

F1E Steuerungssystem mit elektronischem Kompass CMPS03

Claudio Bognolo

Michele Del Fabro

Übersetzt aus dem Englischen von Peter Brocks

Zusammenfassung

Diese Abhandlung zeigt, wie ein F1E Modell wirksam mit einem Zwei-Achsen Kompass gesteuert werden kann. In diesem Fall handelt es sich um ein Kompassmodul Devantech CMPS03, das zwei Magnetfeldsensoren KMZ51 von Philips Semiconductors verwendet.

Zuerst wird eine Einführung in die Merkmale des Magnetfeldes der Erde gegeben. Dann wird beschrieben, wie der Kompass seine Hauptaufgabe löst, nämlich das Messen des Azimutwinkels, dem Horizontalwinkels zwischen Nord und der angestrebten Richtung.

Eine wirksame Verwendung des CMPS03 in einem F1E Modell wird dann gezeigt. Im Einzelnen, wie auf eine besondere Weise die Bewegung um die Längs- und Querachse gesteuert werden kann, obwohl der Kompass nur in zwei Achsen regelt. Eine offensichtliche „Schwäche“, das Fehlen einer dritten Achse, wird ein Vorteil durch einen wirksamen Ausgleich bei Kippen des Modells.

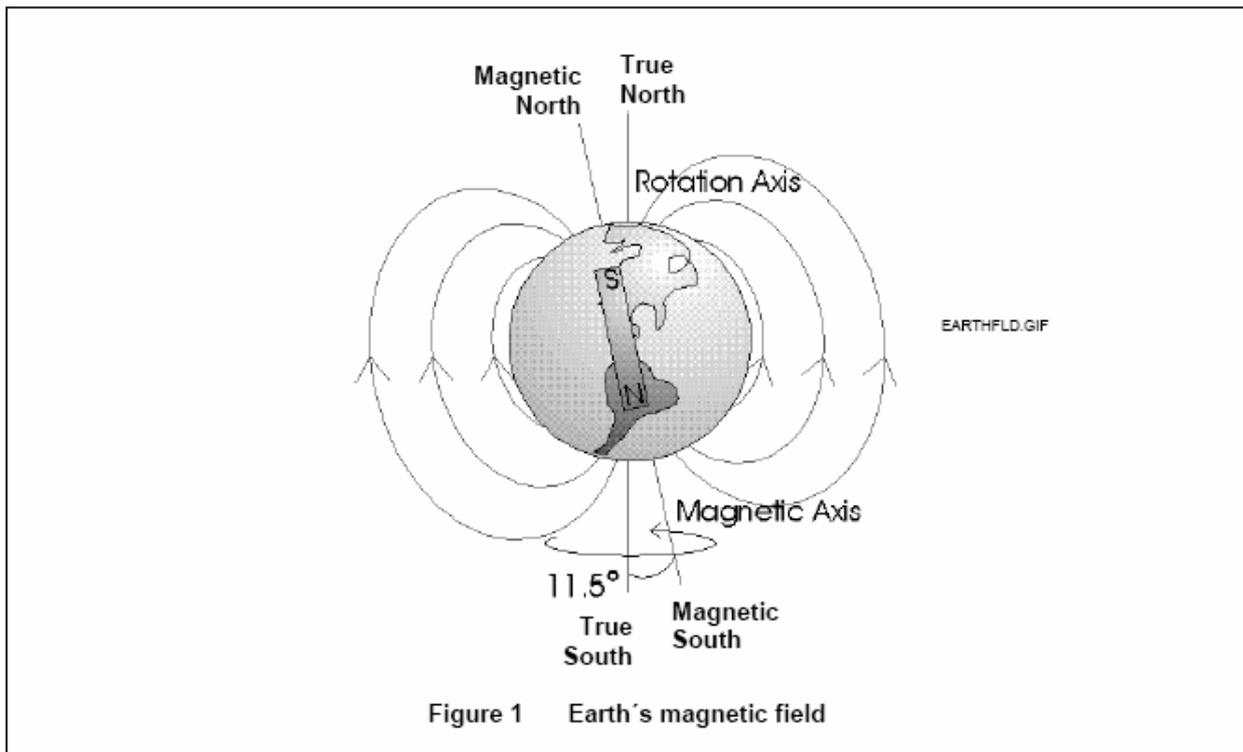
Diese Abhandlung beschreibt auch den PWM (pulse width modulation – Impulsbreitenumodulation) Ausgang des Kompasses und die Methode das Kippen mathematische auszugleichen durch ein elektronisches Mehrachsensystem (electronic gimbaling) unter Verwendung eines dritten Magnetfeldsensors und eines Längs- und Querachsensensors.

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
1. Erdmagnetfeld.....	2
2. CMPS03 – robotisches Kompassmodul.....	5
3. CMPS03 in einem F1E Modell.....	6
4. CMPS03 und das Kippen.....	8
5. Die „x-y-Rose“.....	11
Anhang 1 – CMPS03 PWM Ausgang.....	14
Anhang 2 – Elektronisches Mehrachsensystem.....	15
Quellenangabe.....	16

1. Erdmagnetfeld

Das magnetische Feld der Erde ist die physikalische Kraft die einen Kompasses beeinflusst. Fig. 1 zeigt eine Abbildung der Form des Feldes



Die Stärke des Magnetfelds auf der Erde verändert sich mit der Lage und hat einen Bereich von 20-50 A/m (Ampere/Meter) oder 30-60 Nanotesla.

Ein Verständnis des Feldes der Erde erhält man, wenn man annimmt, dass es von einem Magnetstab im Innern der Erde erzeugt wird, wie ersichtlich aus Fig. 1. Die magnetischen Feldlinien zeigen vom Südpol der Erde zu seinem Nordpol. Wie gezeigt in Fig. 1 ist dies umgekehrt zu der Praxis für die Pole eines Magnetstabs. Dieses beruht auf der geschichtlichen Festlegung, dass der Pol eines Magnetstabs, der nach Norden zeigt, Nordpol benannt wurde.

Die Feldlinien sind rechtwinklig zur Erdoberfläche an den Polen und parallel am Äquator. Deshalb zeigt das Erdmagnetfeld in der nördlichen Hemisphäre nach unten und in der südlichen nach oben. Ausserdem stimmen die magnetischen Pole nicht mit den geografischen überein. Diese sind durch Drehachse der Erde festgelegt. Der Winkel zwischen der Magnetachse und der Drehachse ist etwa 11,5°. Deshalb zeigen die Magnetfeldlinien nicht genau zum geografischen oder „wirklichen“ Norden. Dieses hat natürlich keinen Einfluss auf den Flug unseres F1E Modells.

Fig. 2 gibt eine dreidimensionale Darstellung des Erdfeld-Vektors \mathbf{H}_e an einem Punkt auf der Erde. Diese Abbildung erlaubt die Bestimmung der Kräfte, die für den Kompass wichtig sind. Hier sind die x- und y-Achsen parallel zur Erdoberfläche, während die z-Koordinate im rechten Winkel nach unten zeigt.

