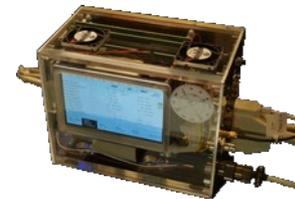


FIN-1010 / FIN-1012

- Trägheitsnavigation, was'n das?
- Anforderungen an die Sensoren & Aufbau einer Trägheitsplattform...
- FIN-101[0,2] – Computing: Analoges, mechanisches und digitales Rechnen
- [Alignment & Gimbal-Flip]



V1.1 vom
25.5.2017



VCFe 18.0, 29.4.2017 – 1.5.2017, München

Dr. Erik Baigar, erik@baigar.de, www.baigar.de

Worum geht es? / Motivation?



FIN1010/1012:
Navigationsgerät
aus dem Panavia
Tornado, im Ein-
satz 1974–2007(?)
Es geht um: Verstehen,
Dokumentieren & Erhalten



*Tornado MLU auf
LINS und EOL2019?*



Was ist Trägheitsnavigation I?

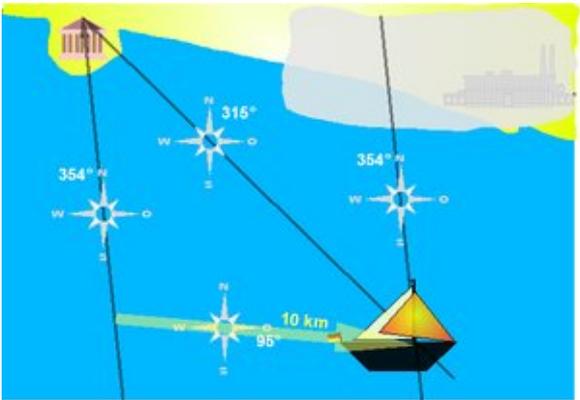
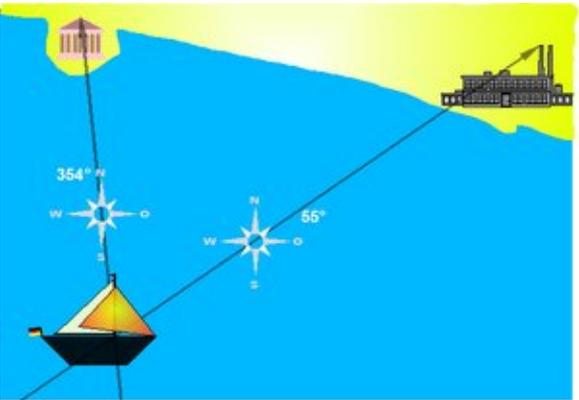
Standortbestimmung durch Peilen

Peilen und „Koppeln“

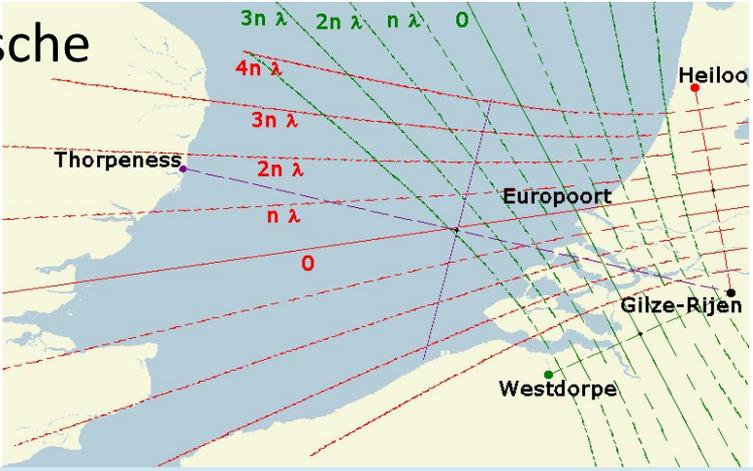
Instrumente:

(Kreisel-)Kompass, Log, Sextant, Lot, Tachometer, ...
...und Uhr – viel Handarbeit!

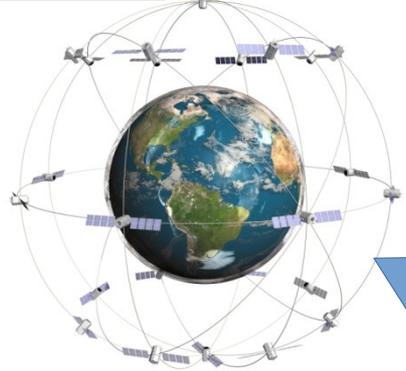
Seit Antike, „Sicht“



Ab 1950 hyperbolische Verfahren (Decca)



1980er: GPS



Radio-basiert

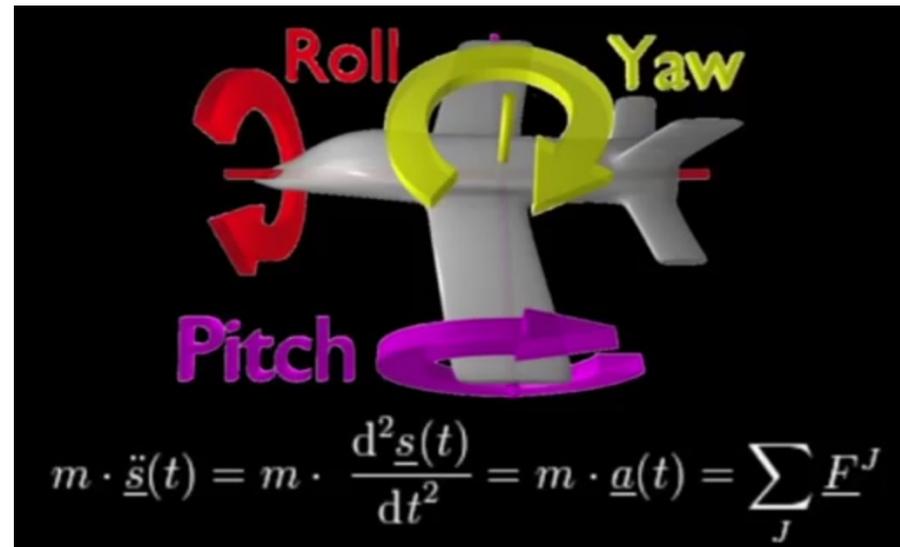


Was ist Trägheitsnavigation II?

- **Früher (–1930):** Visuelle Navigation (Peilen, Astronavigation) und mit-Kopplern (Aufzeichnen, wie lange/weit/schnell in welche Richtung und „Ausrechnen“ des Standortes)
- **Trägheitsnavigation** (INS, nach WW2): Automatisieren des Koppeln („Mechanisierung“) durch Drehgeber (Kreisel), Beschleunigungsmesser und „Computer“. Entwicklung für Militär (1950), Raketen (ICBM, Apollo), Zivile Luftfahrt (ab 1969).

Braucht KEINE externen Referenzen / Landmarken / Radiosignale - Nur Startpunkt!

- **Ab 70ern/Heute:** DECCA, Loran, GPS: Radiobasierte Navigation ggf. mit INS gekoppelt: Genauer und BILLIGER.



- **Reines INS** Heute nur noch bei ICBMs und in U-Booten → High End & Teuer!



Was ist Trägheitsnavigation II?

Schwierigkeit bei INS: Genauigkeit der Sensoren (Kurz- und Langzeitstabilität), Umwelteinflüsse; Hypothetische Spezifikation: **1 km Fehler auf 1000 km.**

- **Naive erste Rechnung:** Annahme, aller Fehler kommt z.B. aus der Richtung → Gyrofehler von 0.05° zulässig. (Dynamikbereich bis $5E5^\circ$, i.e. 7 Größenordnungen)
- **Zweite Rechnung:** Die Position wird ermittelt durch zweifache Integration der Beschleunigung → $s = 1/2 a t^2$; Annahme aller Fehler kommt aus einem Offsetfehler eines Accelerometers → $1.5E-5g$ Beschleunigungsfehler zulässig. (Dynamikbereich bis $\pm 10g$, auch über 6 Größenordnungen!)
- **Aber:** Es gibt 3 Richtungen und 3 Achsen → 6 Instrumente und alle tragen mit Offset und Scale zum Fehler bei → Jedes muss besser sein als oben geschätzt!
- **Messprinzipien:** Komplikation insbesondere Crosstalk: Gyros erzeugen Signal bei Drehung um andere Achsen als die Messachse; Beschleunigungssensoren reagieren auch auf Drehung; Kopplung durch Anisoelelastizität etc. etc. etc.
- **Fazit:** Sensoren für INS müssen hochgenau und stabil sein → Trick „Plattform“ in Drucktank (Inertgas), temperaturstabilisiert & Ofen für V_{ref} und „Uhr“.



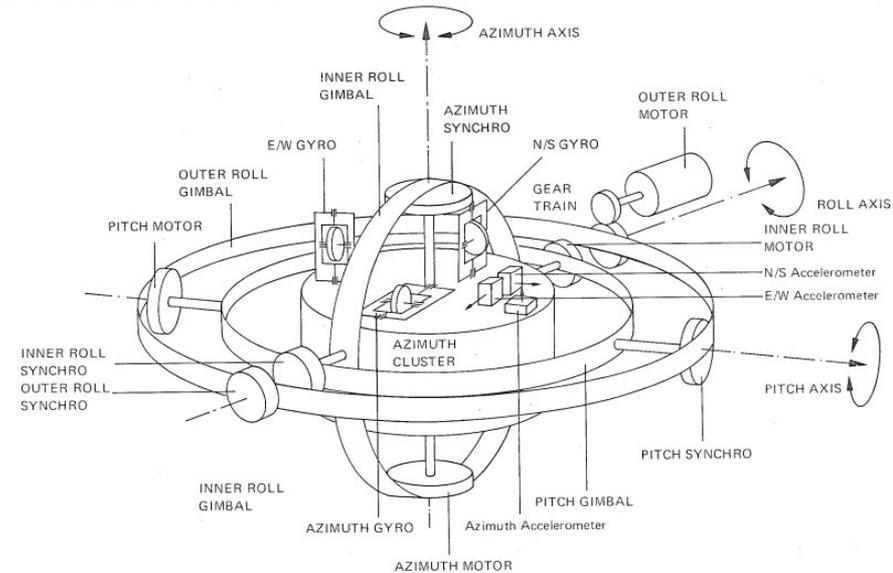
Trägheitsplattform I

Idee: Setze Sensoren zusammen auf eine Platte (=Plattform) und halte diese immer aufrecht und ausgerichtet in der Richtung. **Vorteile :**

- Beschleunigungssensoren „sehen“ keine Drehung mehr.
- „Mathematik“ einfacher weil es für N, E und oben einen festen Sensor gibt (damals wichtig, Heute irrelevant)
- Die Gyros werden verwendet, um die Plattform zu stabilisieren und es ist zunächst nur noch deren Drift eine kritische Größe
- Attitude direkt verfügbar („Analog Out“)

Nachteile: Teuer (>250000DM, 1974), anfällig (Schleifringe), komplexe Mechanik.

