicher erfüllt sind, wird außerdem eine Histogrammanalyse vorgenommen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die direkte Messung des Rauschens mit dem Lock-in Verstärker an einem Sensor mit FG20-Kern ohne Elektronik und zum Vergleich die Arbeitspunkt-kennlinie dieses Sensors.

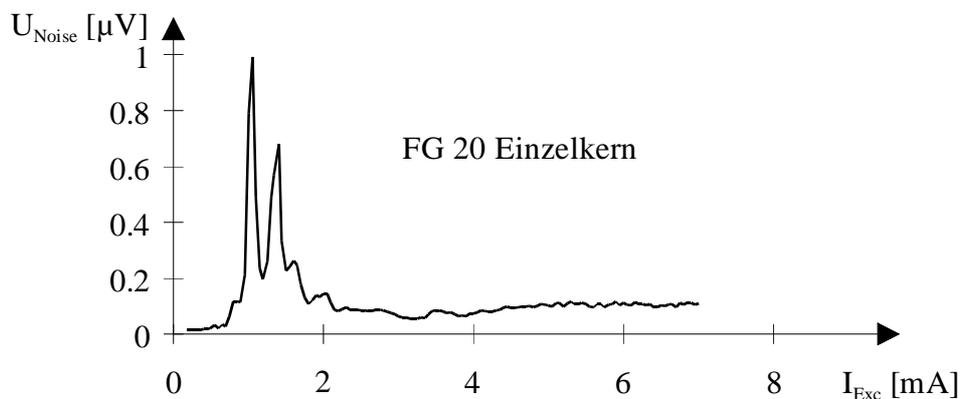


Abb. 3.19: Rauschen von U_{2f} mit Lock-in Verstärker

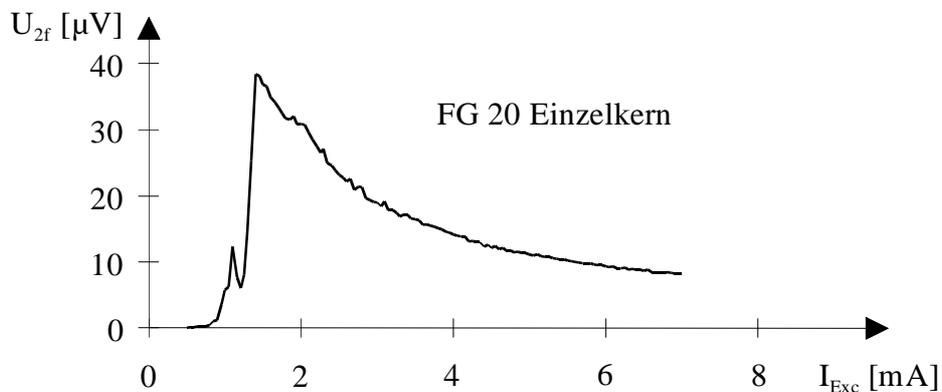


Abb. 3.20: Arbeitspunkt-kennlinie $H_0 = 20$ A/m

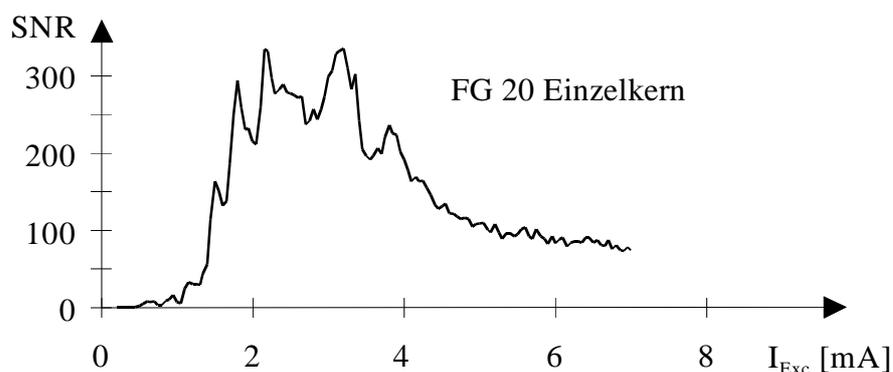


Abb. 3.21: SNR bezogen auf Sensorsignal bei $H_0 = 20$ A/m

Die Berechnung des SNR (Abb. 3.21) erfolgte aus dem Rauschen (Abb. 3.19) mittels der Arbeitspunktkennlinie (Abb. 3.20). Gewählt wurde dabei $H_0 = 20$ A/m (ungefähr die Horizontalkomponente des Erdmagnetfeldes), da so eine direkte Aussage zur Auflösung des Erdmagnetfeldes für die Kompaßanwendung gewonnen werden kann.