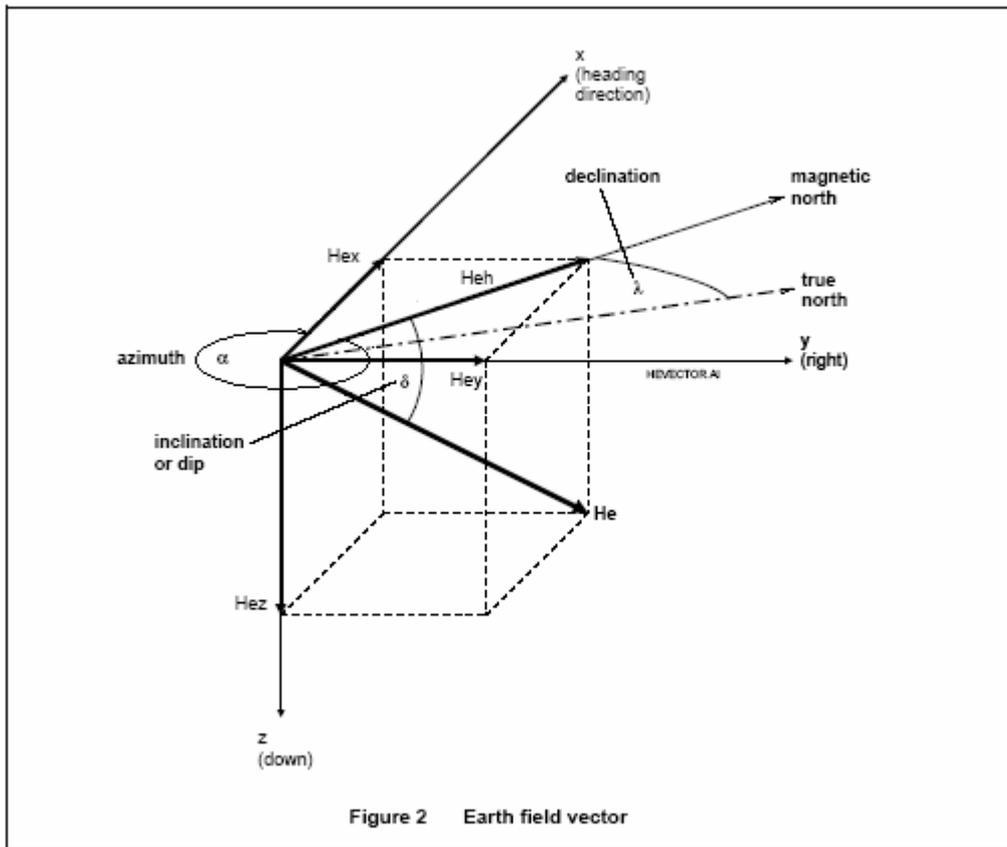


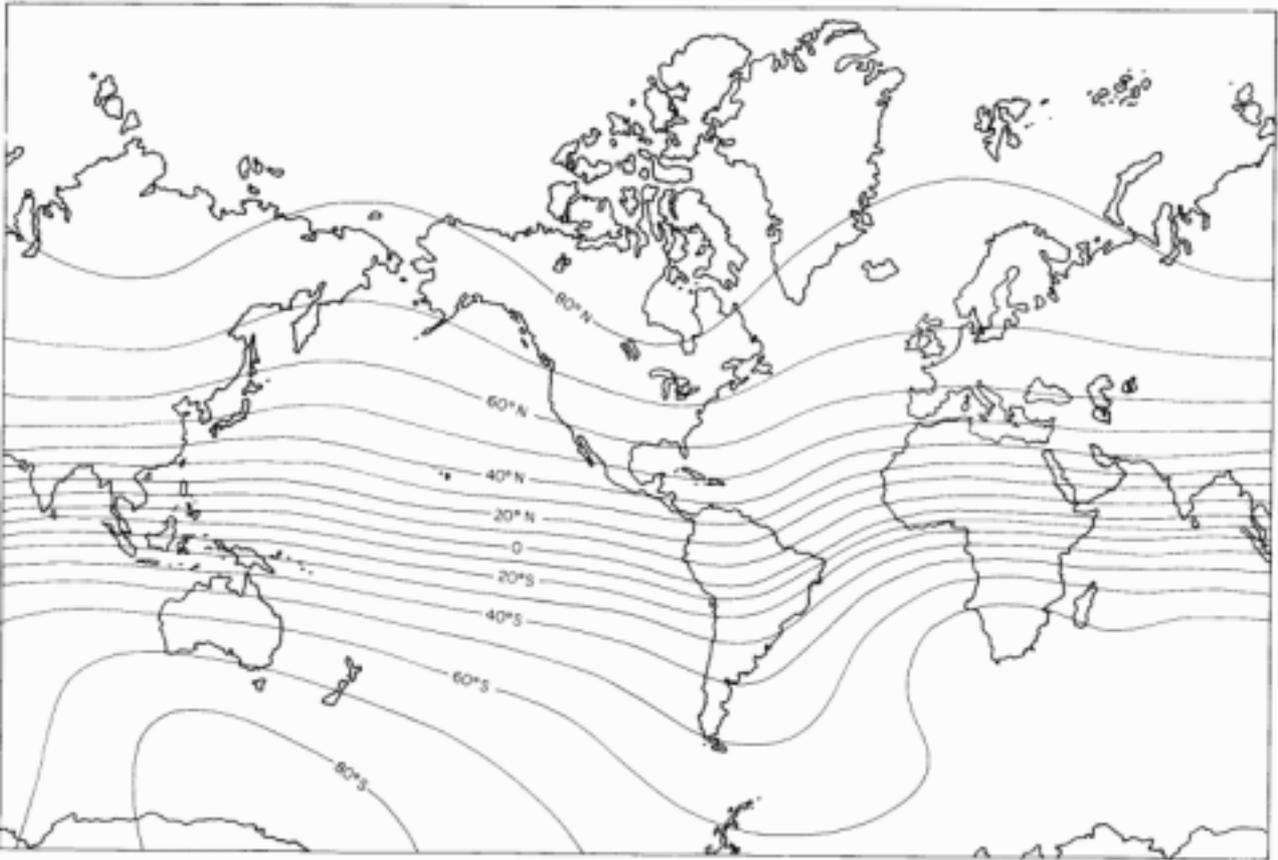
Figure 2 Earth field vector

- **Azimutwinkel α** : der Winkel zwischen dem magnetischen Norden und der angestrebten Richtung. Der magnetische Norden ist in Richtung **Heh**, die Erdfeldkomponente, die rechtwinklig zur Erdanziehung ist. In dieser Abhandlung ist **Heh** immer die „horizontale“ Komponente des Erdfelds. Fig. 2 zeigt, dass:

$$\alpha = \arctan \frac{Hey}{Hex} \quad (1)$$

Der Azimutwinkel ist die abgelesene Grösse eines Kompasses. In dieser Abhandlung ist **α immer im Uhrzeigersinn vom magnetischen Norden gerechnet.**, z. B. ist Nord 360° oder 0°, Ost 90°, Süd 180° und West 270°.

- **Neigungs- oder Kippwinkel δ** : der Winkel zwischen dem Erdfeldvektor und der Horizontalen. Der Neigungswinkel verändert sich mit dem Standort auf der Erde. Er ist 0° am Äquator und nähert sich $\pm 90^\circ$ in der Nähe der Pole (Fig.3).



Main magnetic field inclination (solid contours) on the surface of the earth expressed in degree units. (Modified from "Magnetic Inclination or Dip," Epoch 1975.0, chart published by Defense Mapping Agency Hydrographic Center, Washington, D.C.)

Fig. 3

In unserem Breitengrad ist der Neigungswinkel etwa 67° . Deshalb ist H_e etwa 40 A/m , wir haben dann:

$$H_{eh} = H_e \cdot \cos\delta = 40 \cdot 0,391 = \sim 16 \text{ A/m}$$

$$H_{ez} = H_e \cdot \sin\delta = 40 \cdot 0,92 = \sim 37 \text{ A/m}$$

H_{ez} ist 2,3 mal H_{eh} . Wenn der Kompass gekippt ist, muss der Neigungswinkel berücksichtigt werden.

- **Abweichwinkel λ** : der Winkel zwischen dem geografischen oder wirklichen Norden und dem magnetischen Norden. Dieser spielt fuer das F1E Fliegen keine Rolle.

2. CMPS03 – robotisches Kompassmodul

Das CMPS03 robotische Kompassmodul wurde speziell als Hilfe zur Steuerung von Robotern konzipiert. Das Ziel war, eine unverwechselbare Zahl zu finden, die die Richtung darstellt, in die der Roboter ausgerichtet ist. Der Kompass verwendet den Magnetfeldsensor KMZ51, der empfindlich genug ist, das Erdmagnetfeld anzuzeigen. Der Ausgang von zwei dieser Sensoren, die im rechten Winkel zueinander montiert sind, wird verwendet, um die Richtung der horizontalen Komponente des Erdmagnetfelds nach der Gleichung (1) auszurechnen.

Für Einzelheiten des PWM Signals siehe Anhang 1.

Die Ausrichtung des Kompassmoduls für eine 0° Richtung

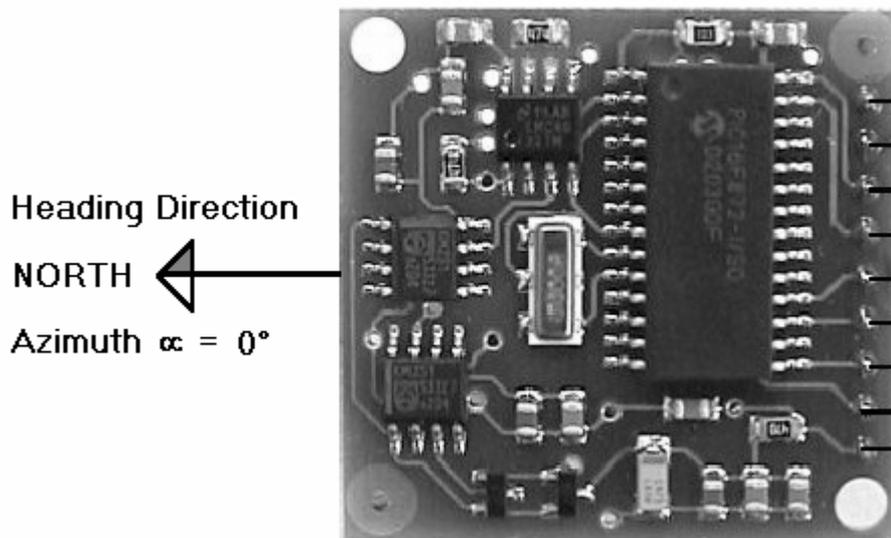


Fig. 4

Bezugnehmend auf das kartesische System in Fig. 2 ist die Längsachse des Modells die x-Achse und die Querachse die y-Achse (Fig. 5)