In der Tat: Heutige GPS-Assisted-INSe sind „Strap-down“-Varianten ohne Plattform – daher i.d.R. schlechter (Rein INS, ohne Tricks).

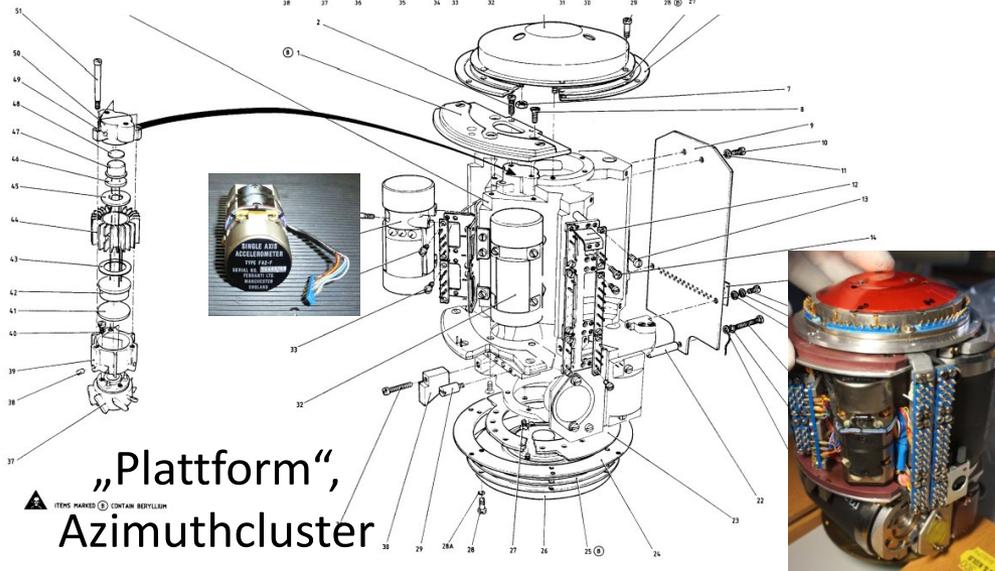
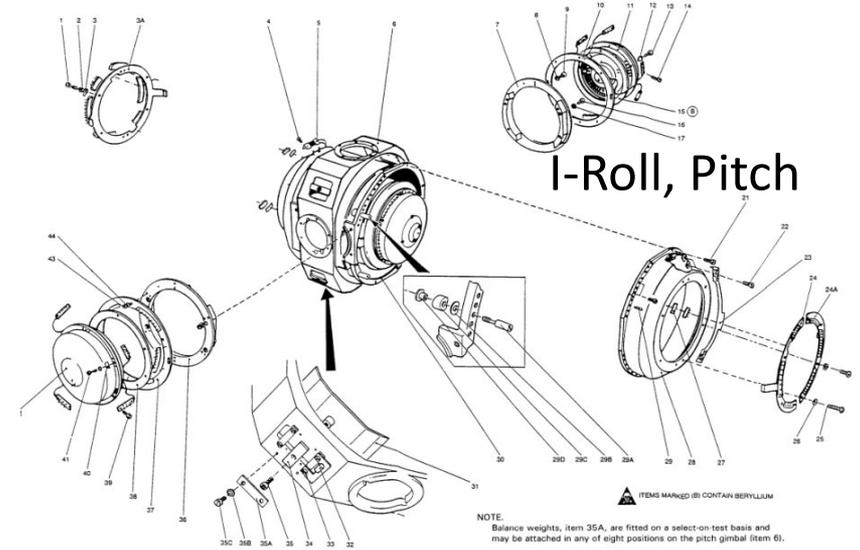
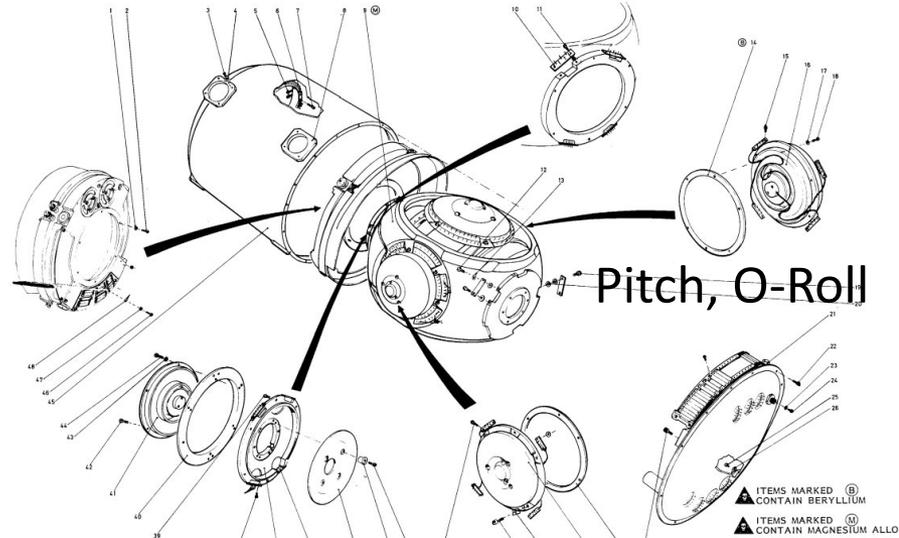


Plattform drehbar um „3+1“ Achsen

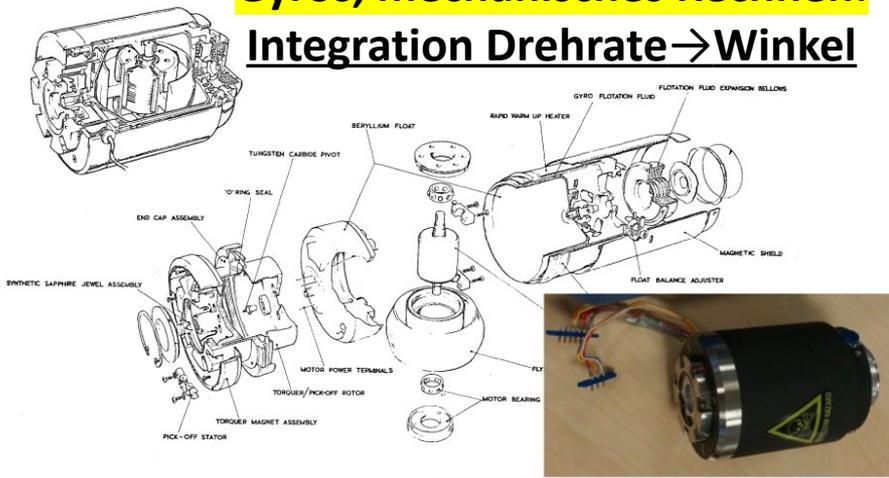


Trägheitsplattform II

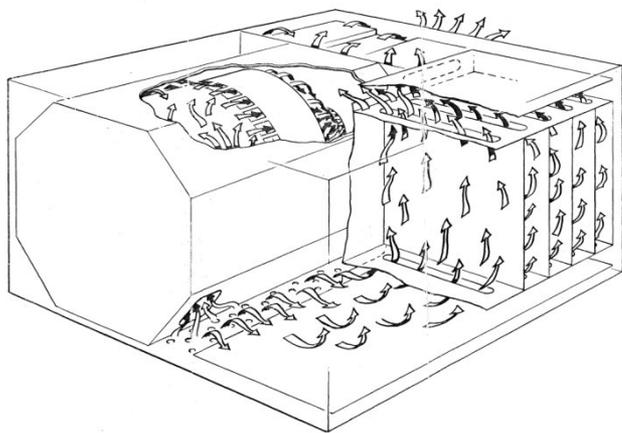
>>2000 Teile Feinmechanik, Flüssigkeitslagerung der Floats in den Gyros, exotische Materialien (Beryllium), alles justiert und ausbalanciert! Montage im Reinraum, Drucktank mit Inertgas,...!



Gyros, mechanisches Rechnen: Integration Drehrate → Winkel



INS – All-in-one (ab 1970)