Entsprechend Abb. 3.21 sollte der Sensor nicht wie bisher angenommen im Arbeitspunkt, sondern bei größeren Anregungsströmen betrieben werden, um ein optimales Signal-zu-Rauschverhältnis zu gewährleisten. Die starken Fluktuationen im Maximum der Kennlinie resultieren wieder aus der bereits diskutierten Tatsache, daß die Ursache der Rauscheffekte die Bewegung von nur ein oder zwei Blochwänden ist. Aus deren "Pinnung" an Verunreinigungen, aus Keimbildungseffekten am Kernrand (Ablösen bzw. Auftreffen) sowie aus der im Kern undefiniert eingestellten Anisotropie resultieren vermutlich die gemessenen Singularitäten, da diese Effekte nicht wie bei makroskopischen Kernen durch eine (Schar-) Mittelung über viele Domänenwände unterdrückt werden. Vergleicht man die Form der Kennlinie des FG20-Sensors mit der berechneten Kennlinie nach Abb. 3.5, so zeigt die berechnete Kennlinie im Gegensatz zur gemessenen kein Abfallen der SNR zu höheren Anregungsströmen. Ursache ist hier das Sättigungsverhalten unter der Erregerspule. Infolgedessen steigt bei Erreichen der Sättigung des Kerns unter der Erregerspule die Aussteuerung der Domänen unter der Meßspule mit weiter steigendem Anregungsstrom nur noch geringfügig an, während sich jedoch das Sensorsignal entsprechend der Arbeitspunktkennlinie weiter verringert. Folge ist der Abfall der SNR zu höheren Anregungsströmen. Günstiger verhält sich hier die trifilare Wicklung. Zwar fällt auch hier die Arbeitspunktkennlinie zu höheren Strömen ab, dieser Abfall geht aber mit einer Verringerung des Rauschens durch stärkere Aussteuerung der Domänen unter der Meßspule einher. Abb. 3.22 zeigt das Rauschen, Abb. 3.23 die Arbeitspunktkennlinie und Abb. 3.24 die SNR-Kennlinie des trifilaren Sensors FGV11 mit optimierter Spulenkonfiguration entsprechend Kapitel 2.6.

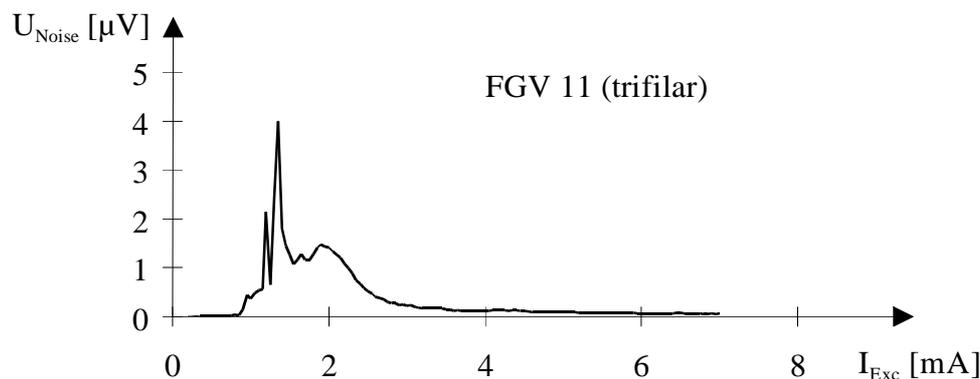
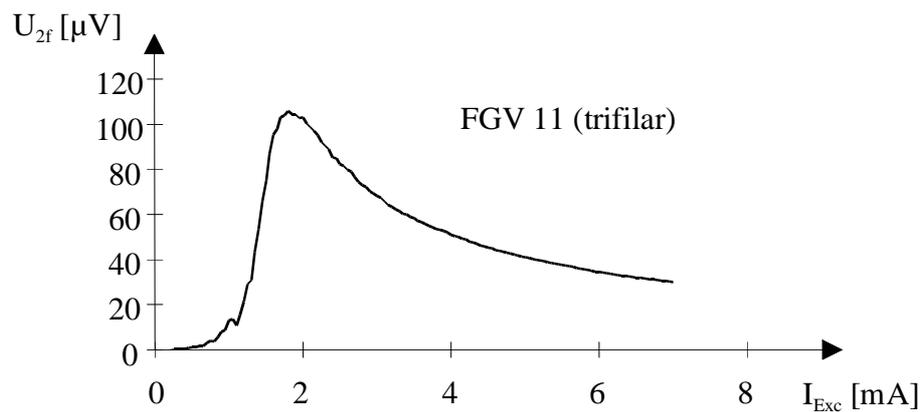
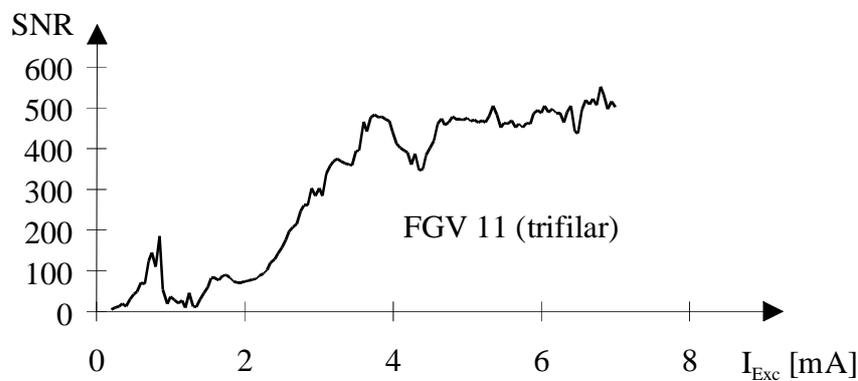
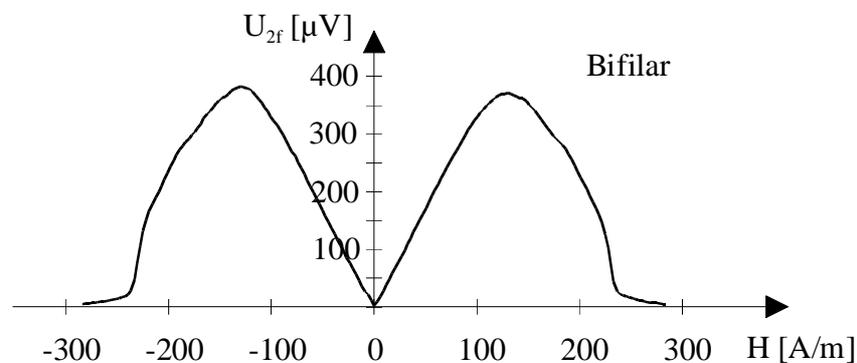