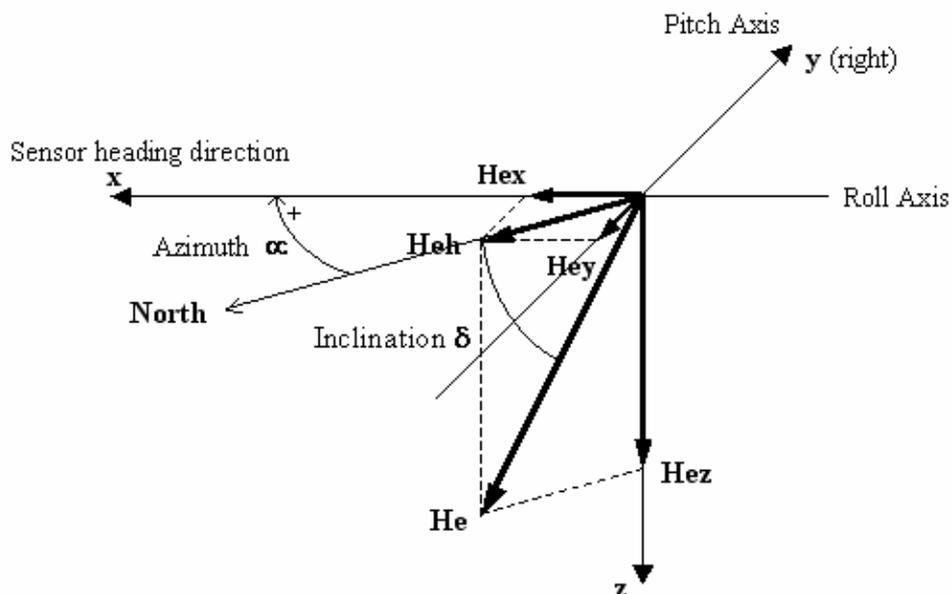


Fig. 5

3. CMPS03 in einem F1E Modell

Lasst uns nun das Kompassmodul CMPS03 in ein F1E Modell einbauen. Das Modul ist in die Flugrichtung bzw. Längsrichtung ausgerichtet. Nachdem die Flugrichtung (z. B. Nordost) gewählt und deshalb der Rumpfkopf in diese Richtung gedreht wurde, wird das System eingeschaltet.

Die zwei Philips KMZ51 Sensoren, um 90° zueinander eingebaut, zeigen nun die x- und die y-Komponente des Erdmagnetfelds an.

Die Signal-Verarbeitungseinheit (Signal Conditioning Unit SCU) ersetzt diese Werte mit einer Ausgangsspannung V_x und V_y , die entsprechend kalibriert sind.

Die Richtungs-Bestimmungseinheit (Direction Determination Unit DDU) berechnet den Azimutwinkel nach Gleichung (1).

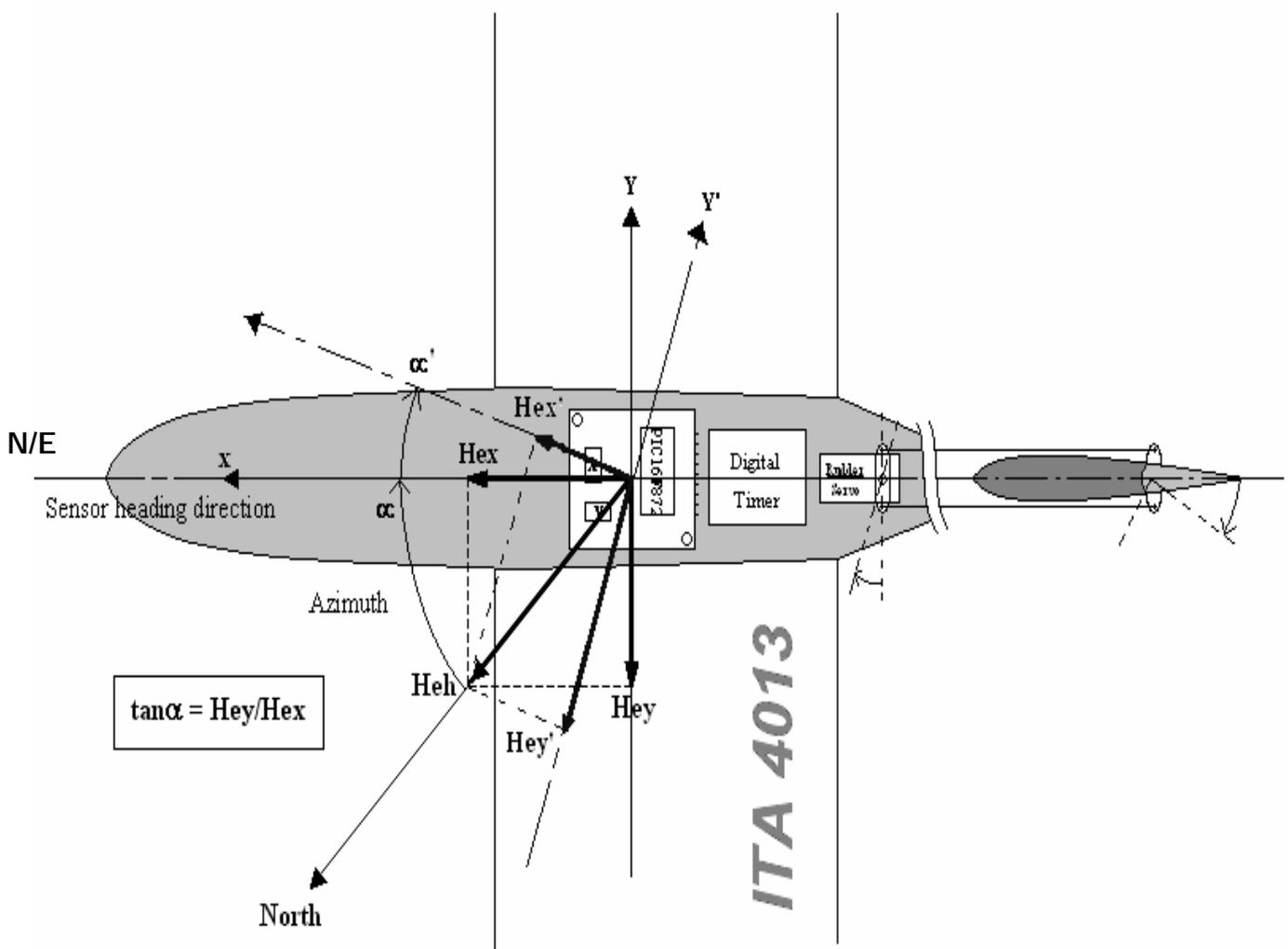


Fig. 6

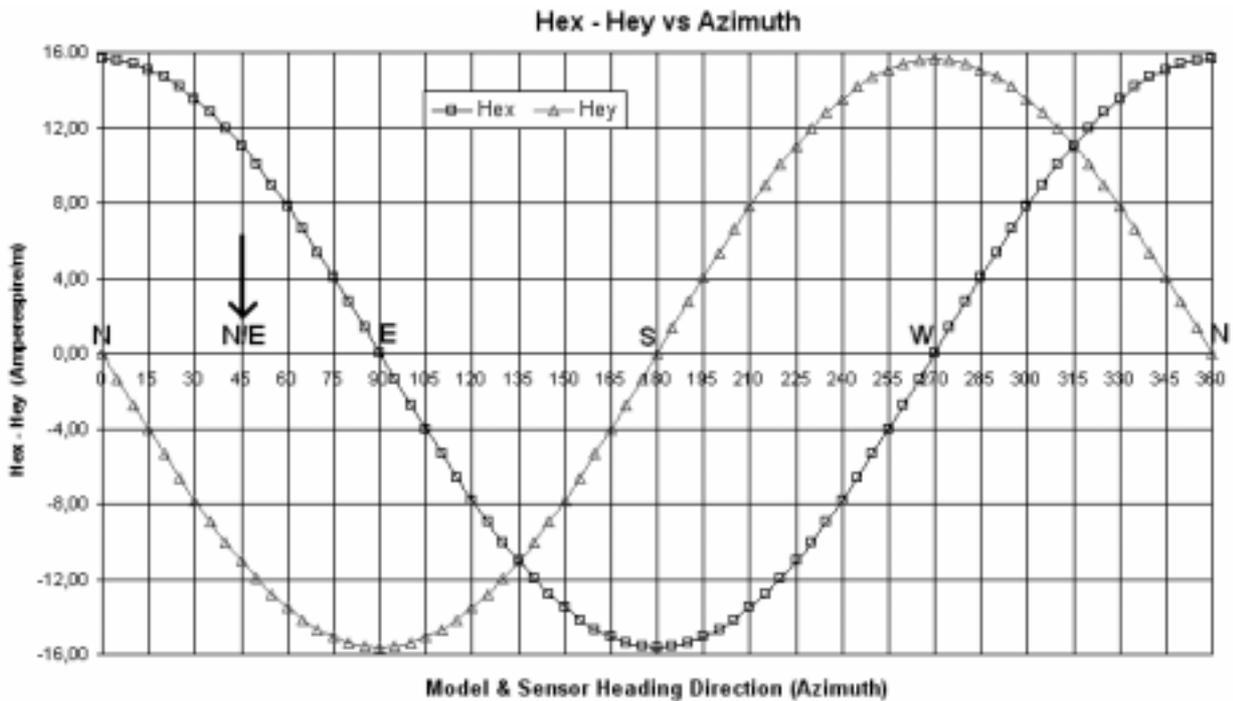


Fig. 7

Wenn das System eingeschaltet ist, wird das PWM Signal, das den Azimutwinkel darstellt, ausgerechnet und ist am Anschluss 4 des CMPS03 verfügbar. Von dort geht es in den Speicher des EEPROM des digitalen Zeitmessers (Digital Timer DT), der den Servo für das Ruder entsprechend auf neutral stellt (Impulszeit 1,5 ms).