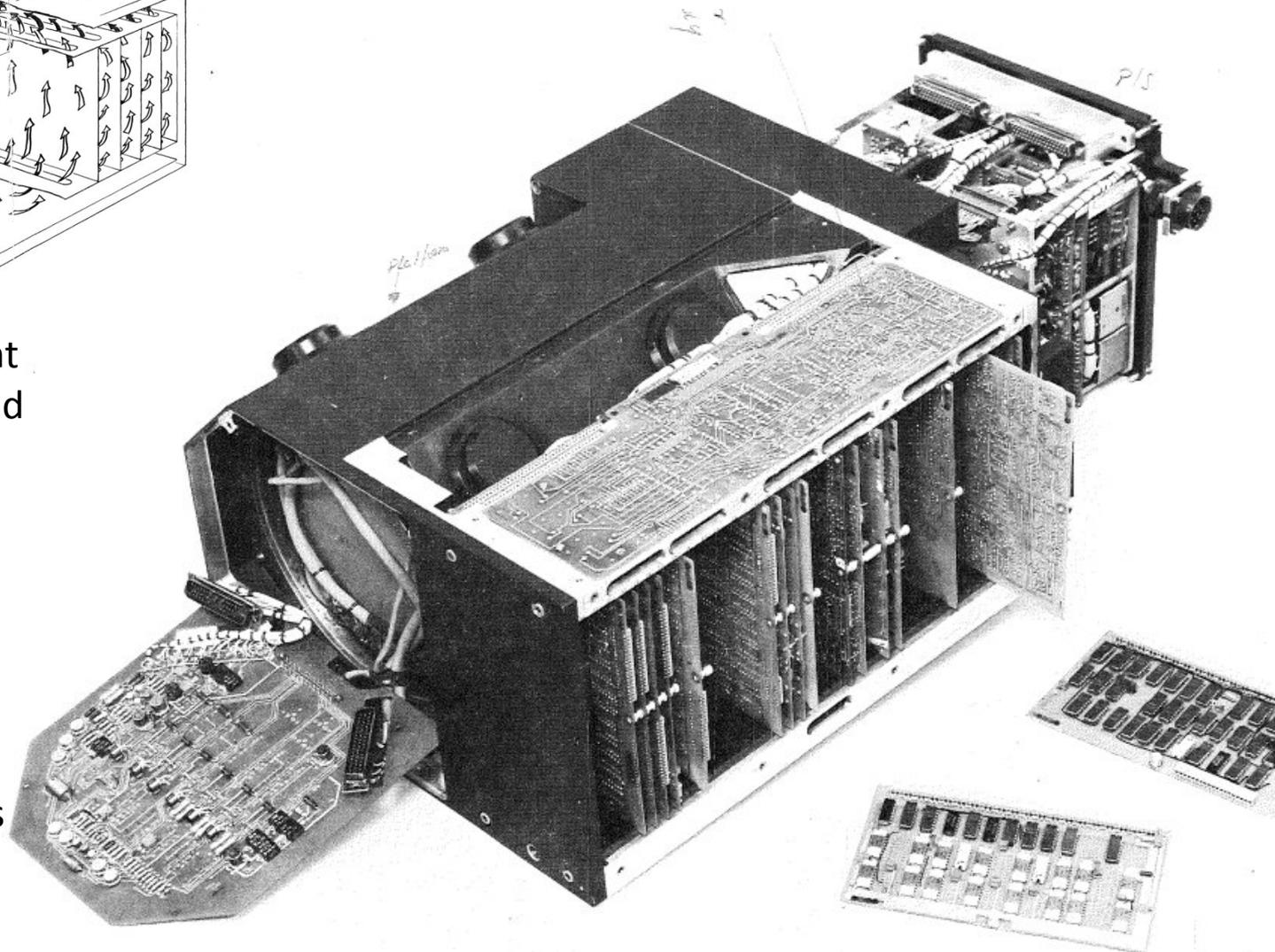


Thermo-management durch Luft-Klappe und zweistufiges Heizen.

Bis 1970 (z.B F4FGR) Multi-box Gerät:

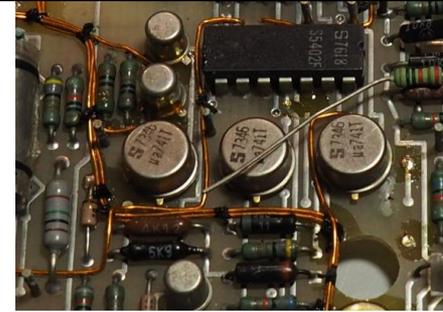


Elektromechanisches „Rechnen“ (Z.B. Mit Kugel-Resolver etc.)



Computer I – Analog computing...

Analoger Computer bestehend aus ca. 100 OpAmps, 75 J-FETS (Schalter und Multiplizierer) und 20 Relais („Programmverzweigung“). Aufgaben des analogen Computers:

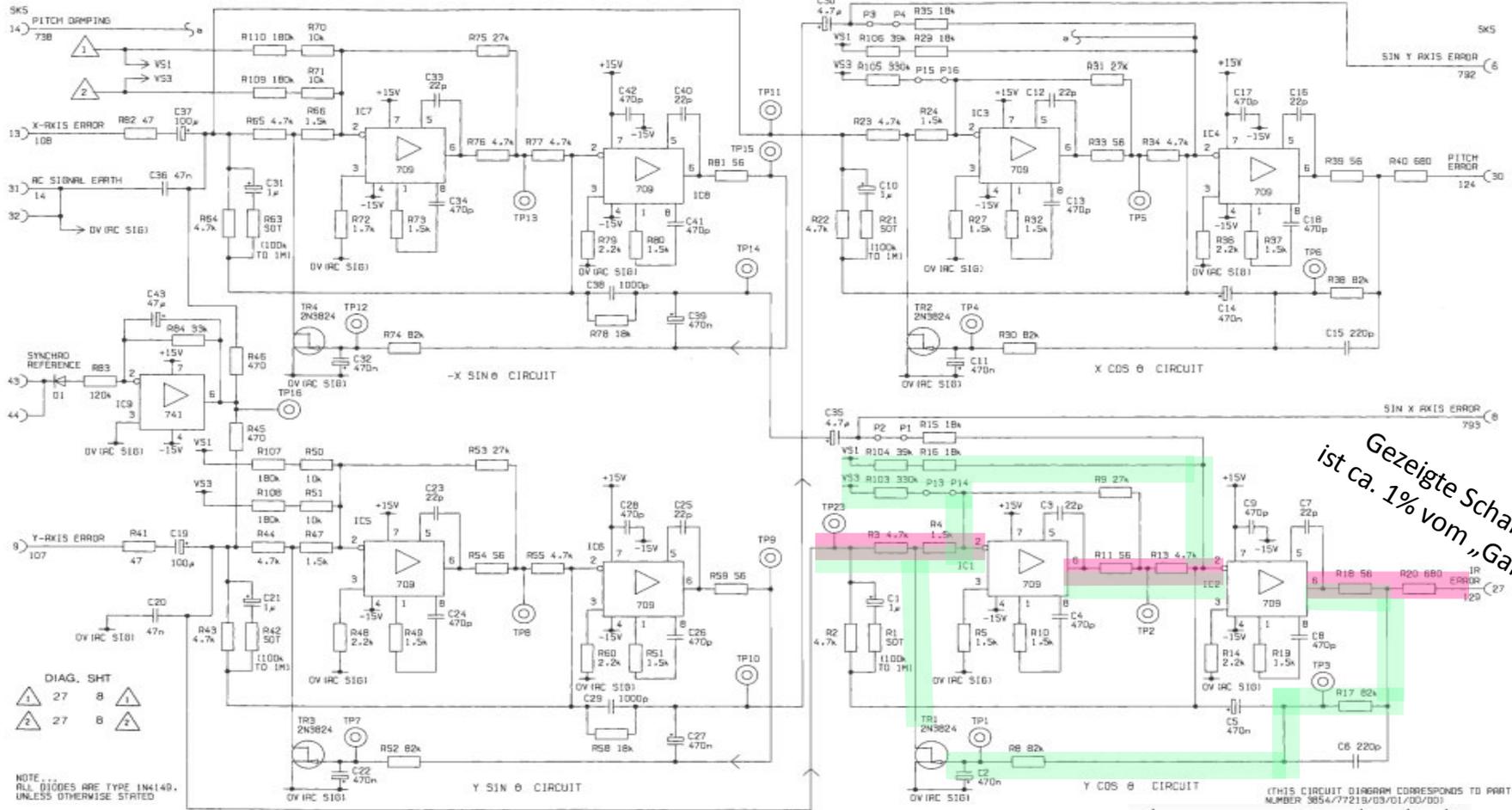


- **Regelkreis Plattform:** Nachführung der Plattform bei Drehungen: Auswertung der Gyrosignale, Berechnung von Korrekturen: Beschleunigungsabhängige, temperaturabhängige, Korrektur bzgl. Gyrodrehzahl, Kompensation der Anisoelektizität in Plattform und Gyros, Crosstalk zwischen den Beschleunigungssensoren & Handling von Zustandsübergängen.
- **Alignment:** Bei der initialen Ausrichtung/Orientierung des Plattformkerns in N, E und oben: Messung der Erdrate. Berücksichtigung der Korrekturen bzgl. Gyro-Drift.
- **Navigation:** Erste Integration von Beschleunigung zu Geschwindigkeitsinkrementen, die dann via DMA in den Speicher des digitalen Computers übertragen werden.
- **Specials:** Gimbal-Flip (Führung des OR-Gimbals), Multimeter für Auto-Calib.
- **BITE:** Überwachung der „Vitalfunktionen“ – sind die analogen Ausgänge plausibel, Ströme (Caging bei Akzelerometern, Motor drives) im erlaubten Bereich, Betriebsspannungen OK etc. etc. Sonst: Notabschaltung und Info an CWS.
- **Fazit:** Analogcomputer ist das „Kleinhirn“ und läuft autonom zum digitalen.



Computer II – Analog computing...

Multiplikation durch Trick: DC-Regelschleife macht Multiplikator, Multiplikand AC ebenso Ausgang.

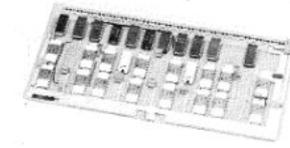


Bsp.: Azimuth Resolver: Berechnet 2D Drehung

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$



Computer III – Digital computing...



Digitaler Computer bestehend aus ca. 250 TTL-Chips, bitseriell (1 bit ALU), 10MHZ Masterclock, 8192W ROM, 32 Worte non-volatile Stores und 96 Worte RAM. Archaische Architektur (?? Pegasus, Argus, Atlas etc. auch Ferranti). Aufgaben des digitalen Computers:

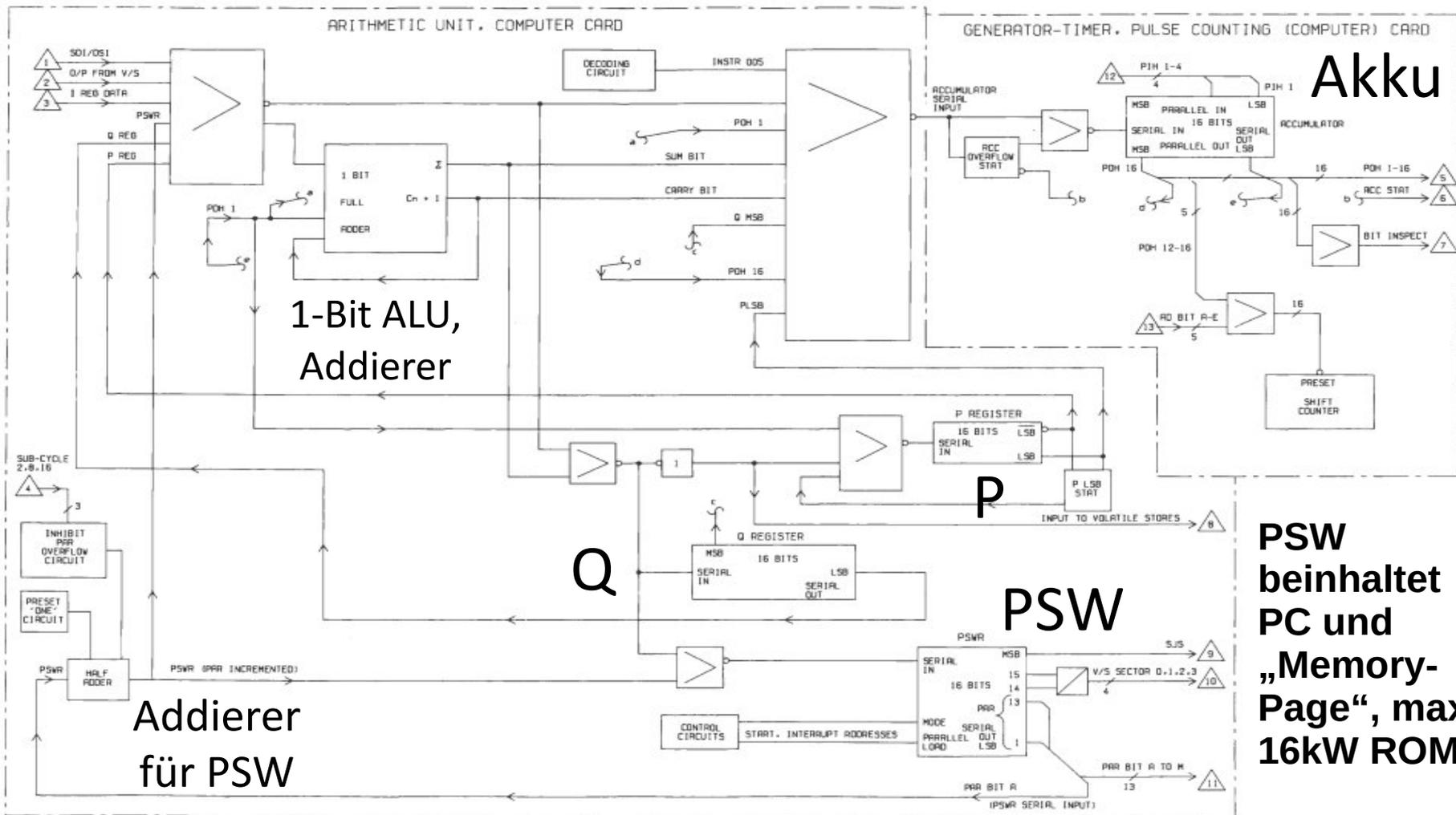
- **Kommunikation:** Interface zu 12 externen „Verbrauchern“ wie HUD, Missionscomputer, AFDS, „external stores“. Userinterface via CDU. Selektion von Inputdaten (Magn. Kompass, HUD-Alignment,...).
- **Supervisor:** Überwachung des analogen Computers, Initiierung von verschiedenen Programmen dort: Grobausrichtung, Gyrocompassing, Navigation, Testmode, Kalibriermode – Schaltung der Übergänge. „Torquen“ der Plattform entsprechend der lokalen Erddrehrate und Feinkorrektur des Gyrodrifts. Plattformnachführung bei Bewegung!!
- **Navigation:** Zweite Integration von Geschwindigkeit und Verrechnung mit Attitude: Integration zu aktuellem Standort. Großkreisrechnung als „take-me-home“-Feature für zwei Positionen.
- **Specials:** Eingebaute Selbstkalibrierung der Gyrodrifts → Einheit fällt für 4h ins Koma, der digitale Computer dreht die Plattform in verschiedene Orientierungen → Rausrechnen der Erddrehung und Ermittlung der aktuellen Driftraten der Gyroskope. Diese werden in den „non-volatile stores“ (=BatterieRAM) abgelegt.
- **BITE:** Selbstüberwachung – es werden alle Maschinenbefehle in regelmäßigen Abständen ausgeführt und das Ergebnis kontrolliert.

Output des digitalen Computers wird alle 30ms aktualisiert (nach 20m Flugstrecke gibt es einen neuen Standort: Harte Echtzeit für AFDS – automatischer vorgeplanter Flug mit Mach 1.05 in <100m Höhe).



Computer IV – Digital computing...

16/32 Bit bitserieller Computer, 10MHz, Harvard Architektur



Akku

1-Bit ALU, Addierer

Addierer für PSW

Q

P

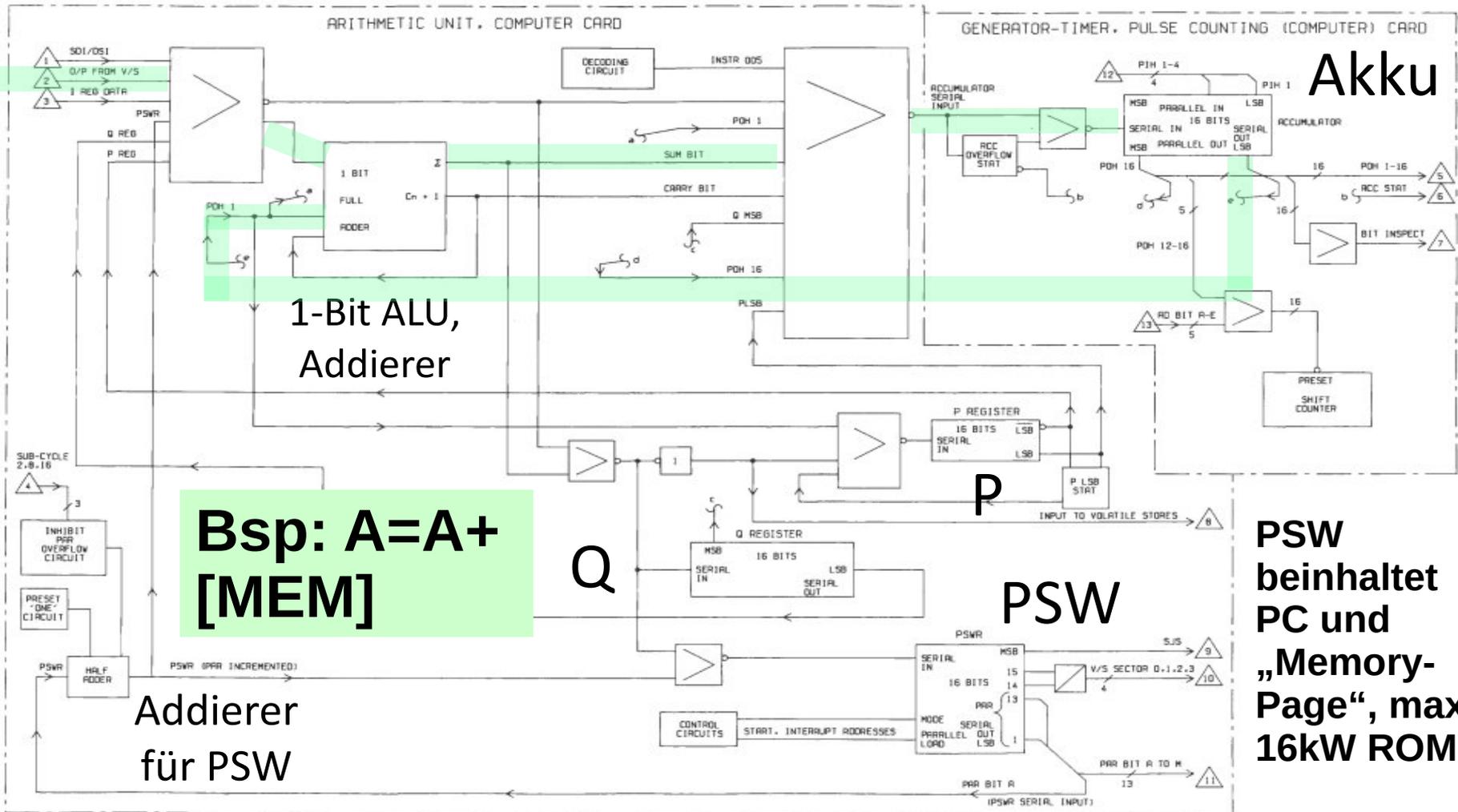
PSW

PSW beinhaltet PC und „Memory-Page“, max. 16kW ROM



Computer IV – Digital computing...

16/32 Bit bitserieller Computer, 10MHz, Harvard Architektur



Computer V – Digital computing...

8-Bit Befehlsformat FIN-Computer

Adresse (Store oder Unterfunktion)					Funktion		
7	6	5	4	3	2	1	0

Function		32 Bit (auf PA)? Function (Octal)	Im Logic-Mode? Beschreibung des Befehls
1	Store>Accu	Ja	Lade Accu
2	Accu>Store	Ja	Accu speichern
3	Accu=Accu+[Store]	Ja	AND
4	Accu=Accu-[Store]	Ja	N-EXOR
5	IOtransfer	135	Read INS Status
		305	Read CDU Status
		175, 205	Program Inspect
		005, 375	Load Accu with 0 / 0xFF
		245, 255, 265	Gyro Torquing
6	Shift Right	Ja	006-176: Arithmetic; 206-376: Cyclic
7	Master Jump State	007-177	Transfer Bit of Accu to MJS
		207-377	Abfrage von HW-Zuständen
0	Special Functions	110, 120	Interrupts alle 20ms: Aus/An
		130-150	Wähle aktiven Speichersektor
		210	Nächste 3 oder 4 wird "Logic"
		220, 230	Lade Accu aus ROM (PSW+1, [Accu])
		260	if Accu=0 setze MJS
		300	Jump to [Accu] if MJS set
		320, 330	32 Bit An/Aus
		360, 370	Multiply: PA=P*Q, Divide: P=A/Q

Befehlssatz „minimalistisch“, d.h. kein Stack, kein Carry oder Zero-Flag, keine Unterprogramme und ungewöhnlich: Befehl ist in den unteren Bits codiert. Erklärung: Diese kommen bei der seriellen Übertragung zuerst aus dem ROM! **Features:**

- Umschaltbar 16/32 Bit Modus
- Aktivierbar: Logikbefehle statt ADD/SUB
- Es gibt MUL und DIV Befehle!
- JUMPs immer conditional via „Master Jump Status“ und Zieladresse im Akku
- Bit-Test Befehle für Akku und IO-Port-Bits vorhanden
- Für Daten: Table-Read (Indirekt via Akku aus ROM) sowie PGM-Read (der Instruktion folgende 16 Bit kommen in den Akku)
- Program-Inspect zum Debuggen via CDU
- Es muss externe „Programmierconsole“ gegeben haben: ROM-Disable und Buszugriff vorhanden!

