

Magnetic Field Stabilization, SP 962

Version 1.2 / Juni 2012

1. Hintergrund

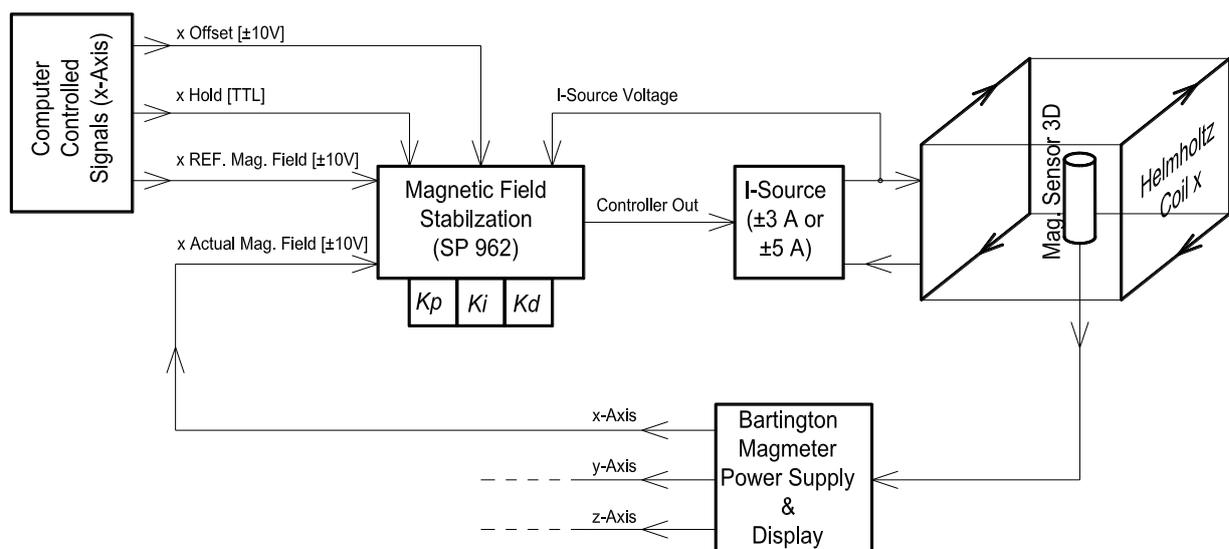
Auftraggeber für diese Regel-Elektronik (*Magnetic Field Stabilization, SP962*) war Andreas Jöckel von der Gruppe von Prof. Treutlein. Für ein neues Experiment soll das Magnetfeld in einer Vakuum-Kammer sehr präzise und schnell geändert werden können. Dies muss in allen drei Raumachsen (x, y, z) möglich sein. Weiter soll das System auch eine gewisse Unterdrückung der stets vorhandenen Wechselmagnetfelder (50 Hz, 150 Hz, ... hervorgerufen durch die 50 Hz Netzfrequenz) bieten.

2. Systembeschreibung

Um das Magnetfeld in allen drei Raumachsen einzustellen, werden drei Helmholtz-Spulenpaare in einem Quader um die Vakuum-Kammer angeordnet. Die Rahmen-Spulen haben eine Abmessung von etwa 700 mm x 700 mm und besitzen je 40...50 Windungen aus lackisoliertem Kupferdraht.

Die gesamte Helmholtz-Induktivität bewegt sich im Bereich von 6...12 mH und der DC-Widerstand variiert von 1.5 Ohm bis 2.5 Ohm. Die typische Zeitkonstante dieser Helmholtz-Spulen beträgt somit etwa 5 ms, was einer Grenzfrequenz von etwa 32 Hz entspricht.