Jetzt wird das Modell gestartet.

Wir nehmen an, dass das Kompassmodul absolut waagrecht bleibt und das Modell sich nach rechts bewegt. In diesem Fall (Fig. 6) vergrößert sich der Azimutwinkel α auf α' .

Der neue Azimutwinkel geht jetzt in den digitalen Zeitmesser, der ihn mit dem gespeicherten Wert vergleicht. Dadurch wird der Servo und damit das Ruder so bewegt, dass sich eine Modellbewegung nach links ergibt, als Gegenwirkung der Bewegung nach rechts, bis sich wieder eine neutrale Position einstellt. Das gleiche gilt natürlich für eine Modellbewegung nach links.

Es ist wichtig, festzustellen, dass die Ausrichtung des Kompassmoduls in Beziehung zur Flugrichtung unwichtig ist. Alles arbeitet richtig, egal wie der Azimutwinkel beim Start ist. Das Modul kann waagrecht im Modell gedreht sein. Entscheidend ist nur die Veränderung des Azimutwinkels.

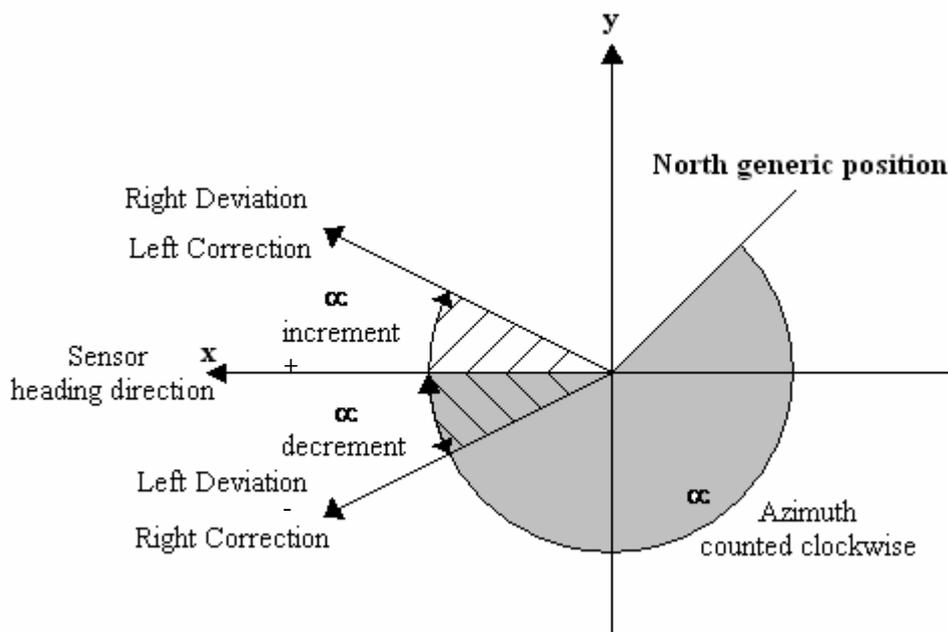


Fig.8

4. CMPS03 und das Kippen

Lasst uns jetzt annehmen, das das Modell in Fig. 6 nach rechts rollt (rechte Tragfläche nach unten) (Fig.9).

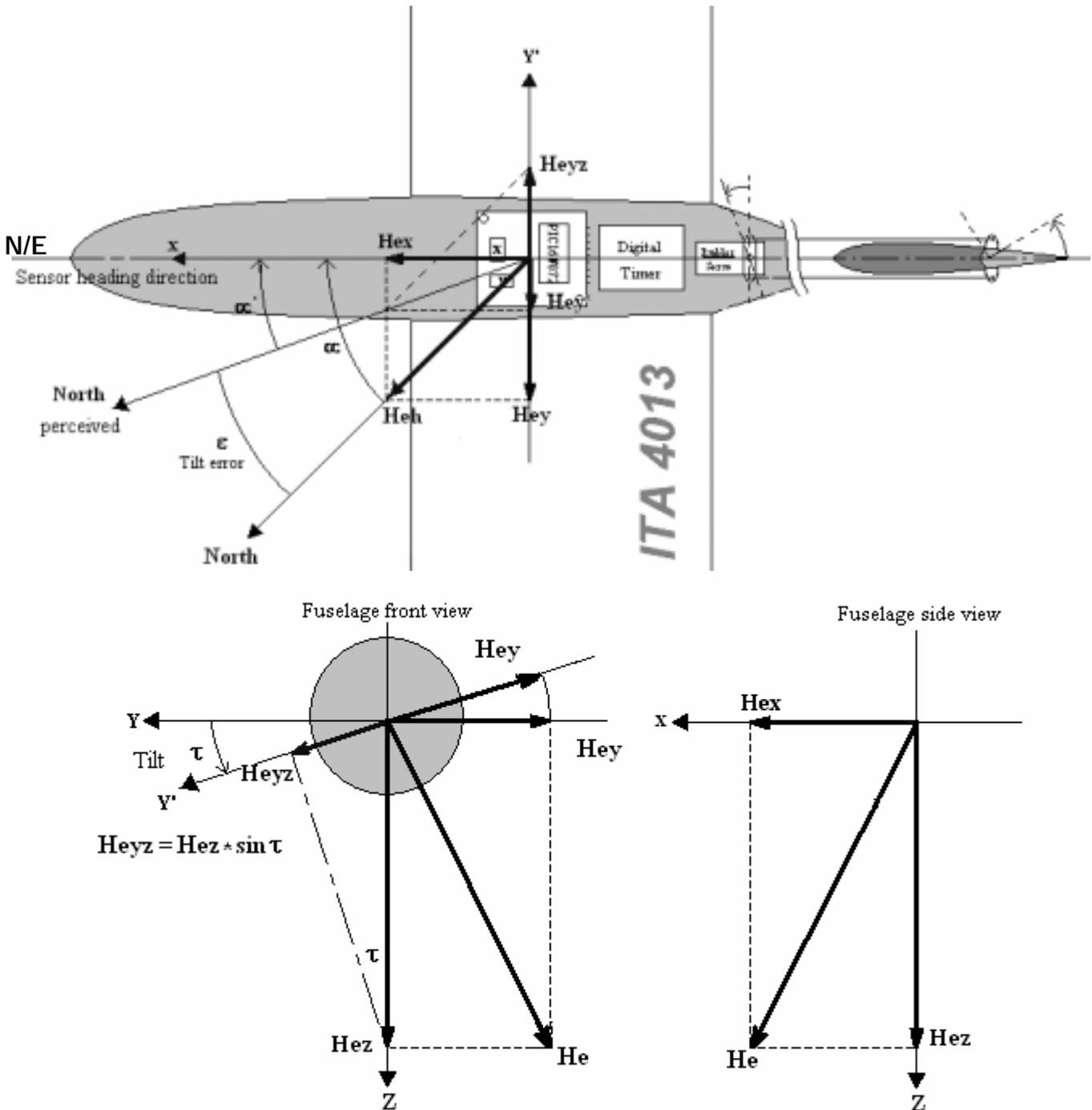


Figure 9

Das Kippen der y-Achse (Drehung τ um die x-Achse) verkürzt diese von y auf y' und bringt gleichzeitig die z-Komponente des Erdfelds He_z auf der y-Achse zum Vorschein (He_{yz} in Fig. 9).

$He_{yz} = He_z \cdot \sin \tau = He \cdot \sin \delta \cdot \sin \tau$ δ ist der Neigungswinkel, τ der Kippwinkel

Deshalb: $He_{y'} = He_y + He \cdot \sin \delta \cdot \sin \tau$ (3) (siehe Fig. 10 für einen Kippwinkel von $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$).

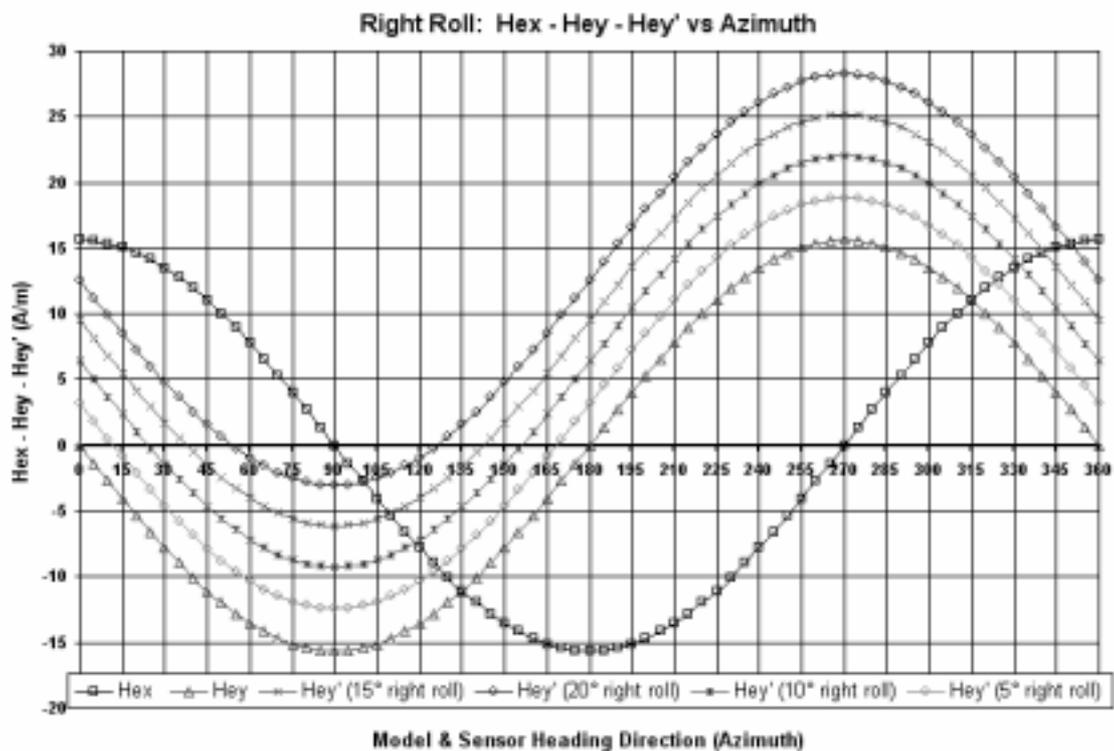


Fig. 10

Diese neue Komponente Heyz verändert stark den Azimutwinkel. Der Sensor nimmt eine Nordrichtung wahr, die von der normalen um den Winkel ϵ , dem **Kippfehlerwinkel**, abweicht. Dieser ist nach der Gleichung (1):

