

4.5. Sensor - und Systemtest

Die Erzeugung der Magnetfelder zur Messung der aufgebauten Sensoren und Sonden erfolgt mit 2- oder 3-achsigen Helmholtzspulen. Diese Messungen umfassen die Aufnahme der Sensorkennlinie bei verschiedenen Temperaturen und Betriebsspannungen. Bedingt durch die Anzahl der je Kennlinie zu erfassenden Meßpunkte und der Grenzfrequenz der Sonden sind diese Messungen sehr zeitaufwendig. Akzeptable Meßzeiten können nur durch parallele Messung mehrerer Sonden erreicht werden. Limitierend kann dabei die Homogenität des Feldes im Inneren der Helmholtzspule sowie die gegenseitige Beeinflussung der Sonden wirken. Das Streufeld der Sensorkerne wurde in Abschnitt 2.2 berechnet und kann bei den derzeitigen äußeren Abmessungen der Sonden vernachlässigt werden. Aus dem Betriebsstrom $I_{CC} = 30 \text{ mA}$ erhält man im Abstand von 2 cm eine Feldstärke von 0.25 A/m. Diese Feldstärke wirkt sich als DC-Offset aus und ist somit unproblematisch, da Offsetmessungen ohnehin in einer Mu-Metallbox erfolgen müssen. Für die Messung wichtiger ist der sich aus der ca. 10 % betragenden Stromänderung über die Temperatur, Feld und Betriebsspannung ergebende veränderliche Feldanteil von 0.025 A/m. Dieser liegt unter der Auflösungsgrenze der Sonde, so daß der Abstand der Sonden derzeit allein durch die Gehäuseabmessungen bestimmt wird.

Zur Homogenität der Feldverteilung im Inneren der Spulenanordnung werden z.B. in /DEH 41/ Formeln für die Feldverteilung auf der Mittelebene zwischen den Spulen und entlang der Achse der Spulenanordnung angegeben. Berechnungen der Homogenität des Feldraumes zur Ermittlung des für die Messungen zur Verfügung stehenden Bereiches erfolgen von den Anbietern solcher Spulensysteme zumeist numerisch.

Alternativ zu numerischen Verfahren kann die Feldberechnung elegant über das Vektorpotential eines ringförmigen Leiters /WUN 89/

$$\mathbf{A} = \mathbf{e}_\alpha \cdot \frac{\mu \cdot I}{\pi \cdot k} \cdot \sqrt{\frac{R}{\rho}} \cdot \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) \cdot \mathbf{K} - \mathbf{E} \right]. \quad (4.38)$$

mit

$$k^2 = \frac{4 \cdot R \cdot \rho}{(R + \rho)^2 + z^2} \quad (4.39)$$

und den elliptischen Integralen

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}(k^2) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\gamma}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \gamma}} \quad (4.40)$$

$$E = E(k^2) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin^2 \gamma} \cdot d\gamma \quad (4.41)$$

erfolgen. Das Feld H ergibt sich daraus nach

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \quad (4.42)$$

zu (in Zylinderkoordinaten)

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{k}{\sqrt{R\rho}} \left[\mathbf{e}_\rho \frac{z}{\rho} \left(-K + \frac{R^2 + \rho^2 + z^2}{(R - \rho)^2 + z^2} E \right) + \mathbf{e}_z \left(K + \frac{R^2 - \rho^2 - z^2}{(R - \rho)^2 + z^2} E \right) \right]. \quad (4.43)$$

Das Feld der Spule wird durch Summation der Felder der N Einzelwicklungen berechnet.

$$\mathbf{H}_{\text{HH}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{H}(\rho_i, z_i) \quad (4.44)$$

Moderne Mathematikprogramme wie MATHEMATICA /MAT 93/ oder MATLAB /MAT 95/ gestatten die Berechnung von E und K und damit die Auswertung von (4.43) und (4.44).