Abb. 3.22: Rauschen von U_{2f} mit Lock-in Verstärker gemessen

Abb. 3.23: Arbeitspunktkennlinie $H_0 = 20$ A/mAbb. 3.24: SNR bezogen auf Sensorsignal bei $H_0 = 20$ A/m

Insofern erweist sich die trifilare Spulenkonfiguration nicht nur bezüglich der Linearität, sondern auch hinsichtlich der Sensorauflösung als überlegen.

Zum Verständnis der Problematik bezüglich der Singularitäten trägt auch eine Messung des Rauschens bei einem festen Anregungsstrom in Abhängigkeit vom angelegten Feld entsprechend Abb. 3.26 bei. Abb. 3.25 zeigt zum Vergleich die zugehörige Empfindlichkeitskennlinie. Man erhält wiederum eine Kennlinie mit ausgeprägten Singularitäten.

Abb. 3.25: Empfindlichkeitskennlinie für $I_{Exc} = 2.83$ mA

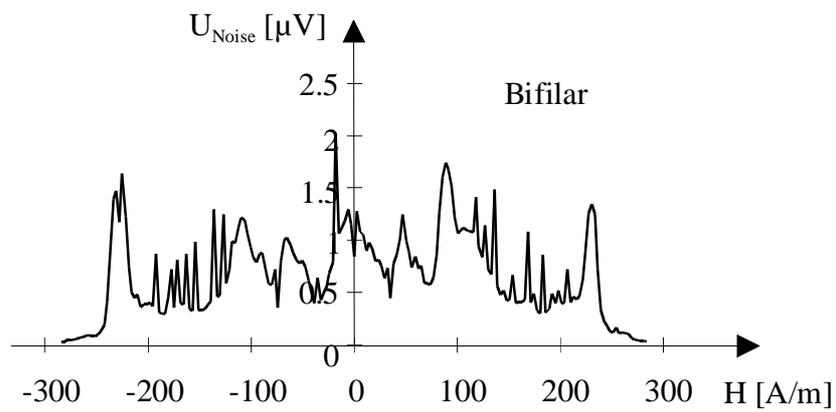


Abb. 3.26: Rauschen von U_{2f} mit Lock-in Verstärker für $I_{\text{Exc}} = 2.83 \text{ mA}$

Diese Effekte machen es schwierig mit vertretbarer Meßzeit ein reproduzierbares Kriterium für die Sensorauflösung zu erhalten.