Die Helmholtz-Spulenpaare werden von spannungsgesteuerten Stromquellen (Eigenbau Uni München) versorgt. Es werden zwei verschiedene Modelle mit einem maximalen Ausgangsstrom von ± 3 A bzw. ± 5 A eingesetzt. Damit kann man in allen drei Achsen ein steuerbares Magnetfeld von mindestens $\pm 200 \mu\text{T} = \pm 2$ G erzeugen. Die Eingangsspannung beträgt ± 10 V was dann einen Strom von ± 3 A bzw. ± 5 A entspricht. Die maximale Ausgangsspannung der Stromquellen (U_0) ist im Bereich von etwa ± 12 V.



Figur 1: System-Blockdiagramm: Es sind nur die nötigen Blöcke für eine Achse (x-Achse) gezeigt. Für die beiden andern Achsen (y- und z-Achse) werden jeweils noch je eine weitere Regel-Elektronik (Magnetic Field Stabilization), Stromquelle (I-Source) und Helmholtz-Spulenpaar benötigt.

Möglichst nahe bei der Vakuum-Kammer wird ein dreiachsiger Magnetfeldsensor (Firma Bartington) mit einem Messbereich von $\pm 250 \mu\text{T} = \pm 2.5 \text{ G}$ montiert. Dieser erzeugt für jede Raumachse eine Analogspannung ($\pm 10 \text{ V}$), proportional zum Magnetfeld. Die Bandbreite dieses Sensors mit der nachgeschalteten Elektronik beträgt knapp 3 kHz .

Die Regel-Elektronik (*Magnetic Field Stabilization*) wird zwischen den Ausgang des Magnetfeldsensors (*Actual Mag. Field*) und dem Eingang der Stromquelle eingebaut. Jede Achse benötigt ihre eigene Regel-Elektronik und somit sind für das gesamte 3D-System drei *Magnetic Field Stabilization* Module nötig. Der Sollwert (*REF. Mag. Field*) wird von einem Computer gesteuerten Analog-Ausgangsmodul auf die Regel-Elektronik gegeben. Weiter werden vom Computer aus auch das Offset-Signal (wenn gewünscht) und das digitale (TTL) Hold-Signal erzeugt.

Ist das Hold-Signal aktiv (high), so wird die letzte Ausgangsspannung am Ausgang (*Controller Out*) der Regel-Elektronik gehalten. Die typische Ausgangs-Spannungsänderung beträgt im Hold-Zustand etwa -5 mV/s , was -0.05% pro Sekunde entspricht (bezogen auf ein 10 V Normsignal).

Werden diese beiden Signale (Offset, Hold) nicht benötigt, so können die Eingänge offen gelassen werden.

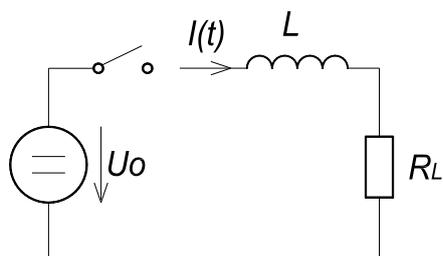
Die Ausgangsspannung der Stromquelle (*I-Source Voltage*) wird auch auf die Regel-Elektronik zurückgeführt und dient zur Umschaltung des Reglers zwischen PID- und PD-Charakteristik. Wenn der Betrag der Stromquellenspannung einen einstellbaren Schwellwert (*PD-Threshold-Voltage*) überschreitet, so wird der Integral-Anteil des PID-Reglers ausgeschaltet. Damit erreicht man bei grossen Feldänderungen ein schnelleres Einschwingen auf den neuen Referenzwert. Dies auch bei PID-Parametern, welche optimal für kleine Feldänderungen (AC-Magnetfeldunterdrückung) sind.

3. Regel-Elektronik (*Magnetic Field Stabilization*)

Die Regel-Elektronik (*Magnetic Field Stabilization*) besteht im Wesentlichen aus einem einstellbaren PID-Regler mit abschaltbarem I-Anteil gefolgt von einer Track&Hold-Stufe.