Um die Helmholtzspule auch in einem vorhandenen Klimaschrank betreiben zu können und aus konstruktiven Gründen, wurden die mittleren Durchmesser der Spulenwickel zu 464 mm (X-Achse), 404 mm (Y-Achse) und 342 mm (Z-Achse) gewählt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Verläufe der Linien gleicher prozentualer Abweichung der Feldstärke von der Sollfeldstärke im Zentrum der Helmholtz-Spule für die Z-Achse mit dem kleinsten mittleren Durchmesser.

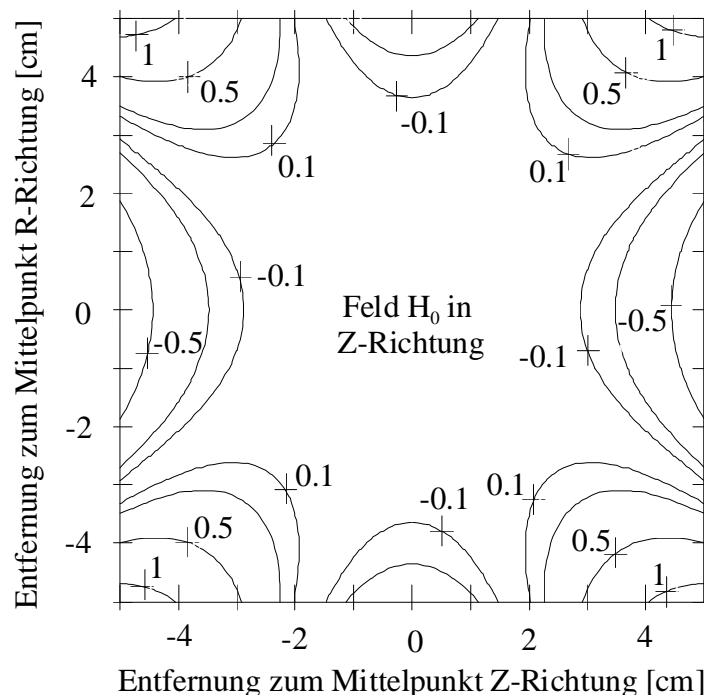


Abb. 4.50: Prozentuale Abweichung der Feldstärke H_0 in Z-Richtung (Zylinderkoordinaten)

Es ergibt sich ein nutzbares Volumen von $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ mit einer prozentualen Abweichung $< 0.1 \%$, so daß ca. 20 Sonden FGS1 gleichzeitig gemessen werden können.

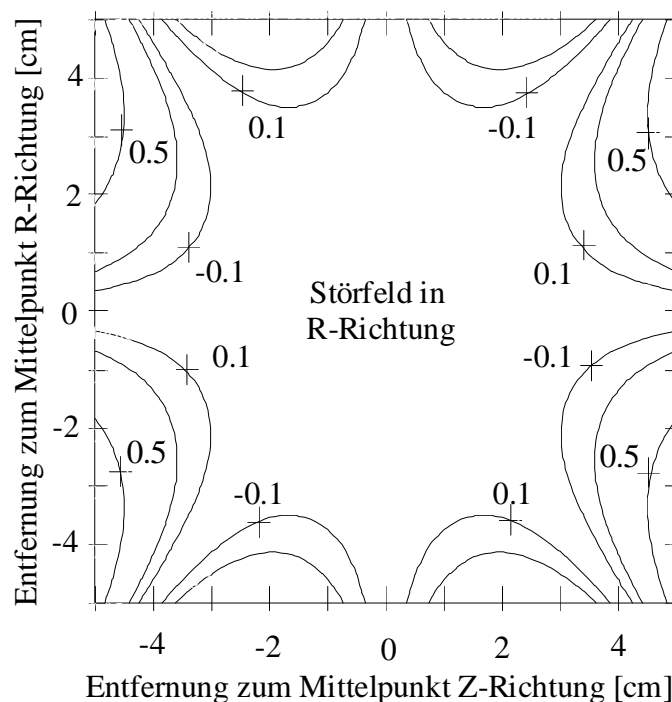


Abb. 4.51: Prozentuale Größe der Störfeldstärke in R-Richtung (Zylinderkoordinaten) bezogen auf H_0