$$\epsilon = \alpha' - \alpha = \arctan(\text{Hey}'/\text{Hex}) - \arctan(\text{Hey}/\text{Hex}) \quad (4)$$

Wenn Hey = 0, bei N und S, wo $\alpha = 0$:

$$\epsilon = \arctan(\text{He} \cdot \sin\delta \cdot \sin\tau / \text{He} \cdot \cos\delta \cdot \cos\alpha) = \arctan(\tan\delta \cdot \sin\tau) \quad (5)$$

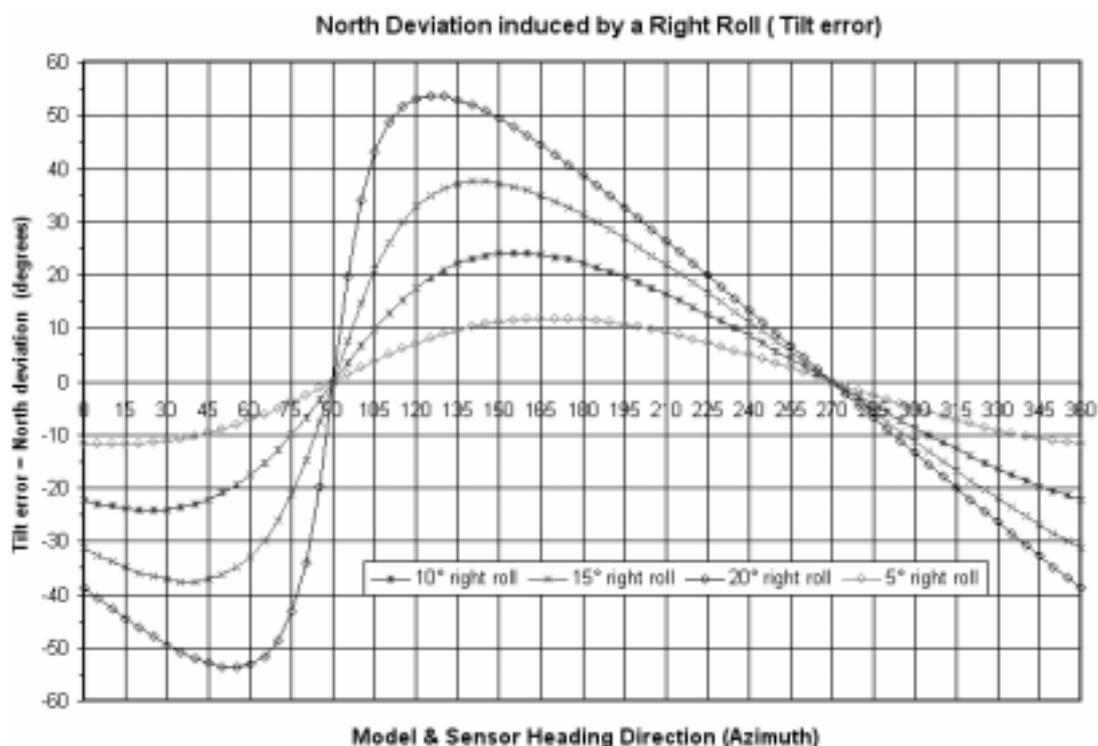


Fig. 11

Bei unserem F1E Modell, das nach 45°, Nordost fliegt, verringert ein Rollen nach rechts den Azimutwinkel α (45°) auf α' . Der Kippfehlerwinkel für eine Rolle oder ein Kippen von 15° ist mehr als 35°. (Fig. 11)

Eine Verringerung des Azimutwinkels ist gleich einer Flugabweichung nach links (Fig. 8) und der Servo versucht gegenzusteuern, d. h., der Servo steuert nach rechts und vergrößert das Rollen nach rechts. Dieses ist genau das Gegenteil von dem, was wir gehofft hatten.

Um einer Rolle nach rechts entgegenzuwirken brauchen wir ein Gegensteuern nach links oder eine Vergrößerung des Azimutwinkels. Dieses ist nur möglich, wenn der gemessene Azimutwinkel etwa 180° ist. Das heisst, das Modul ist nach Süden ausgerichtet und das Modell fliegt nach Norden – und natürlich auch umgekehrt.

Wie in Fig. 11 gezeigt, ist bei 135°-150° die Korrektur einer Rolle nach *rechts* am höchsten. Da aber bei einer Rolle nach *links* die stärkste Korrektur bei 210°-225° ist bleiben wir in der Mitte, bei 180°.

Sobald ein Kippen oder Rollen (rechts oder links) erscheint, arbeitet das System dagegen und gibt erst auf, wenn die Neutralstellung wieder hergestellt ist. Dadurch wird ein stärkeres Rollen oder Kippen vermieden.

Der Effekt der vertikalen Komponente Hez beeinflusst auch den Flug des Modells in der Querachse y. Wenn das Modell mit der Nase nach unten zeigt, vergrößert sich Hex, da Hez eine Komponente in der x-Achse erzeugt (Fig. 12).

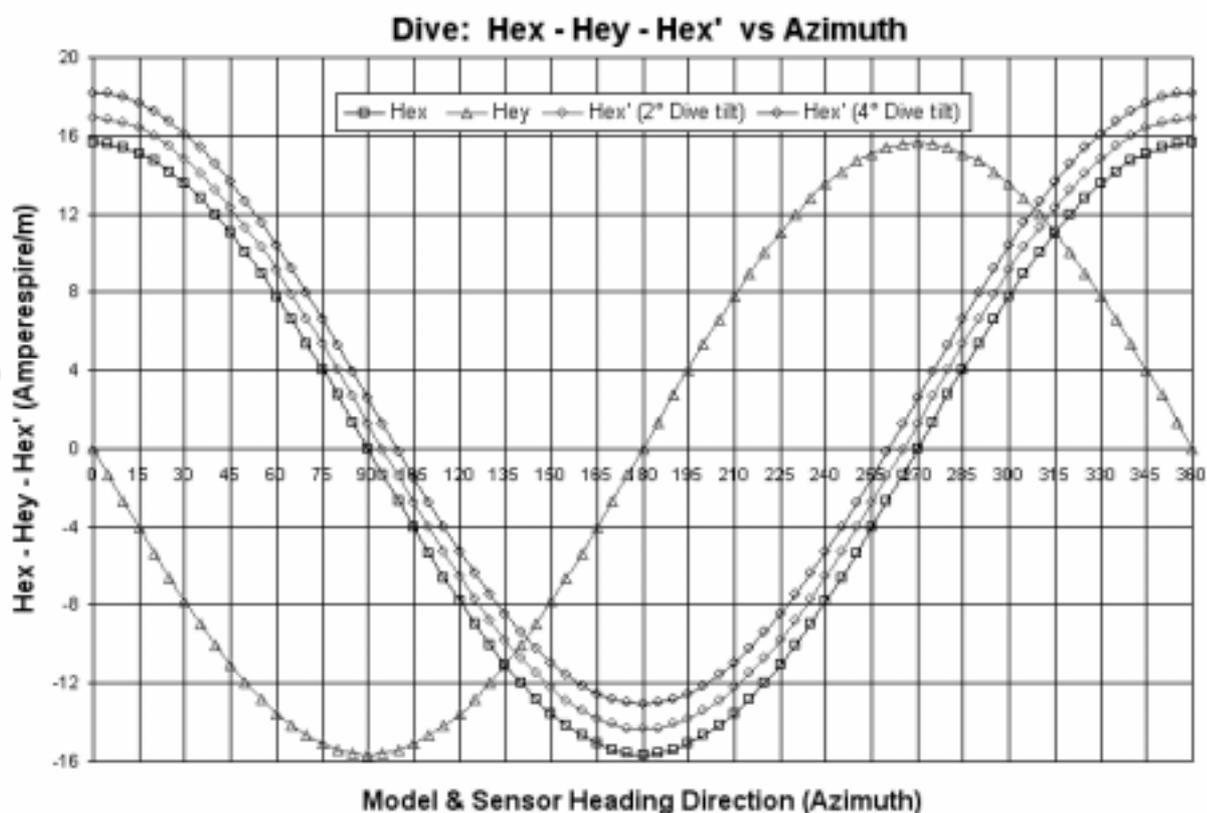


Fig. 12

Der Kippwinkelfehler verkleinert den Azimutwinkel, der als Linksabweichung ausgelegt wird. Das Servo bewegt das Ruder nach rechts. Und umgekehrt, wenn das Modell steigt (Fig. 13).