Cycle Time 10-20µs



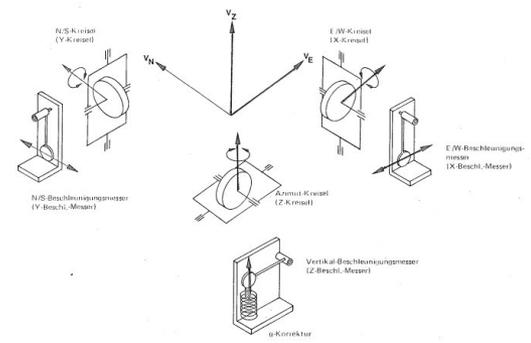
Computer VI – Digital computing – Integration...

$$V = \int (a + \text{Coriolis} + \text{Zentrifugal})$$

$$V_E = \int \left(a_E + 2\Omega \cdot v_N \cdot \sin\phi - 2\Omega \cdot v_Z \cdot \cos\phi + \frac{v_E \cdot v_N}{R_T + h} \cdot \tan\phi - \frac{v_E \cdot v^2}{R_T + h} \right)$$

$$v_N = \int \left(a_N - \frac{v_Z \cdot v_N}{R_M + h} - 2\Omega \cdot v_E \cdot \sin\phi - \frac{v_E^2 \cdot \tan\phi}{R_M + h} \right)$$

$$v_Z = \int \left(a_Z - g + \frac{v_N^2}{R_M + h} + 2\Omega \cdot v_E \cdot \cos\phi + \frac{v_E^2}{R_T + h} \right)$$



Erde ist keine Kugel!

$$\left| \begin{aligned} R_T &= a \left[1 + \frac{e^2 \sin^2\phi}{2} \right] \\ R_M &= a \left[(1 - e^2) + \frac{3e^2 \sin^2\phi}{2} \right] \\ a &= 6378388 \text{ m} \\ e^2 &= 67227 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \right.$$

Integration:
Berechnung von Geschwindigkeiten und Standort unter Berücksichtigung der Erddrehung (Coriolis-Kraft, Zentrifugalkraft)

LSB von $R_M + h$ bzw. $R_T + h$ ist 1280ft.

$$\left| \begin{aligned} g &= g_0 \left[1 + 5,28 \cdot 10^{-3} \sin^2\lambda \right] - 3,1 \cdot 10^{-6} h \\ g_0 &= 3208822 \text{ ft/s}^2 \\ h &= \text{Barometrische Höhe} \end{aligned} \right.$$



Computer VII – Digital computing

$$\sin \alpha = \sqrt{\left[\frac{1}{2} \sin(\pi - \varphi_D - \varphi_P) - \frac{1}{2} \sin(\varphi_D + \varphi_P) - \frac{1}{4} \sin(\varphi_D + \varphi_P - \Delta \lambda) - \frac{1}{4} \sin(\varphi_D + \varphi_P + \Delta \lambda) - \frac{1}{4} \sin(\pi - \varphi_D - \varphi_P - \Delta \lambda) - \frac{1}{4} \sin(\pi - \varphi_D - \varphi_P + \Delta \lambda) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_D + \Delta \lambda\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_P - \Delta \lambda\right) \right]^2}$$

(Großkreisgleichungen zur Berechnung von Richtung und Weg zu einem von zwei eingegebenen Zielen)

$$\sin \beta_0 = \frac{\sin r}{\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_P + \Delta \lambda\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}$$

$$\sin \chi_r = \frac{\sqrt{\left[\frac{1}{2} \sin[r \cos(\beta_0 - \beta) + \frac{\pi}{2} - \varphi_D] - \frac{1}{2} \sin[r \cos(\beta_0 - \beta) - \frac{\pi}{2} + \varphi_D] - \frac{1}{4} \sin[r \cos(\beta_0 - \beta) - \frac{\pi}{2} + \varphi_D + \beta_0] - \frac{1}{4} \sin[r \cos(\beta_0 - \beta) + \frac{\pi}{2} - \varphi_D - \beta_0] - \frac{1}{4} \sin[r \cos(\beta_0 - \beta) + \frac{\pi}{2} - \varphi_D + \beta_0] \right]^2 + \left[\frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{2} - \varphi_D + \beta_0\right] - \frac{1}{2} \sin\left[\frac{\pi}{2} - \varphi_D - \beta_0\right] \right]^2}}{\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_D + \beta_0\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_D - \beta_0\right)}$$

$$y = \sin r \cdot \sin(\beta_0 - \beta)$$

$$y_r = y_r + 0,200704 \cdot v_y + 0,125(y - y_r)$$

$$v_y = v_w \sin \chi - v_e \cos \chi$$

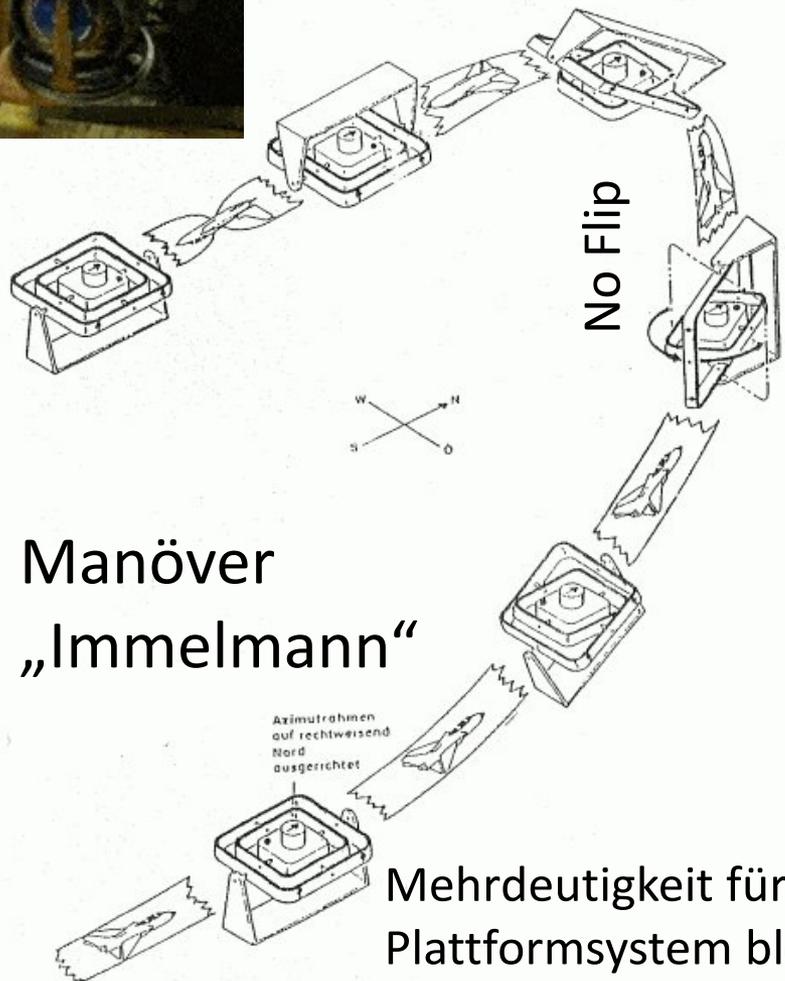
$$t = \frac{r}{v_w}$$

Zu lösende Frage:
 Kürzester Weg auf Ellipsoid-Oberfläche von A nach B?
Tip:
 Das ist keine Gerade!





Aerobatisches INS & Gimbal-Flip...



Manöver „Immelmann“

Anordnung der Achsen von „außen nach innen“:

Roll – Pitch – Yaw

- Looping führt dazu, dass Roll- und Yaw-Achse parallel sind
- Gimbal-Lock & Verlust der Ausrichtung

Lösung: 4. Achse (IR: Keine 360° nötig):

(Outer-Roll) – Pitch – (Inner-Roll) – Yaw

- Damit geht Inner-Roll nicht mit und Alignment bleibt immer erhalten
- „aerobatisches INS“,

Mehrdeutigkeit für Pitch=90° wird zum „**Gimbal-Flipping**“ benutzt → Plattformsystem bleibt „rechtshändig“ – Einfacher für Computer und notwendig für analoge „Nutzer“.



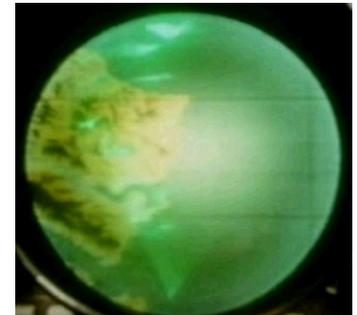
Positionsupdates via CRPMD...



Pilot

Genauigkeit INS nur 1nm/h (wenn's gut geht). Daher im Einsatz regelmäßige Positionsupdates notwendig: Navigator bringt Radar (GMR) und projizierte Karte am Display (CRPMD) mit Joystick zur Deckung → Positionsupdate für FIN & Computer!

Navigator



Einschub: SciFi?

Interessanter Vergleich:

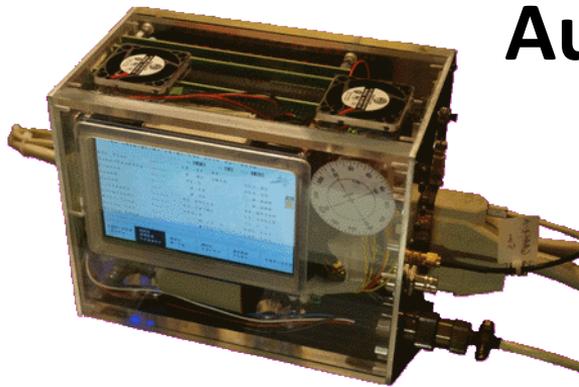
Originale Serie Star-Trek von 1969 (SciFi)

vs.

Tornado, Entwicklung ab 1970, Erstflug 1974.