Zur Ansteuerung der Helmholtz-Spule, des Klimaschranks und zur Messung der Sensor- und SONDENSIGNALE wurde eine Tester entworfen und aufgebaut. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise findet sich in /KRZ 96/. Sämtliche Funktionen des Testers sind softwaresteuerbar. Die Meßparameter für die einzelnen Punkte sowie spezielle Befehle werden aus einem Steuerfile sequentiell eingelesen und abgearbeitet. Die Steuerung der Geräte erfolgt mit dem Programmsystem TESTPOINT /TES 95/ über den GPIB-Bus. Abb. 4.52 zeigt das Blockschaltbild des Testers für die Sondenmessung.

Die Verwendung eines Steuerfiles gestattet die Trennung von Testerhard- und Software vom eigentlichen Meßprogramm. Die Pflege der Testerhard- und Software ist damit unabhängig von der Prüfprogrammentwicklung, d.h. dem im Steuerfile abgelegten Meßablauf.

Kern des Meßplatzes ist der Scanner KTH 706, der die flexible Verschaltung der Meßgeräte mit dem Meßobjekt übernimmt. Die Stromquelle PM 2832 und das Helmholtzspulensystem erzeugen die veränderlichen Magnetfelder. Die beiden DMM KTH 199 messen gleichzeitig die SONDENAUSGANGSSPANNUNG U_x und U_y . Mit dem Klimaschrank SB11-160 können veränderliche Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte) simuliert werden. Mit dem HAMEG HM 8142 wird die Versorgungsspannung für die Sonde eingestellt und deren Stromaufnahme gemessen. Der Tester kann mittels einer Softwareerweiterung auch zur Charakterisierung von Sonden auf Waferebene an einem Waferprober mit einer Probecard nach Kapitel 4.4. verwendet werden.