Wenn die Ausgangsspannung der Stromquelle am positiven oder negativen Spannungs-Anschlag (U_0) steht, wird der I-Anteil des PID-Reglers ausgeschaltet. Während dieser Zeit ist das System nicht-linear, denn die Eingangsspannung an der Stromquelle (= Ausgang des PID-Reglers) hat keinen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Stromanstieges $I(t)$ und somit auch nicht auf das Magnetfeld. Wenn man die induzierten Wirbelströme (welche in den metallischen Gegenständen zu fließen beginnen) vernachlässigt, so ist das Magnetfeld direkt proportional zum Spulenstrom $I(t)$.

Der Verlauf des Stromanstieges ist dann nur von den folgenden drei Systemparametern abhängig: Helmholtz-Induktivität (L), Spulenwiderstand (R_L) und maximale Ausgangsspannung der Stromquelle (U_0). Während dieser Phase gilt:

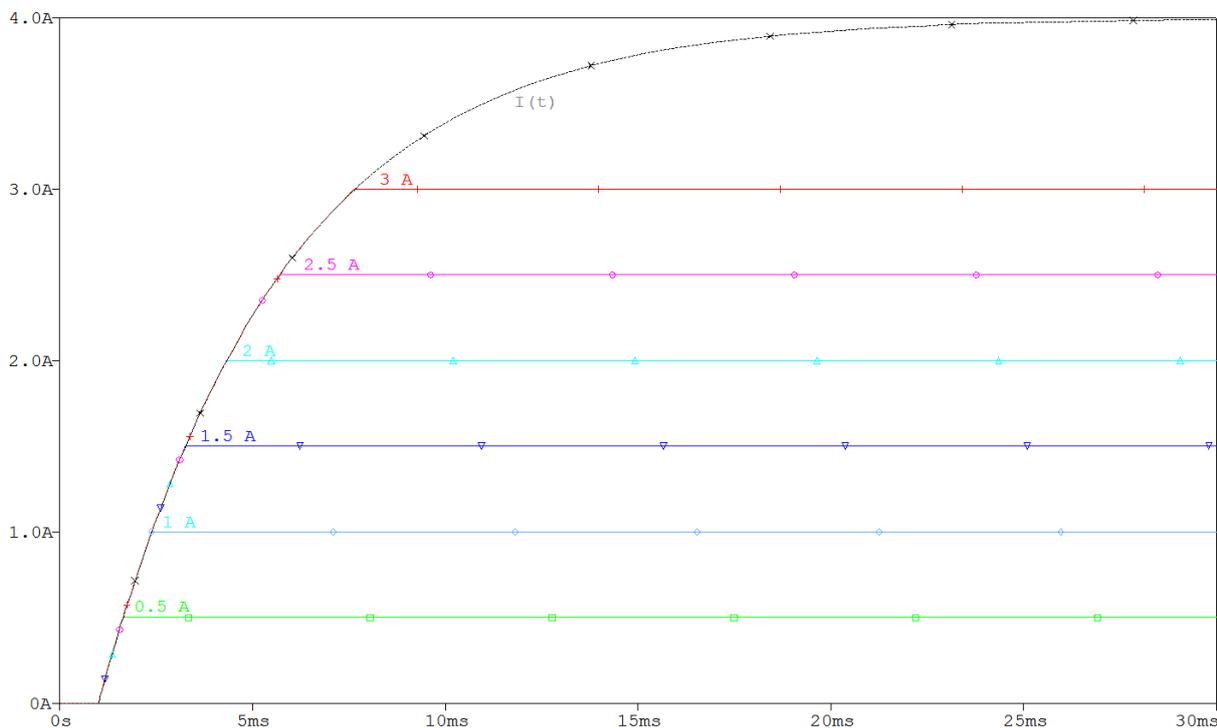


$$U_0(t) = I(t) \cdot R_L + L \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