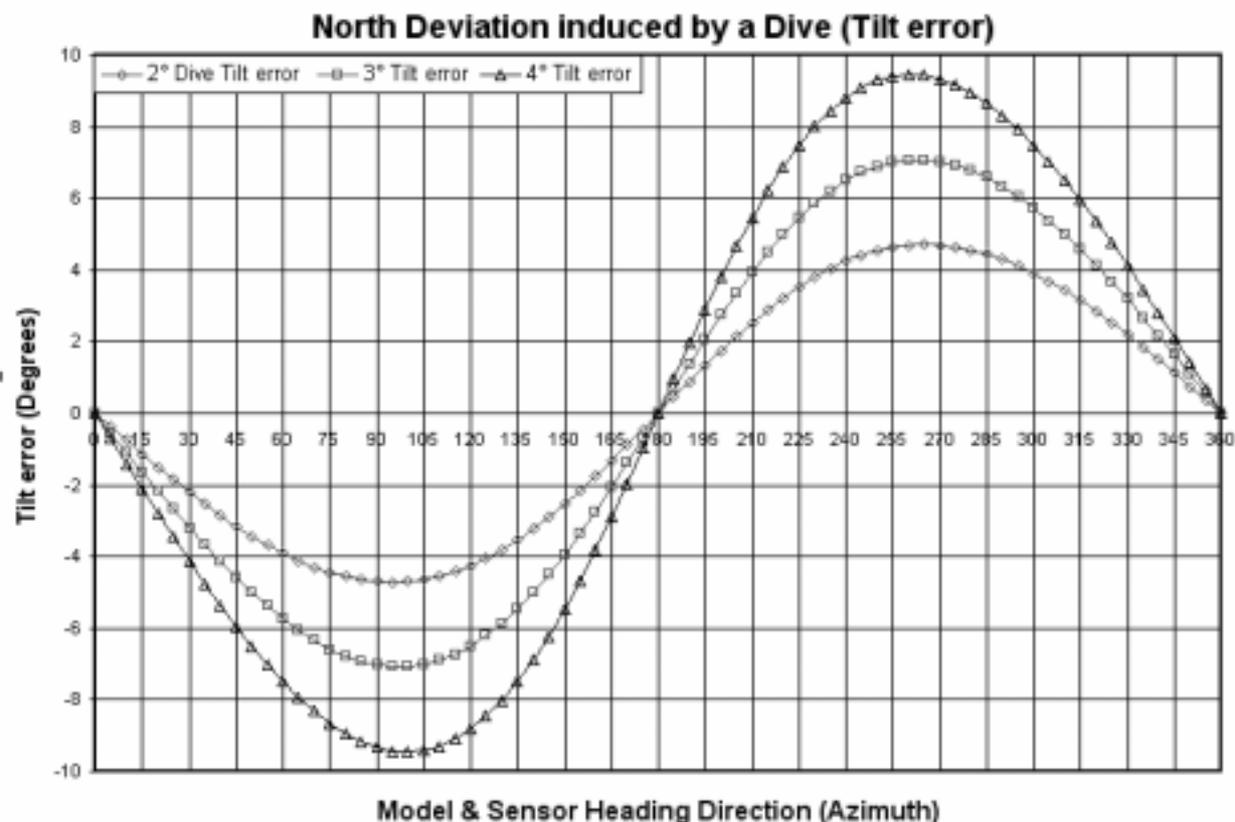


Fig. 13

Wenn das Modell gut getrimmt ist, dann sind Veränderungen um die Querachse sehr gering ($\pm 2^\circ$). Besonders bei F1E Modellen, welche eine sehr hohe Längsstabilität haben, wird diesem schnell gegengewirkt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass das System gut arbeitet, wenn das Modul in einem Azimutwinkel von etwa 180° arbeitet, das Modell fliegt nach Norden. Das gleiche gilt, wenn das Modell bei einem um 180° gedrehten Modul nach Süden fliegt. Wenn so geflogen wird, dann hat man eine gute Kipp- oder Rollkontrolle und eine gute Kontrolle bei Abweichungen um die y-Achse. Eine Vergrößerung der Hex Komponente hat keinen Einfluss (Fig. 13).

Das System arbeitet auch, wenn der Azimutwinkel 225° ist. Wenn das Modell mit der Nase nach unten zeigt, vergrößert sich der Azimutwinkel und damit eine Korrektur nach links. Wahrscheinlich ergibt dies eine Rolle nach links, die sofort korrigiert wird.

5. Die „x-y-Rose“

Wie schon gezeigt, ist bei einem waagrecht eingebautem Kompassmodul nur der Azimutwinkel entscheidend. Es spielt keine Rolle in welche Richtung das Modul ausgerichtet ist oder in welche Richtung das Modell fliegt.

Dagegen muss man, um Bewegungen des Modells um die **Längs- und Querachse unter Kontrolle** zu haben (**Modulrichtung = Längsachse**), das Modul so ausrichten, dass der Azimutwinkel etwa 180° ist (Fig.14).

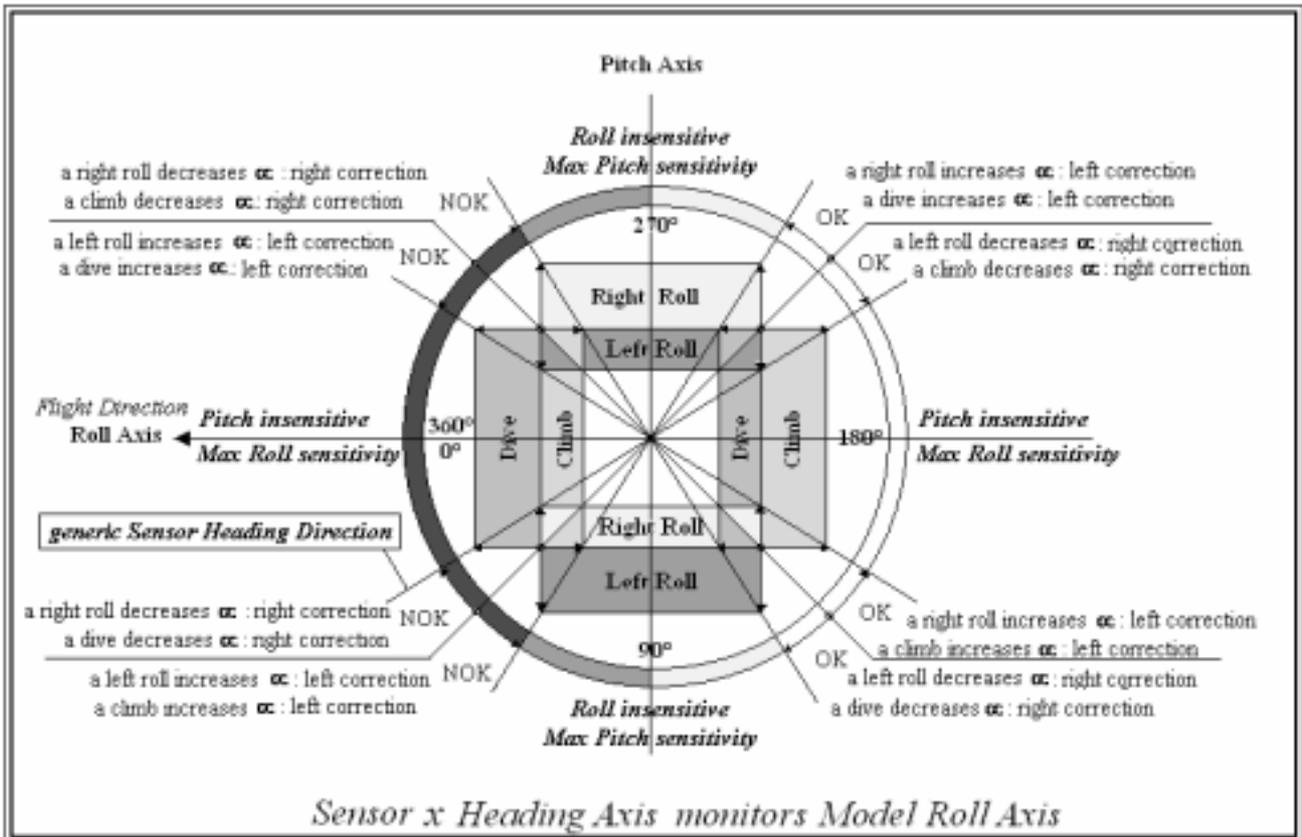


Fig. 14 : die "x-Roll-Rose"

In Fig.14 sehen wir den Fall, dass die Längsachse des Modells mit der x-Achse des Moduls übereinstimmt. Wenn das Modul einen Azimutwinkel von 135° and 225° anzeigt, dann arbeitet das System sehr gut. Eine Rolle oder Kippbewegung wird sofort gegengesteuert und Bewegungen um die Querachse sind bei 180° unter Kontrolle. Dieser Moduleinbau deckt eine Flugrichtung von 135°-225° ab. Auch zwischen 315°-45°, wenn das Modul um 180° gedreht.