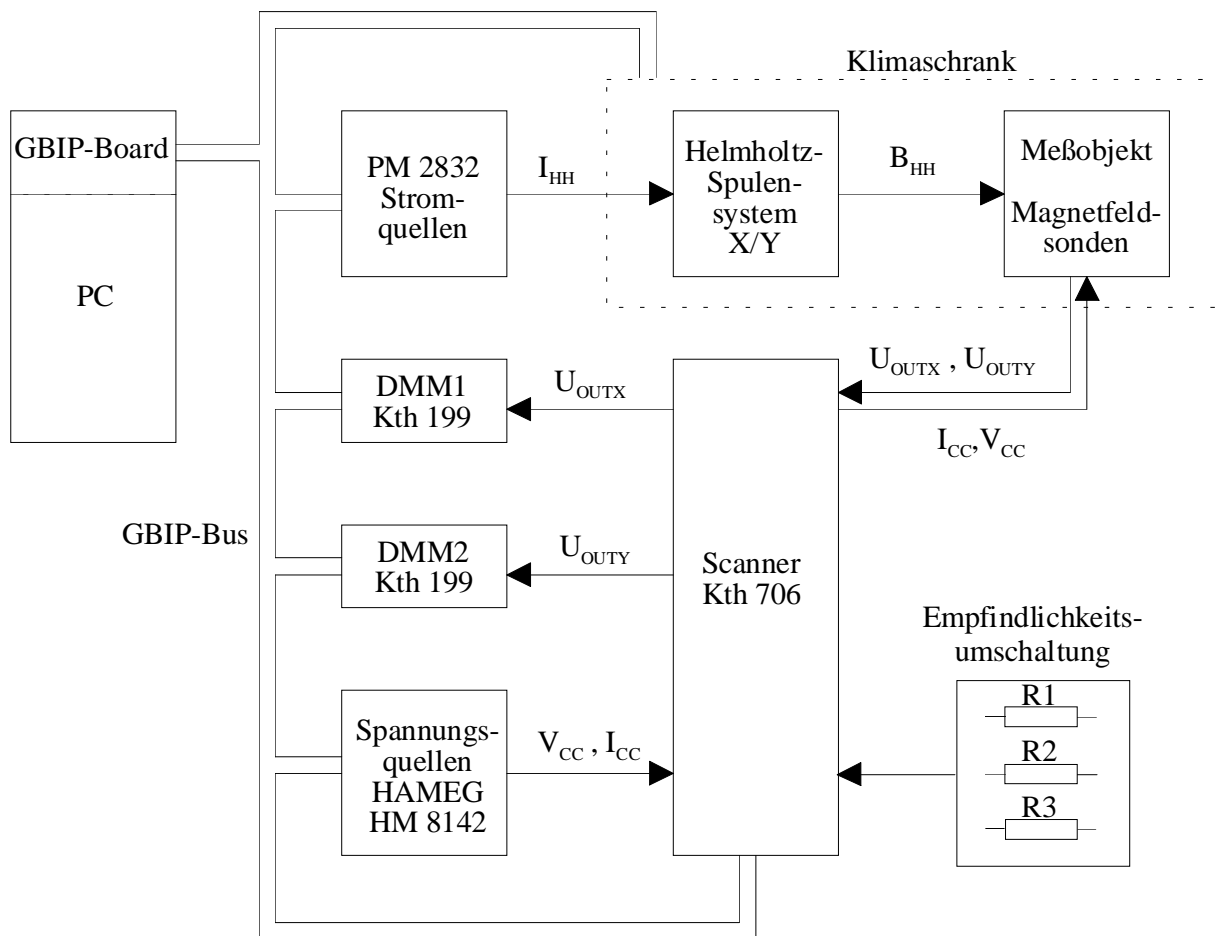


Abb. 4.52: Testerkonfiguration für Sondenmessung

Während der Prototypenentwicklung erfolgte die Messung von jeweils vier Sonden gleichzeitig. Das Meßprogramm umfaßt insgesamt 12 Module. Innerhalb eines solchen Moduls wird jeweils für eine bestimmte Temperatur (-25 °C 105 °C) und Betriebsspannung (4.75V - 5.25V) die Sensorkennlinie mit unterschiedlicher Auflösung (5 A/m, 2.5 A/m) zweimal (zunehmende und abnehmende Felder wegen Hystereseeffekten) gemessen.

Die Meßzeit für vier Sonden liegt, bedingt durch die Regelzeiten des Klimaschranks beim Einstellen der einzelnen Temperaturen, bei 4h 50 min. Die Meßzeit für vier Sonden bei einem Durchlauf des Moduls mit grober Auflösung liegt bei 600 s (je Sonde 150 s), beim Modul mit feiner Auflösung bei 1000 s (je Sonde 250 s). Die Meßergebnisse werden verdichtet in einem Datenblatt dargestellt, das in der Prototypenphase noch recht umfangreich ist. Die Kopie eines Musterexemplars findet sich im Anhang A5.