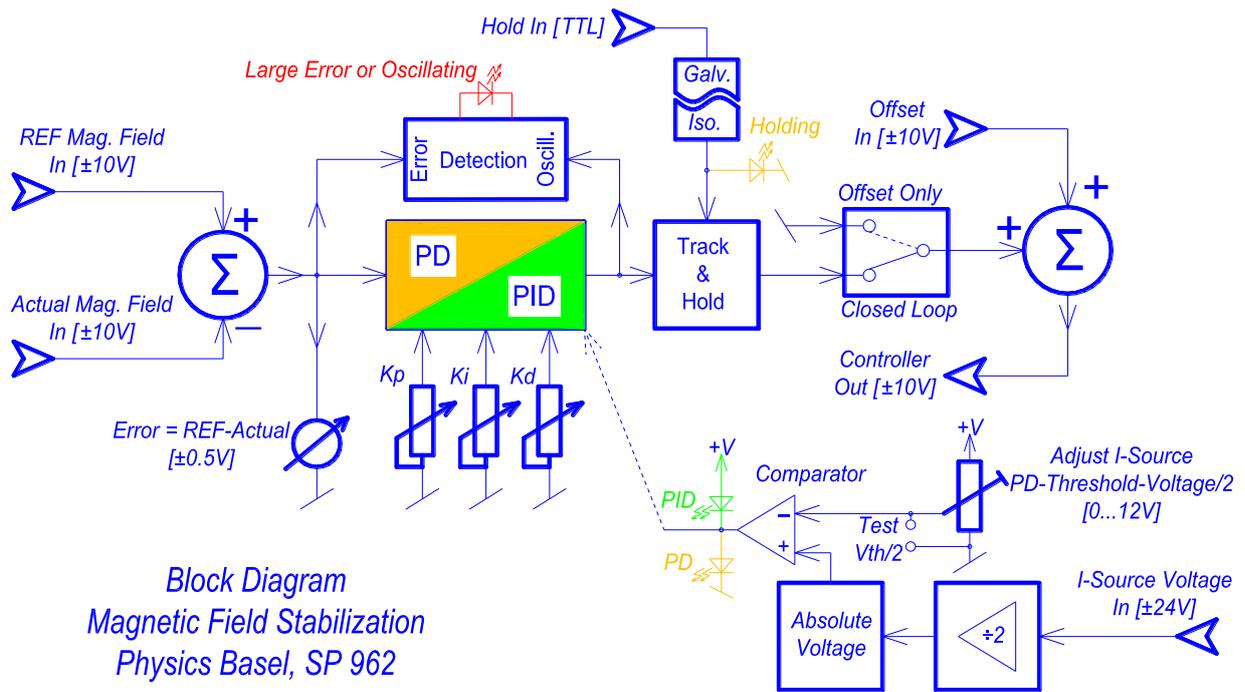
Die Sprungantwort dieser obigen DGL ist:

$$I(t) = \frac{U_0}{R_L} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \text{ mit } \tau = \frac{L}{R_L}$$

Setzt man die Parameter $L = 12 \text{ mH}$, $R_L = 2.5 \text{ Ohm}$ und $U_0 = 10 \text{ V}$ ein, so erhält man den folgenden Stromanstieg $I(t)$ durch die Helmholtz-Spule, wenn die Spannung bei $t = 1 \text{ ms}$ eingeschaltet wird:



In der obigen Abbildung ist der Anstieg des Spulenstromes in Funktion der Zeit aufgezeigt; und als Parameter ist der gewünschte Sollstrom aufgetragen. Grau gestrichelt ist die reine Exponentialfunktion des Stromanstieges ohne Begrenzung durch die Stromquelle gezeigt. Der maximale End-Strom von 4 A wird erst nach etwa 30 ms erreicht. Weiter erkennt man, dass kleine Stromanstiege fast linear verlaufen und das Abknicken erst bei grösseren Stromanstiegen gut zu erkennen ist. Dadurch ist die Anstiegszeit nicht proportional zum gewünschten Sollstrom: So dauert ein 50% Stromanstieg (0 auf 1.5 A) etwa 2.3 ms und ein 100%-Anstieg (0 auf 3 A) schon etwa 6.7 ms. Im Vergleich dazu, würde bei einer reinen Induktivität von 12 mH (ohne Serienwiderstand) und einer Quellen-Spannung von 10 V der Strom mit einer festen Steilheit von 833 A/s ansteigen; d.h. ein Stromanstieg von 0 auf 3 A würde nur 3.6 ms dauern.