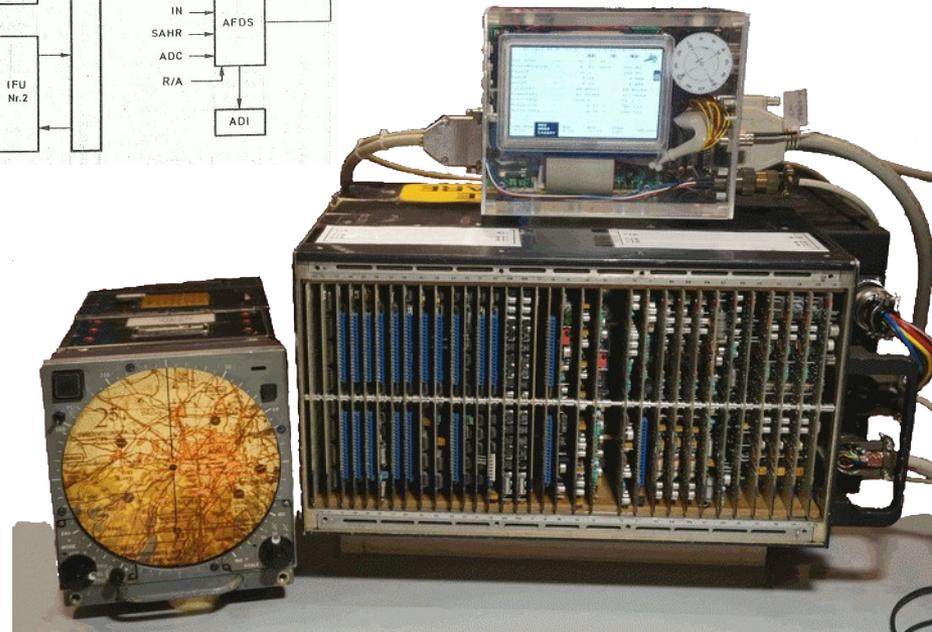
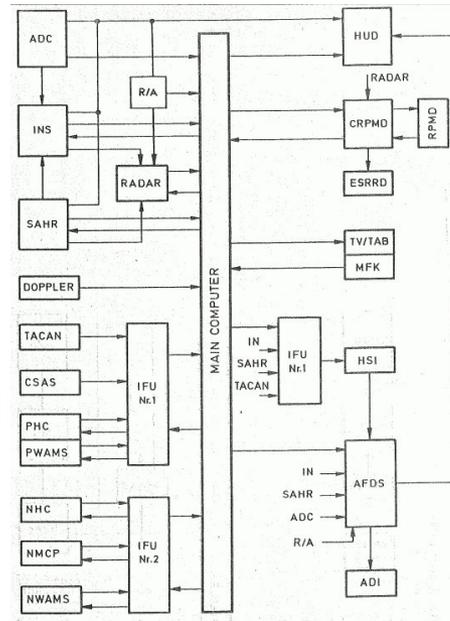


Ausstellungsbeitrag FIN+RPMD...



Selbstgebauter „Logger“ ersetzt Missionscomputer, CRPMD – und mehr:

- Liest (L)INS (CDU-Sniffing)
- Logging SD-Karte (Debugging)
- Steuerung RPMD (Mapper)
- Broadcast BlueTooth (f. Tablet)
- GPS und GPS repeater
- Analog Out (Heading etc)
- RS232 Monitoring



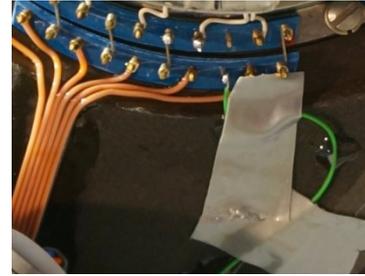
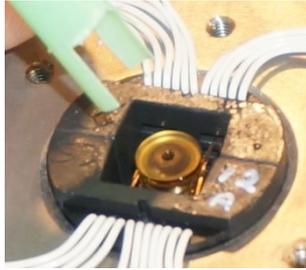
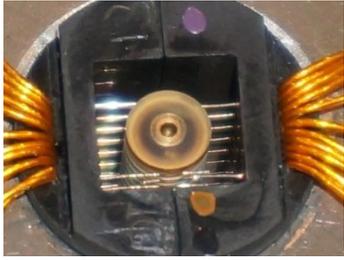


Vielen Dank fürs Zuhören!

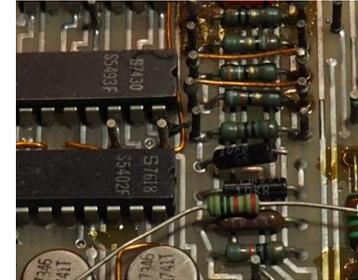
Danke an Alf, Klaus, Florian, Chris, Rob, Peter, H. Kiening, H. Singer, Steve, Jan Dirk, die SELEX SAS und das RAF Museum (London)



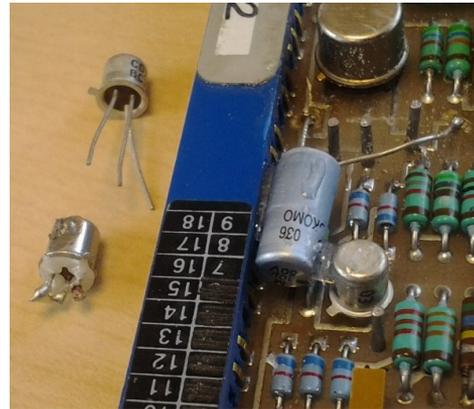
Appendix I – „Maintenance I“ ...oder was ich schon alles flicken musste



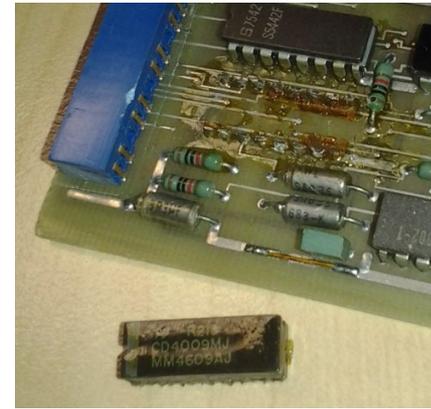
Schleifringe



Defekter Stecker



BITE-Problem



Referenzspannung „off“
Problem in den Stores

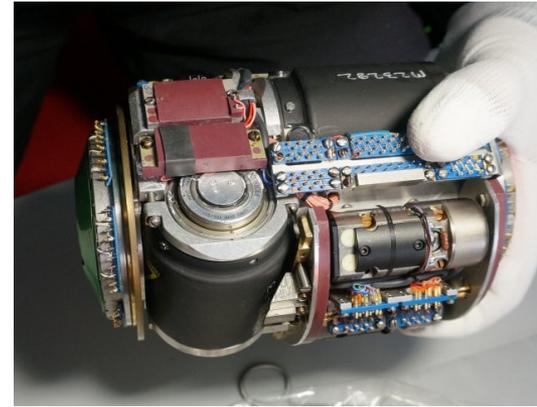
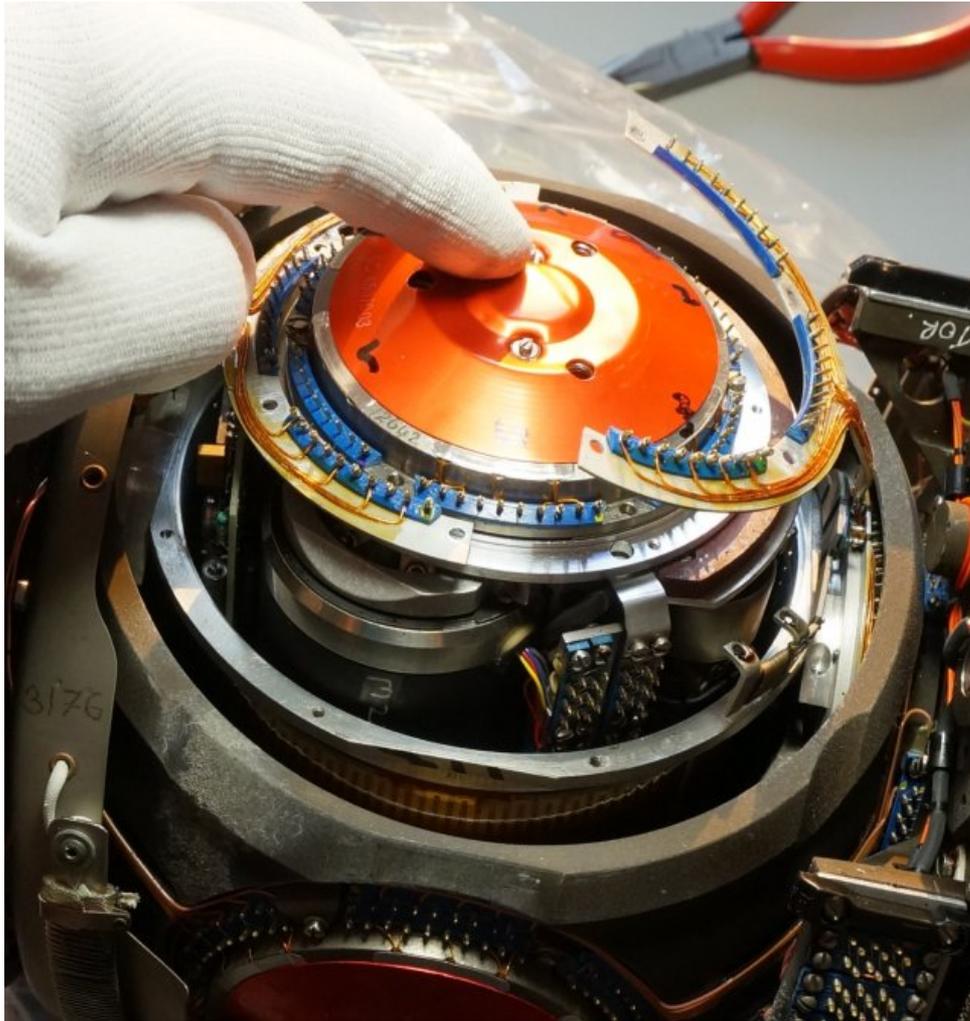


Fehler im digitalen Computer „Function Decode“



Verschiedenste Netzteilprobleme

Appendix II – „Maintenance II“... ..die große Operation



Ausbau Azimuthcluster wegen „versenkter“ Schraube...

Appendix III – Alignment...

Erstes Alignment pre-flight ist wichtig (alle Achsen auf besser als 0.02° ausrichten) und schwierig: Ggf. System noch nicht im thermischen Gleichgewicht!

1. Schritt (Coarse LH6)

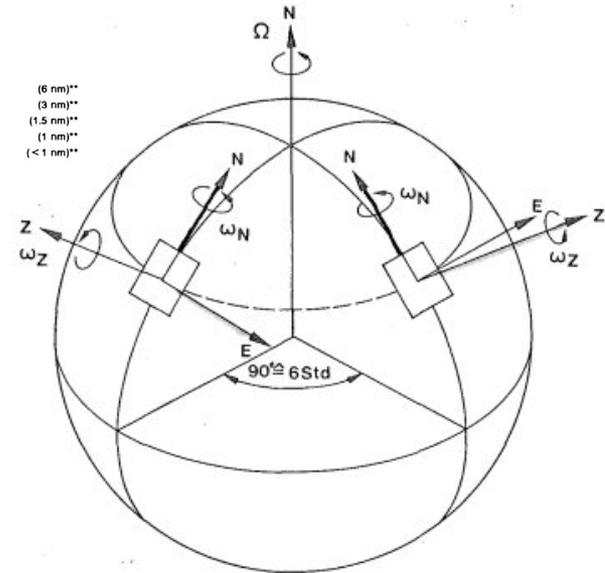
Mittels Beschleunigungssensoren, Yaw wie eingegeben/gespeichert.