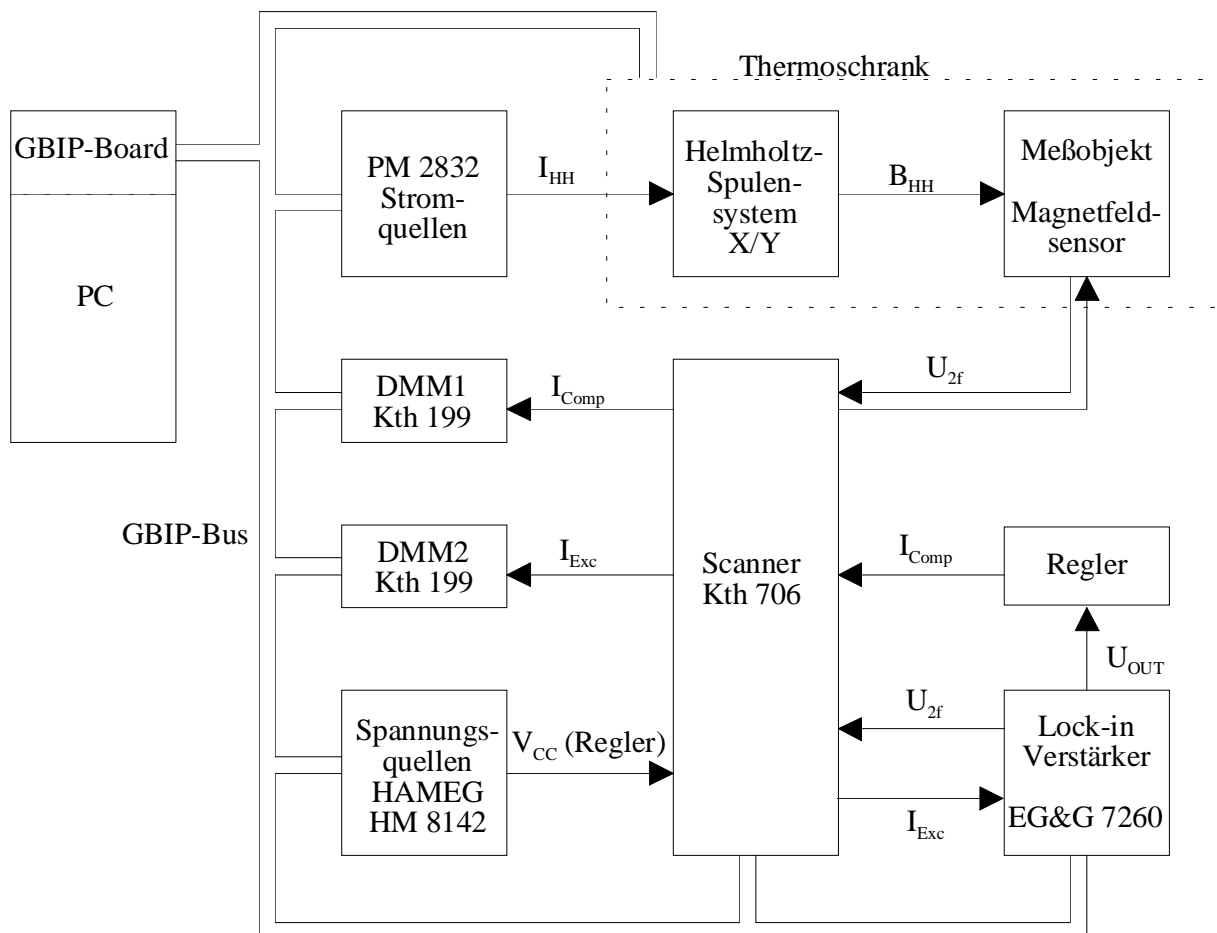


Abb. 4.53: Testerkonfiguration für Sensormessung

Das Blockschaltbild des Testers für die Sensormessung (Abb. 4.53) ähnelt dem für die Sondenmessung. Wesentlicher Unterschied ist hier der Ersatz der Funktionalität des ASIC durch einen DSP-Lock-in Verstärker EG&G 7260 (Versorgung mit I_{Exc} und Demodulation von U_{2f}) mit Integratorbaugruppe (Kompensationsbetrieb). Ein DMM 199 übernimmt jetzt die Messung des Anregungsstromes des zu messenden Sensors. Im Unterschied zur Sondenmessung wird jeweils nur eine Achse (X oder Y) des Sensors gemessen. Die Messung der Sensorausgangsspannung U_{2f} für die Empfindlichkeits- und Arbeitspunktmessungen erfolgt mit dem Lock-in Verstärker. Die Einstellung des I_{Exc} erfolgt mit einem Softwareregler.