Figur 2: Blockdiagramm der „Magnetic Field Stabilization“. Um Erdschleifen (Ground-Loops) zu vermeiden, sind alle analogen Eingänge über differenzielle Empfänger an die Elektronik angeschlossen. Der digitale Hold-Eingang ist zur Störvermeidung über einen Optokoppler galvanisch von der Regel-Elektronik getrennt. Der Ausgang des Reglers (Controller Out) ist auf das Gehäuse und 0V (GND) der Elektronik bezogen.

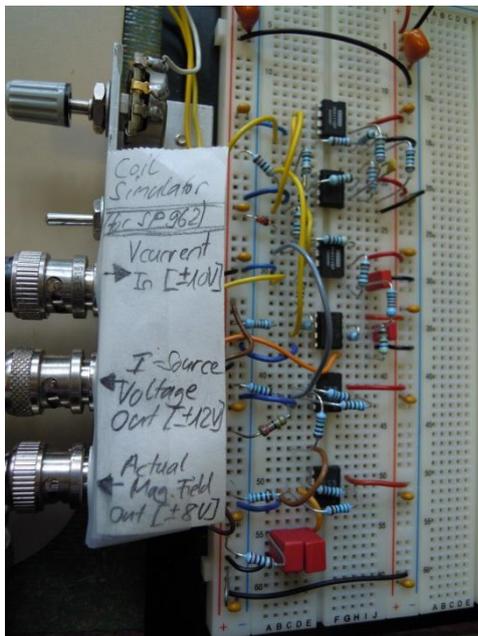
Erreicht die Stromquelle den gewünschten Sollstrom (wo die Kurve horizontal wird), so reduziert diese sofort ihre Ausgangsspannung. Dieses Absinken der Ausgangsspannung signalisiert, dass die Stromquelle den Sollstrom erreicht hat und sich das System wieder dem linearen Kleinsignalbereich nähert. Zu diesem Zeitpunkt kann der I-Anteil des Reglers wieder aktiviert werden. Wäre der I-Anteil stets aktiv, würde dies zu einem erheblichen Überschwingen und damit zu einer deutlich längeren Wartezeit führen, bis das Magnetfeld auf den korrekten Sollwert eingeschwingen ist. Dies ist speziell der Fall, wenn die PID-Regel-Parameter für eine optimale Kleinsignal-AC-Magnetfeldunterdrückung eingestellt werden.



Foto 1, 2: Links ist die Frontplatte und rechts die Rückseite der „Magnetic Field Stabilization“ Box zu sehen. Ein Analog-Indikator zeigt den Fehler (Error) zwischen Sollwert (REF) und Istwert (Actual) in einem Bereich von ± 0.5 V. Die Regel-Charakteristik (PID=grün oder PD=gelb) wird mit zwei LEDs dargestellt. Besteht eine Regelabweichung von mehr als etwa ± 200 mV oder schwingt das System, so wird die rote LED (Large Error or Oscillating) aktiviert. Der Status des Hold-Eingangs wird auch mittels einer gelben LED auf der Frontplatte visualisiert. Die Regel-Elektronik benötigt eine rippelarme ± 15 V Spannungsversorgung und hat eine maximale Leistungsaufnahme von etwa 2.1 W (+15 V @80 mA, -15 V @60mA). Die Spannungsversorgung kann z.B. direkt von unserem Stecker-Netzteil „ ± 15 V Floating Supply“ (SP 874) erfolgen.