1a. (5) Gyros anwerfen – Gyro-Stabi.

2. Schritt (Fine 4–0)

Gyrocompassing: Messung der Erddrehung mit den Gyroskopen → Bestimmung der Erddrehachse und Einstellung von Yaw, so daß EW-Gyro keine Drehung „sieht“. **Später Nachführung (Erddrehung und Navigation) via „Torquing“ durch digitalen Computer!**

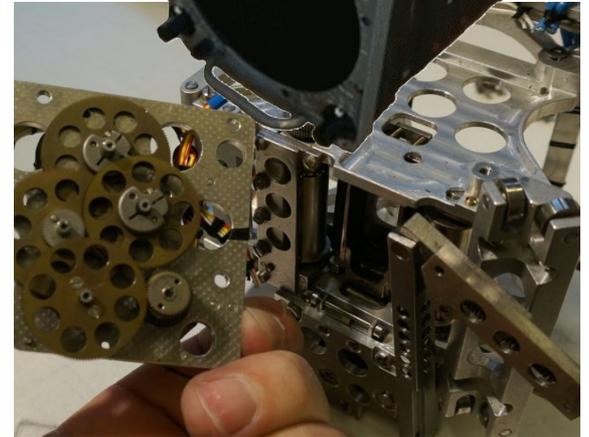
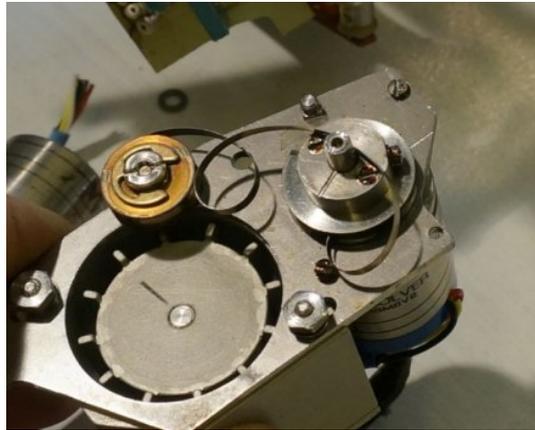
Coarse alignment in progress
Fine alignment in progress
Very poor alignment
Poor alignment*
Fair alignment*
Good alignment*
Very good alignment*



Appendix IV: RPMD – Internals...

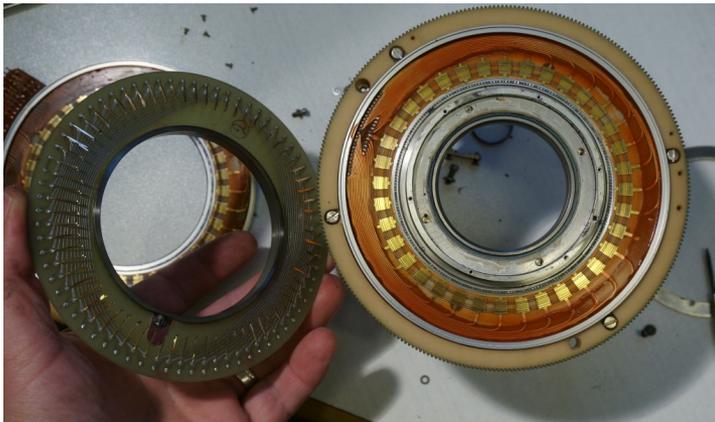


Projektor Yaw/N-S + 1 Achse Film
E-W, Genauigkeit $\sim 0.05\text{mm}$ auf
12m Länge $\rightarrow 240000\text{LSB!}$



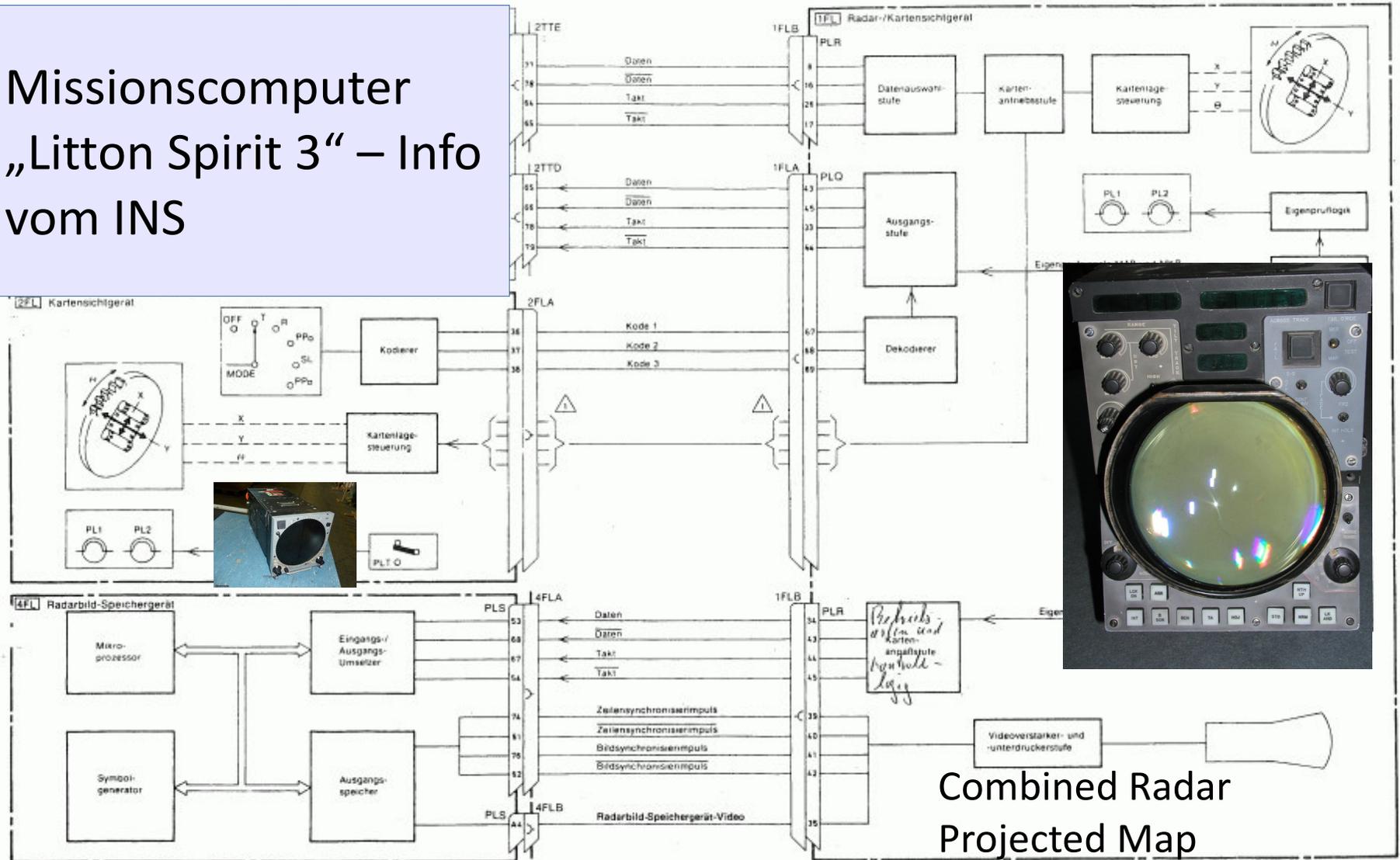
Exotische „Schleifringe“

Feinmechanik (spielfrei) 18Bit!



Appendix VI: Displays – Wie läuft's im „Toni“?

Missionscomputer
„Litton Spirit 3“ – Info
vom INS



Ground Mapping Radar

Combined Radar
Projected Map
Display – CRPMD

Appendix VII – „Quellen“...

VEBEG – DAS VERWERTUNGSUNTERNEHMEN DES BUNDES



Ausschreibung/Los: 1442470.005

Teile für Flugnavigationsgeräte:

- 280 Rechnerbaugruppen "ECR Armament Controll" aus Flugsimulator;
- 2 Accelerometer "Ferranti" Typ FA2-F;
- 28 Repeater "Ferranti";
- 132 Trägheitsnavigationssysteme "Ferranti";
- 7 Heizelemente "Gimbal";
- 15 Panel u.a.
- (10 Pos., unverbindl. Transportgewicht 4.000 kg)



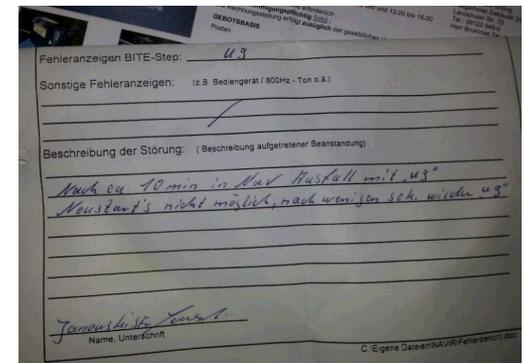
DATEN

BSTK: 8EV

BEMERKUNG:

Nur am 09.10.2
Gültige Person:
Ausführend:
Die Rechnungs

GEBOTSBASI:
Posten

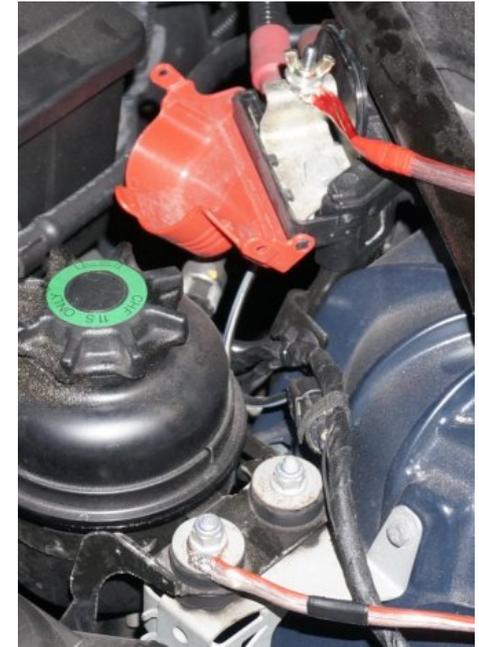


„VEBEG“ (De), eBay (UK), VwinMe (UK), Govliquidation (US), Helmut Singer (De)...

Appendix VIII: Bisherige „Events“...



„Rundfahrt“ FIN
und LINS in BMW
(schon ohne RPMD
größtes Problem:
Energieversorgung)



Quartalsmäßige
Treffen...