Zur Auslegung des Regelkreises für den Kompensationsbetrieb sei auf /KRZ 96/ und /RIE 96/ verwiesen. Die Kontrolle des Einschwingverhaltens des Reglers erfolgt softwaremäßig. Der Kompensationsstrom wird mit dem zweiten DMM 199 gemessen. Nach der Einstellung eines neuen I_{Exc} erfolgt die Einstellung der optimalen Phasenlage des Lock-in Verstärkers mit einem speziellen Programmmodul. Das Meßprogramm realisiert bei der jeweils eingestellten Temperatur (-25°C105 °C) die Messung

der Empfindlichkeitskennlinie für $I_{exc} = 1.41 \text{ mA}, 2.12 \text{ mA}, 2.83 \text{ mA}$

der Arbeitspunktkennlinie für $H_0 = 20 \text{ A/m}$

der Sensorkennlinie (kompensiert) für $I_{exc} = 1.41 \text{ mA}, 2.12 \text{ mA}, 2.83 \text{ mA}$.

Alle Messungen erfolgen bei 20 kHz Anregungsfrequenz. Für die Empfindlichkeitskennlinie wird das Sensorsignal U_{2f} mit dem Lock-in Verstärker in Abhängigkeit vom Feld H_0 252 A/m ... -252 A/m (Schrittweite 5 A/m) gemessen. Zur Messung der Arbeitspunktkennlinie erfolgt die Erfassung von U_{2f} mit dem Lock-in Verstärker in Abhängigkeit von I_{Exc} 0.5 mA 5 mA bei 20 A/m Feld. Um störende Fremdfelder (z.B. Erdmagnetfeld) zu eliminieren wird bei + 20 A/m und -20 A/m gemessen und anschließend gemittelt. Für die Sensorkennlinie wird der Kompensationstrom mit dem DMM 199 als Funktion des Feldes H_0 252 A/m ... -252 A/m ... 252 A/m (Schrittweite 8 A/m) für verschieden I_{Exc} gemessen. Zur optimalen Anpassung an verschiedene Sensorkonfigurationen und Anregungsströme erfolgt vor jeder Messung eine Phaseneinstellung. Im Anhang A4 befindet sich wiederum ein Musterexemplar eines Protokolls dieser Messung. Die folgende Abbildung zeigt den Tester mit der 3-Achsen Helmholtzspule.



Abb. 4.54: Ansicht des Magnetfeldsondentesters mit Helmholtzspule

Bereits in Abschnitt 4.3 wurde mit dem BH-Tracer die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Kenngrößen der Permalloyschicht gemessen. Interessant ist nun, wie sich diese in den Temperaturabhängigkeiten der einzelnen Sensorkenngrößen niederschlägt, die mit diesem Testsystem und dem Klimaschrank gemessen werden können. Abb. 4.55 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit G_0 im nichtkompensierten Betrieb des optimierten trifilaren Sensors FGV11.

Auffällig ist die stärkere Temperaturdrift von $G_{0,x}$ ($\pm 12.5\%$) der leichten Achse gegenüber $G_{0,y}$ ($\pm 3\%$) der schweren Achse und der daraus resultierende große Unterschied der Empfindlichkeit der beiden Achsen zueinander für tiefe Temperaturen.