Es können Stromquellen mit verschiedenen Maximal-Ausgangsspannungen (bis ± 24 V) an die Regel-Elektronik angeschlossen werden, denn die Schaltspannung (*PD-Threshold Voltage*) kann mit einem Trimm-Potentiometer auf der Geräterückseite von 0 bis 24 V eingestellt werden.

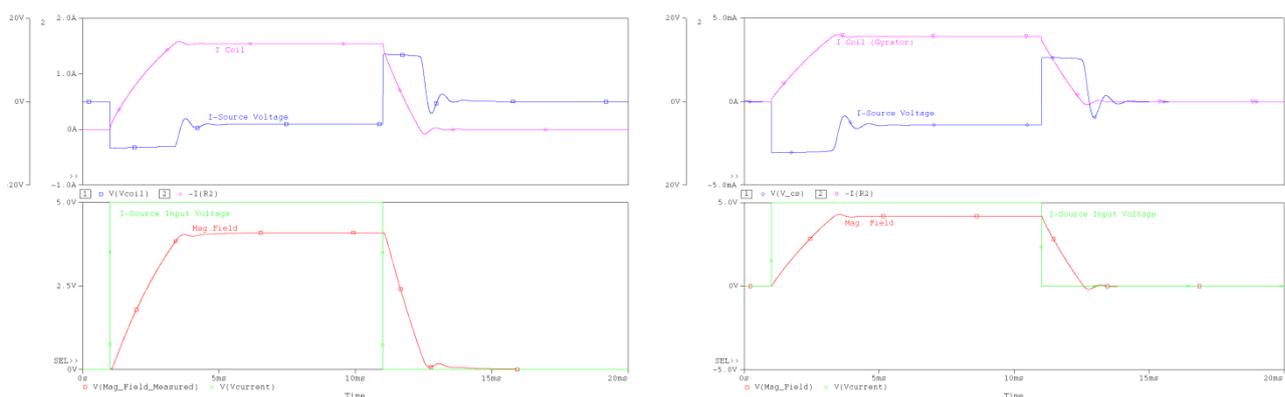
Die Parameter K_p , $1/K_i$ und K_d können mittels Potentiometer auf der Frontplatte über einen Bereich von mindestens 1:10 eingestellt werden. Im Geräteinnern lassen sich diese Bereiche auch noch weiter anpassen und die Beschriftung des Skalierungsfaktors auf der Frontplatte (unterhalb der Knöpfe) kann mit einem Beschriftungsgerät (P-touch) einfach geändert werden. Beim Prototyp lässt sich der Proportional-Anteil (K_p) in einem Bereich von 0 bis 10 variieren (Skalierung $\times 1$). Der Integral-Anteil ($1/K_i = T_n/K_p$) kann im Bereich von 50 μ s bis 550 μ s eingestellt werden (Skalierung $\times 50$ μ s) und auch der Differential-Anteil ($K_d = T_v * K_p$) lässt sich im Bereich von 50 μ s bis 550 μ s ändern (Skalierung $\times 50$ μ s).



Um die Regel-Elektronik auch ohne die schweren Stromquellen und grossen Helmholtz-Spulen zu testen, wurde ein *Coil-Simulator* entwickelt und gebaut. Dieser besteht aus einer Stromquelle, welche ähnlich wie das Original aufgebaut ist, aber einen viel kleineren Ausgangsstrom von nur ± 7.5 mA hat (anstelle der ± 3 A bzw. ± 5 A). Bedingt durch den viel kleineren Strom, muss dann die Induktivität und deren Serienwiderstand entsprechend vergrössert werden, um gleiches Zeitverhalten wie beim realen Spulen-System zu bekommen. Diese grosse Induktivität (2.4 H) wird mit Hilfe einer elektronischen Gyrator-Schaltung (Transformation C zu L) nachgebildet.