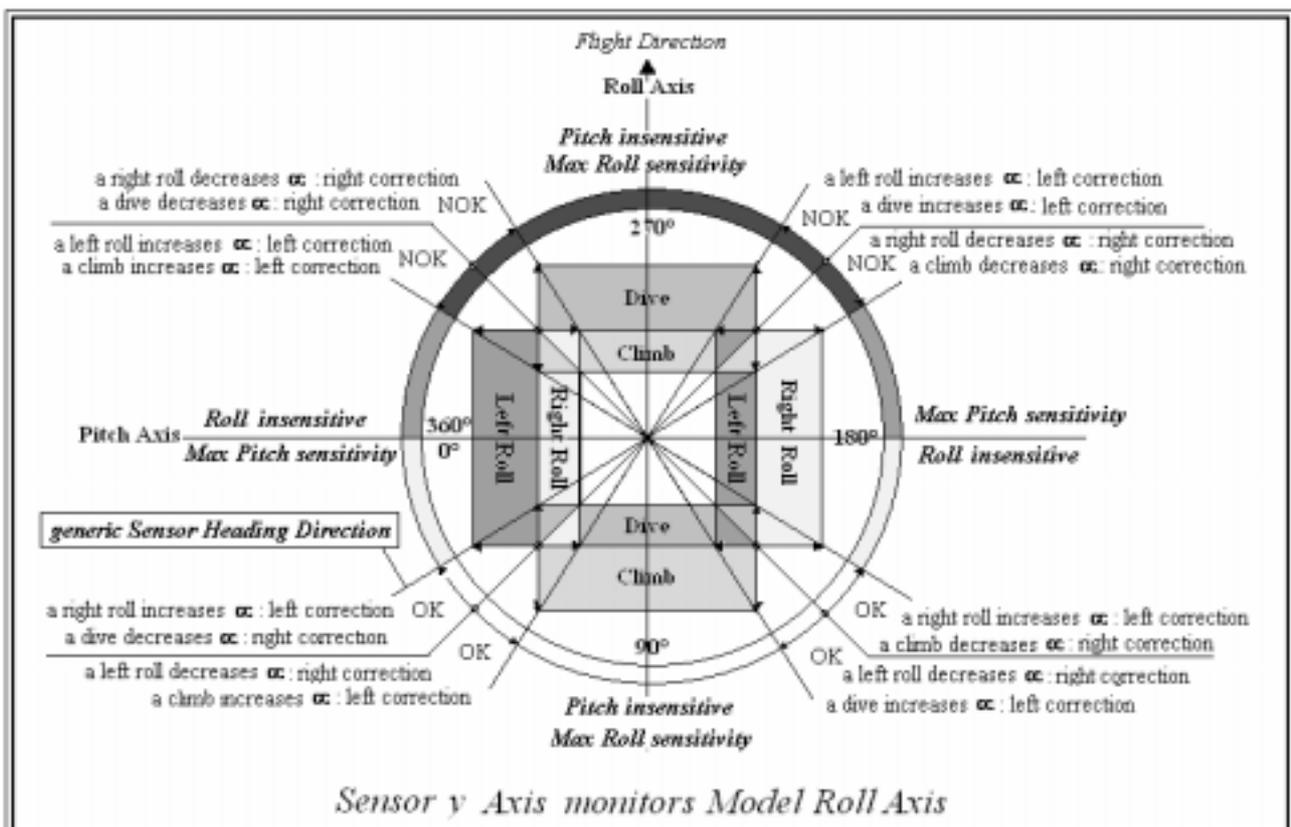


Fig. 15 : die "y-Roll-Rose"

In Fig.15 sehen wir den Fall, dass die Längsrichtung des Modells und die x-Achse des Moduls um 90° verdreht sind. Wenn das Modul einen Azimutwinkel zwischen 45° und 135° anzeigt, dann arbeitet das System sehr gut. Eine Roll- oder Kippbewegung um die Querachse sind bei 90° unter Kontrolle. Der Moduleinbau deckt Flugrichtungen von 45°-135° ab. Auch zwischen 225°-315°, wenn das Modul um 180° gedreht ist.

In Fig. 16 ist zusammengefasst, wie die Lage des Moduls im Modellrumpf im Verhältnis zur Flugrichtung sein muss.

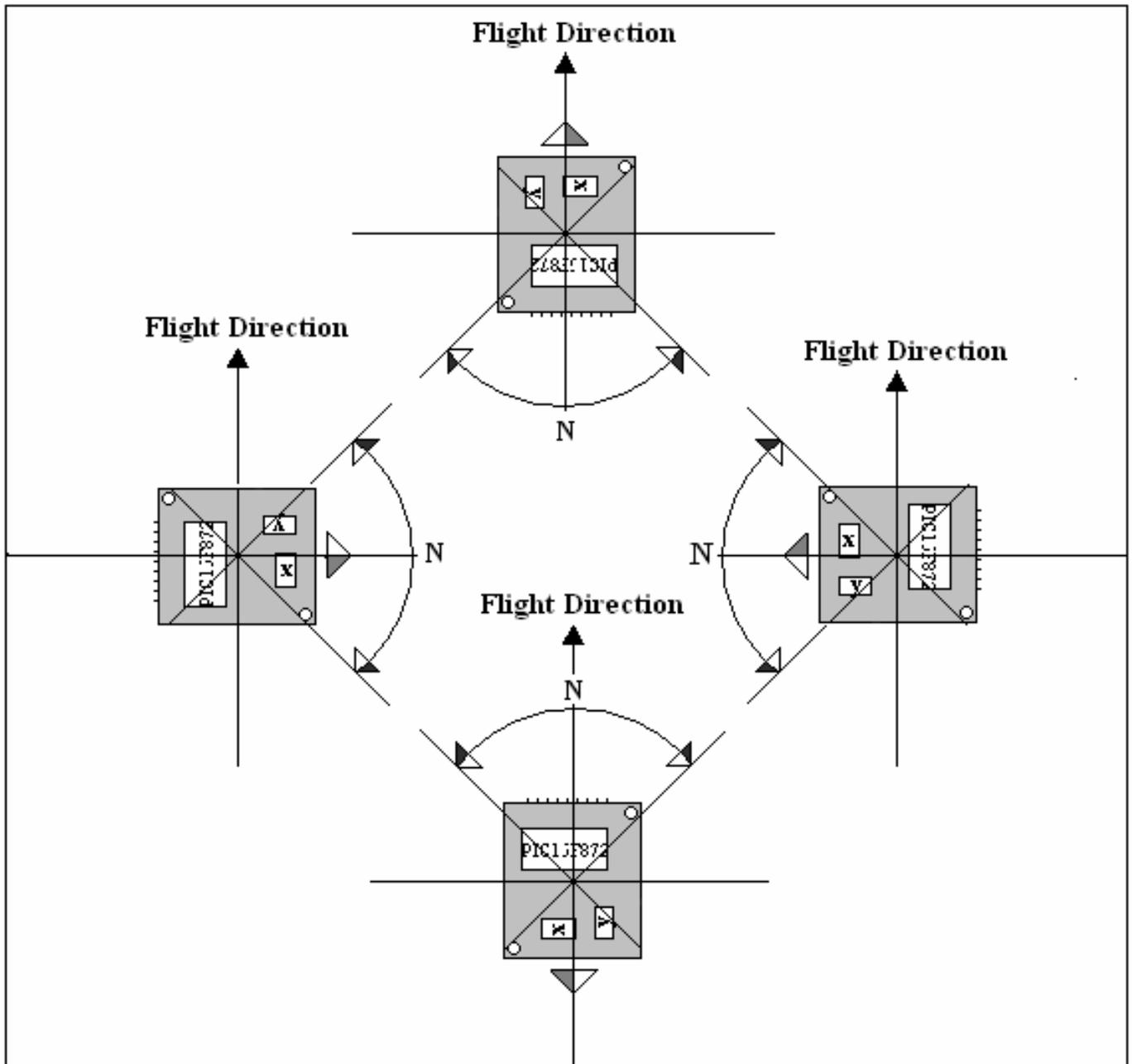
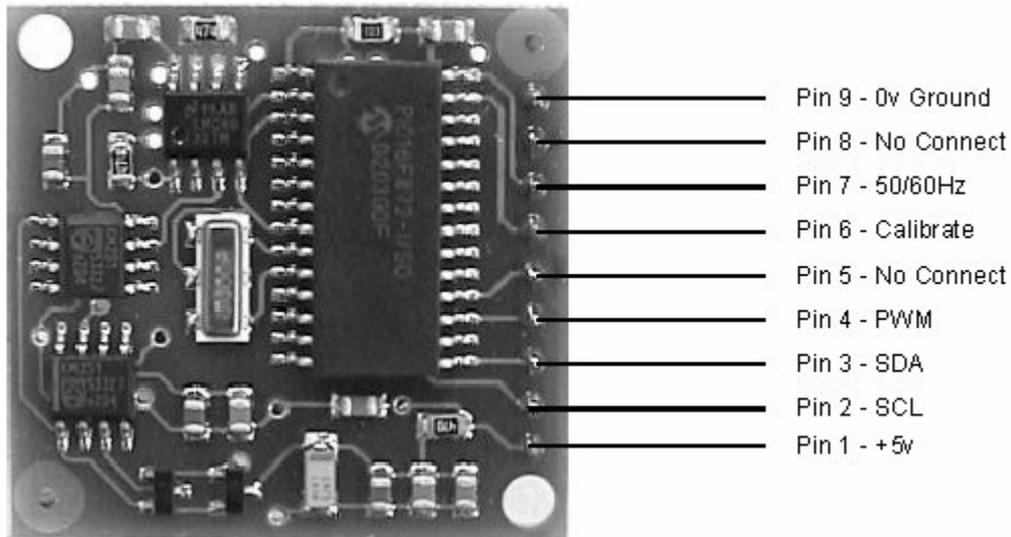


Fig. 16

Anhang 1 - CMPS03 PWM Ausgang

Anschlüsse des Kompassmoduls:



Das Kompassmodul benötigt eine Strom von 5V bei nominal 15mA.