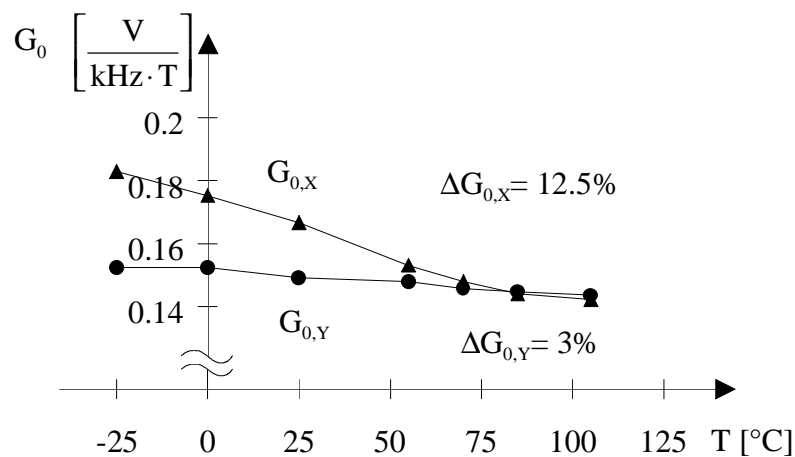


Abb. 4.55: Temperaturabhängigkeit Sensorempfindlichkeit G_0 im nichtkompensierten Betrieb

Entsprechend Abb. 4.56 reduziert sich die Temperaturdrift für den kompensierten Betrieb für K_X ($\pm 0.38\%$) und K_Y ($\pm 0.13\%$) um mehr als eine Größenordnung. Hier kommt neben dem größeren Meßbereich und der verbesserten Linearität ein weiterer Vorteil des kompensierten Sensors, die geringere Parameterabhängigkeit, zum Tragen.

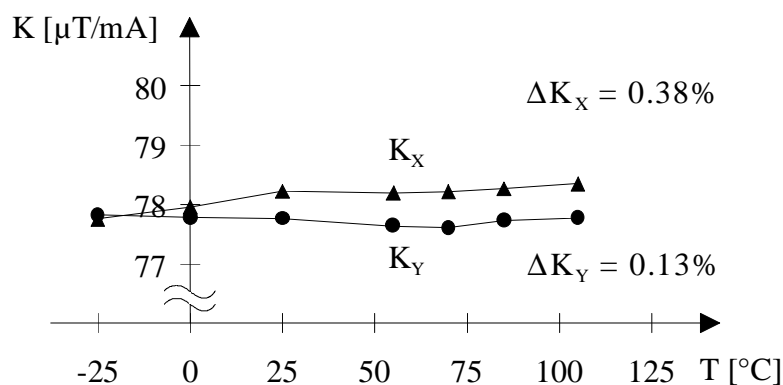


Abb. 4.56: Temperaturabhängigkeit Kompensationsfaktor K

Offensichtlich ist auch im kompensierten Betrieb der Y-Sensor der stabilere, so daß sich hier eine Schere zwischen möglichst geringem Sensorrauschen und geringer Parameterabhängigkeit bei der Einstellung der Vorzugsrichtung der Permalloyschicht ergibt. Dieser Sachverhalt sollte, wie bereits die im Kapitel 3 diskutierte Abhängigkeit der Sensorauflösung von der Vorzugsrichtung der Permalloyschicht, Gegenstand künftiger Arbeiten sein.

Derzeit werden ohne eine definiert eingestellte Vorzugsrichtung der Permalloyschicht allein durch das optimierte Sensordesign Sensoreigenschaften erreicht, bei der nicht mehr der Sensor, sondern der ASIC limitierend für das Gesamtsystem ist. Damit ist das Entwicklungsziel erreicht. Allerdings kann durch eine weitere Optimierung eine bessere Reproduzierbarkeit der Sensorparameter und damit Testvereinfachung und Testzeiteinsparung erreicht werden, andererseits lassen sich mit einem verbesserten Sensor und separater Elektronik weitere Einsatzgebiete erschließen. Außerdem kann bei verbessertem Sensorrauschen der Sensor selbst verkleinert werden. Damit wäre eine Einsparung an Chipfläche und Verlustleistung verbunden, die den Einsatz als Kompaß in Armbanduhren denkbar erscheinen lassen würde.