Foto 3: Der Coil-Simulator ist auf einem Steckbrett aufgebaut und bildet das reale System Stromquelle \rightarrow Helmholtz-Spule \rightarrow Magnetfeld-Sensor nach. Unten links sind die beiden parallelgeschalteten roten Folien-Kondensatoren zu sehen, welche mit der Gyrator-Schaltung in eine entsprechend grosse Induktivität transformiert werden.

Vor dem Bau der *Magnetic Field Stabilization* wurden detaillierte PSpice-Simulationen vorgenommen. Dazu wurde auch ein praxistaugliches Modell der Helmholtz-Spule entwickelt. Dies beinhaltet eine zusätzliche Dämpfung, hervorgerufen durch die induzierten Wirbelströme in den metallischen Teilen. Auch der *Coil-Simulator* wurde mit PSpice-Simulationen vorab getestet und optimiert.



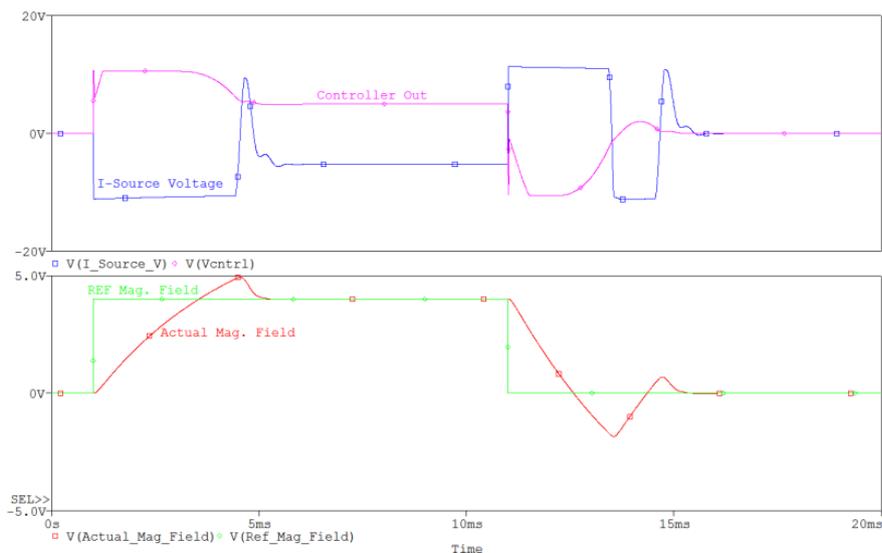
Simulation 1,2: Hier sind die Ergebnisse von zwei PSpice-Zeit-Simulationen des „Controlled Systems“, bestehend aus Stromquelle \rightarrow Helmholtz-Spule \rightarrow Magnetfeld-Sensor, gezeigt. Am Eingang der Stromquelle wird ein 10 ms Impuls von 50% simuliert; d.h. von 0 auf 1.5 A (im realen System) und danach wieder zurück auf null. Das Magnetfeld (Mag. Field), die Ausgangsspannung der Stromquelle (I-Source Voltage) und der Spulenstrom (I Coil) sind dargestellt. Die linke Seite zeigt die Signale mit dem Helmholtz-Spulenmodell (mit Wirbelströmen) und rechts sind die identischen Signale gezeigt, welche mit Hilfe des „Coil-Simulators“ (ohne Wirbelströme) simuliert wurden. Bei der steigenden Flanke dauert es bei beiden Systemen etwa 2.4 ms bis die Stromquelle die Ausgangsspannung zu reduzieren beginnt; dies deckt sich gut mit den voraus gegangen Abschätzungen. Die fallende Flanke ist etwas schneller, da der Spannungssprung, wegen der schon vorhandenen Ausgangsspannung, deutlich grösser ist.

Unten sind zwei PSpice-Simulationsergebnisse für das zeitliche Verhalten der y-Achse ($L = 12 \text{ mH}$, $R_L = 2.5 \text{ Ohm}$, Stromquelle $\pm 3 \text{ A}$) bei geschlossenem Regelkreis (*Closed-Loop*) gezeigt. Dabei wurde das Helmholtz-Spulenmodell mit der Wirbelstrom-Dämpfung verwendet.