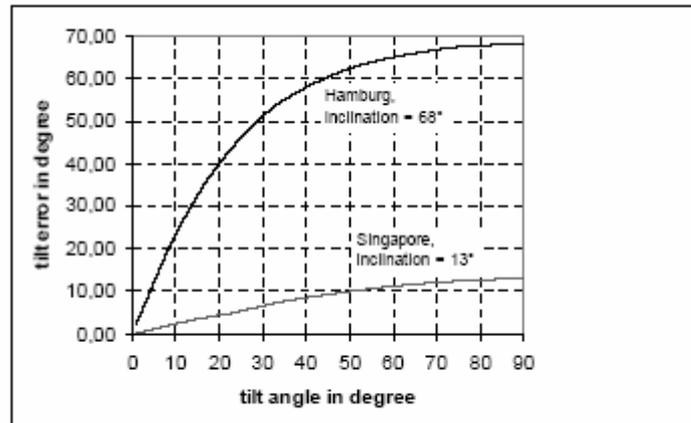
Es gibt 2 Möglichkeiten einen Richtungswert von diesem Modul zu erhalten. Ein PWM Signal ist am Anschluss 4, am Anschluss 2 und 3 ist ein I2C Interface.

Das PWM Signal ist impulsbreitemoduliert, bei der die positive Breite des Impulses den Winkel darstellt. Die Breite des Impulses verändert sich von 1ms (0°) bis auf 36.99ms (359.9°), in anderen Worten 100µs/Grad plus 1ms. Das Signal geht dann für 65ms auf Low, so dass die Zykluszeit 65ms + die Impulszeit beträgt. Der Impuls wird von einem 16 Bit Zeitgeber erzeugt. Die Auflösung des Moduls beträgt 0,1° (10µs). Wichtig ist, die beiden I2C Anschlüsse, SCL and SDA, mit 2 Pull-up Widerständen an den 5V Strom abzuschliessen.

Für Einzelheiten über das I2C Interface and the Kompass-Kalibrierung siehe www.robot-electronics.co.uk.

Anhang 2 - Elektronisches Mehrachsensystem

Die Gleichung (5) zeigt, dass sich der Fehler durch den Neigungswinkel δ und den Kippwinkel τ vergrößert. Der Fehler ist 0, wenn Neigungs- und/oder Kippwinkel 0° sind. Den grössten Kippwinkel erhält man bei einem Kippwinkel von 90° , wenn $\sin\tau = 1$ ist. Dann hat dieser Fehler die Grössenordnung des Neigungswinkels δ . Das Diagramm zeigt den Kippfehler gegenüber dem Kippwinkel für zwei Orte auf der Welt.

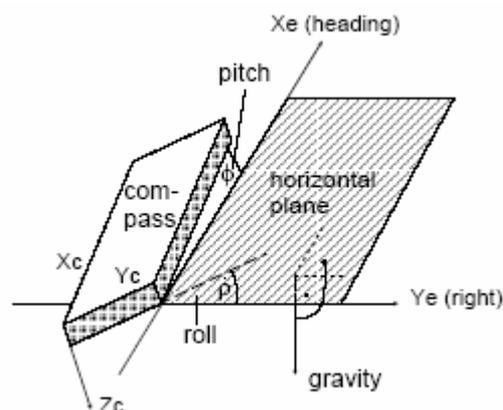


Tilt error magnitudes

Eine klassische Methode um Kippfehler zu vermeiden ist, den Kompass in eine Flüssigkeit zu legen. Dieses ergibt eine waagerechte Ausrichtung des Kompasses durch die Schwerkraft. Dies ist ein "mechanisches Mehrachsensystem" oder "mechanical gimbaling".

Der Kippfehler kann auch ohne bewegte Teile ausgeglichen werden, indem man die gemessenen Komponenten mathematisch alle in horizontale Komponenten umwandelt. Dadurch erhält man ein "elektronisches Mehrachsensystem" oder "electronic gimbaling". Man braucht jetzt zusätzliche Sensoren:

- Einen dritten Magnetfeldsensor, da nun alle drei kartesischen Vektoren des Erdfelds H_x , H_y , H_z gemessen werden.
- Sensoren um Kippen des Kompasses, Bewegungen um die x- und y-Achse zu registrieren.



Die Abweichung der horizontalen Erdfeldkomponente H_x und H_y von den gemessenen Komponenten H_x , H_y , H_z benötigt eine Umrechnung der beiden verdrehten kartesischen dreidimensionalen Koordinaten-Systeme (siehe obige Abbildung). Die folgenden Gleichungen ergeben diese Umrechnung:

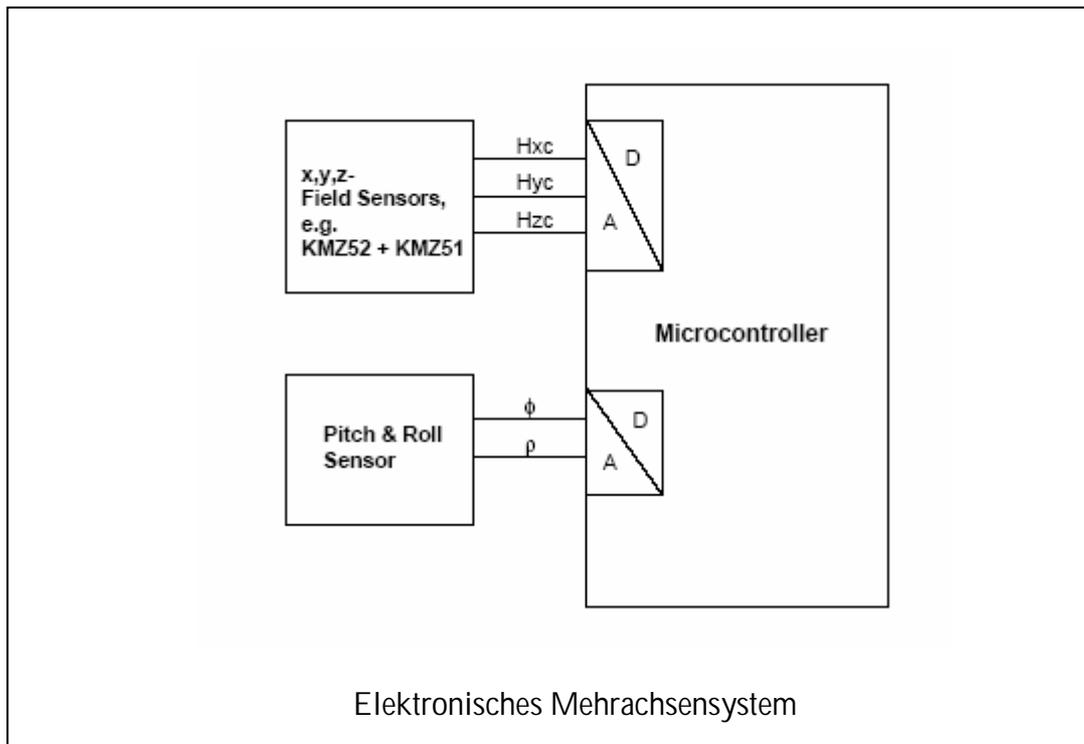
$$H_x = H_x \cdot \cos \phi - H_y \cdot \sin \phi \cdot \sin \rho - H_z \cdot \sin \phi \cdot \cos \rho$$

$$H_y = H_y \cdot \cos \phi + H_z \cdot \sin \phi \cdot \sin \rho$$

Abschliessend ergibt sich ein vereinfachtes Blockschema für ein elektronisches Mehrachsen-Kompasssystem.

Unter Verwendung von Philips Magnetfeldsensoren kann ein dreiachsiges Feldsensoren-System erstellt werden. Ein Doppelsensor KMZ52 misst die x-Achse und ein Einfachsensor KMZ51 misst die z-Achse.

Für das Kippen sind kompakte Schwerkraftsensoren verfügbar.



Quellenangaben

In dieser Abhandlung wurden folgende Quellen verwendet:

- 1) AN00022 APPLICATION NOTE "Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52"
http://www.philips.semiconductors.com/handbook/various_39.html
- 2) Web-Seite der Robot Electronics <http://www.robot-electronics.co.uk/>