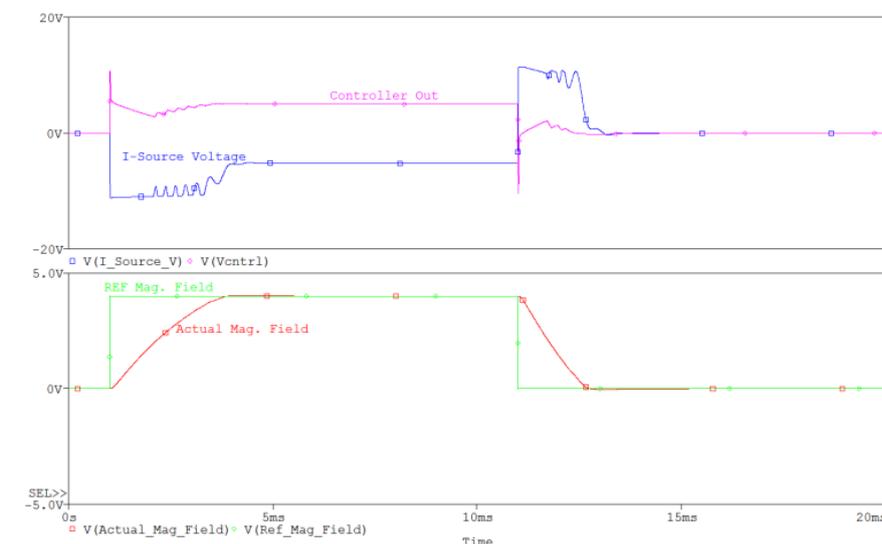
Im oberen Zeitdiagramm ist jeweils die Ausgangsspannung der Regel-Elektronik (*Controller Out*) sowie die Ausgangsspannung der Stromquelle (*I-Source Voltage*) gezeigt. Im unteren Graphen sieht man jeweils das Einschwingverhalten des Magnetfeldes (*Actual Mag. Field*) zusammen mit dem Sollwert (*REF Mag. Field*). Der Sollwert ist ein 10 ms Impuls mit einer Amplitude von 4 V. Weil die Verstärkung der Regel-Strecke (K_S) den Wert von 1.25 hat, entspricht dieser Sollwert-Sprung einem Strom-Sprung von 50% (0 auf 1.5 A \rightarrow 0 auf 100 μT).

Beide Simulationen sind mit den folgenden PID-Regel-Parametern durchgeführt:

$$\begin{aligned} K_p &= 1.25 \\ I/K_i &= 136 \mu\text{s} \\ K_d &= 212 \mu\text{s} \end{aligned}$$



Simulation 3: Hier ist der PID-Regler dauerhaft mit allen Anteilen eingeschaltet. Durch die Nichtlinearität während der Spannungssättigung der Stromquelle kommt es zu einem starkem Über- und Unterschwingen des Magnetfeldes. Bei der steigenden Flanke muss man etwa 4.3 ms auf ein stabiles Magnetfeld warten und bei der fallenden Flanke ganze 4.5 ms.



Simulation 4: Bei dieser Simulation wird der I-Anteil ausgeschaltet, wenn die Ausgangsspannung der Stromquelle den Betrag von 10 V überschreitet. Damit wird ein Übersteuern des Magnetfeldes effizient verhindert. Bei der steigenden Flanke zeigt diese Simulation nach knappen 3 ms ein stabiles Magnetfeld. Bei der fallenden Flanke dauert es nur etwa 2 ms bis das Feld wieder auf null ist.

Die PSpice Simulationen und die realen Messungen zeigen, sowohl mit dem *Coil-Simulator* wie auch mit den wirklichen Stromquellen und Helmholtz-Spulen, eine recht gute Übereinstimmung.