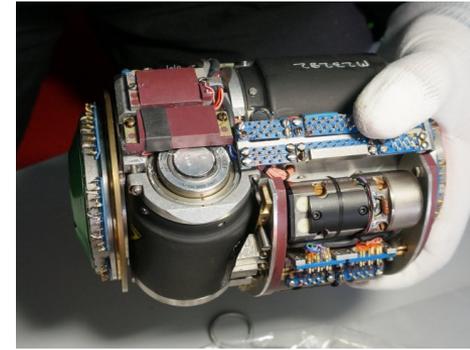
DANKE an alle FINner...

...und 2015 Besuch
der Tornado-Wartung
der RAF in Marham/UK

Appendix IX (Fernziele)



- Rettung/Instandsetzung weiterer INS...
- Erreichen der Spezifikation (<math><1\text{nm}/\text{h}</math>)...
...dazu ggf. Tausch von Sensoren im Azimuthcluster.
- Anschluss HSI, ADI und Altimeter
- Vorführungen
- Weiter lernen :-)

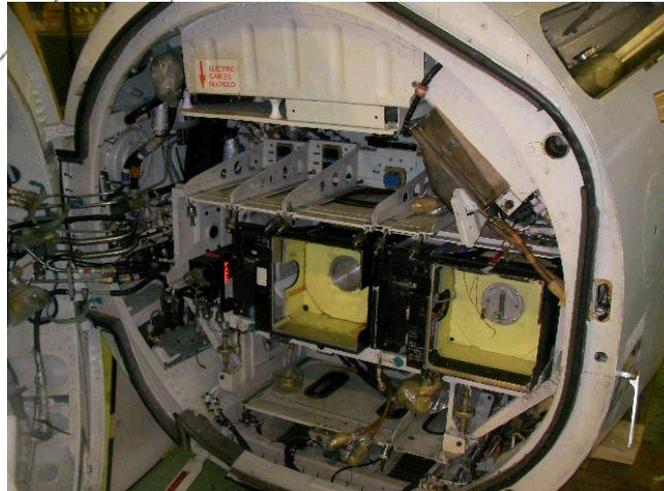
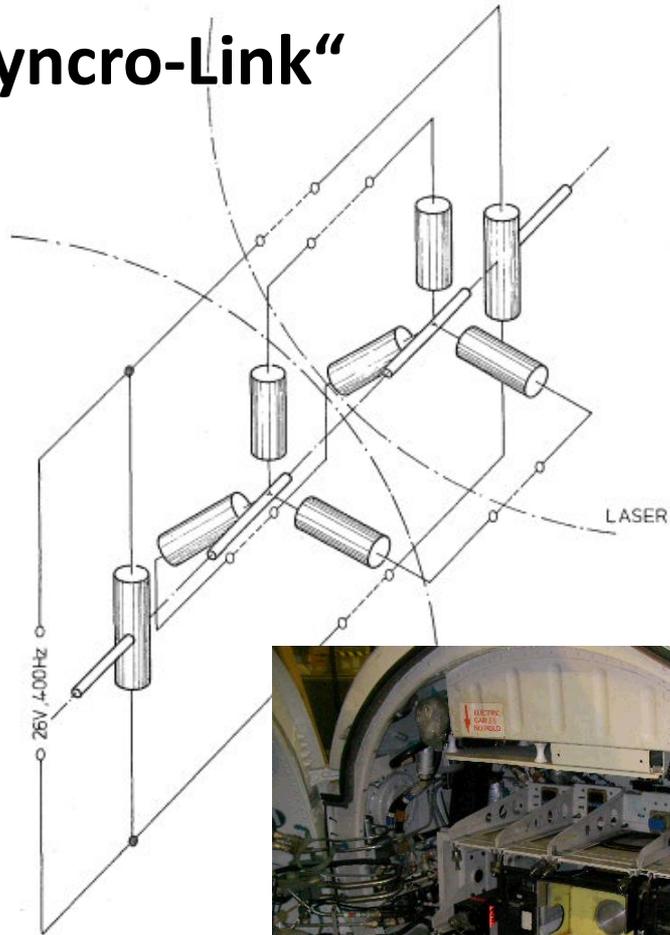


Mobile Tests...
...airborne again?



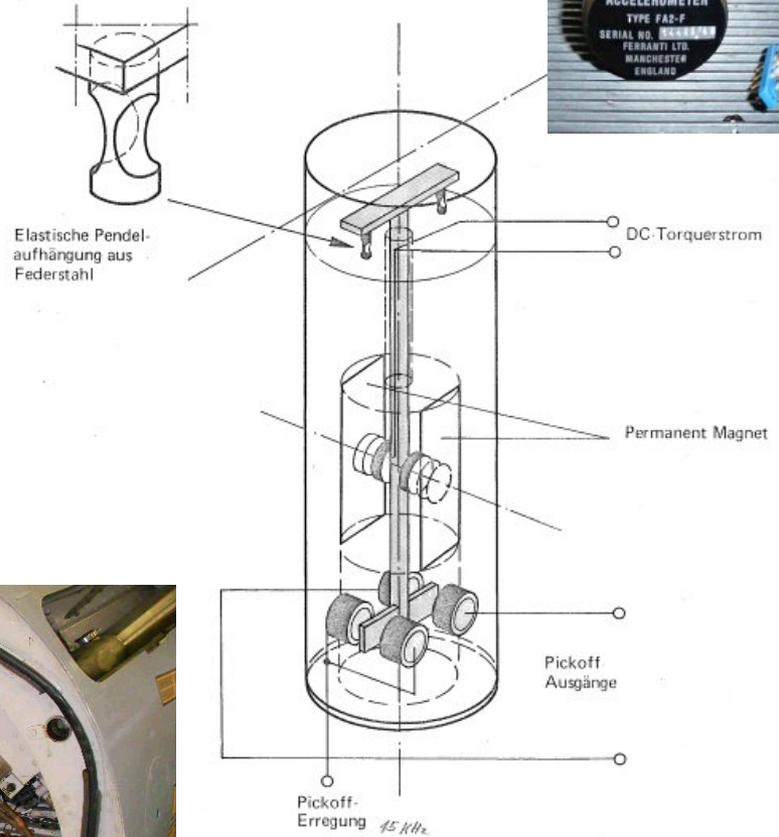
Appendix X...

„Syncro-Link“



Dual-FIN

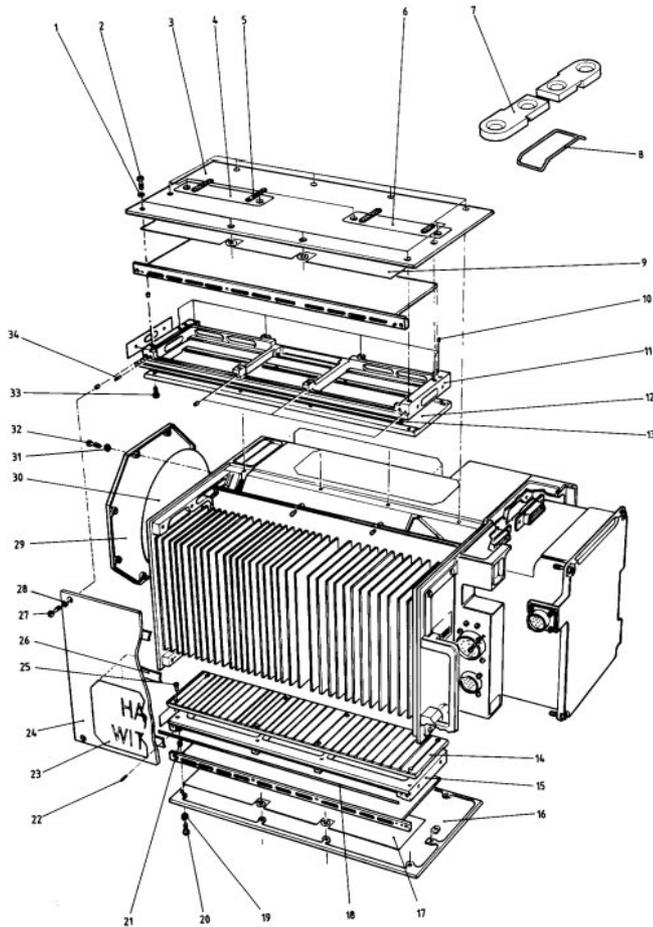
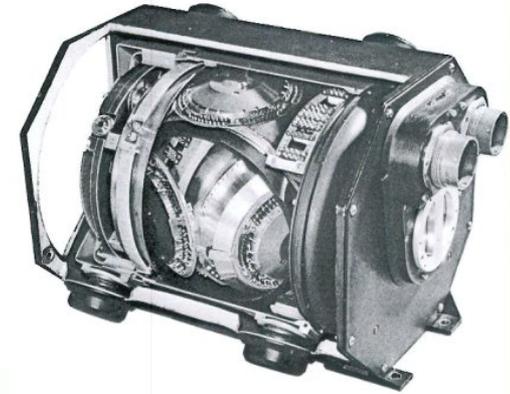
ADV →



Accelerometer

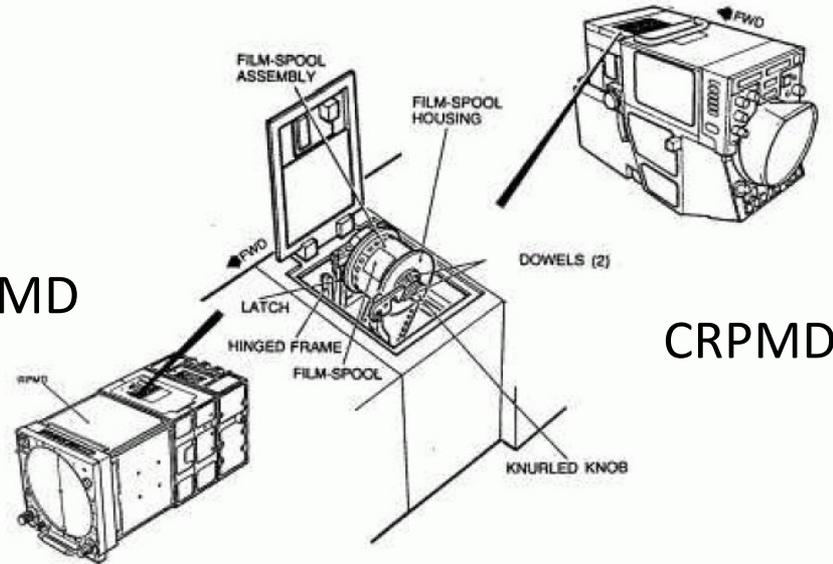
Appendix XI...

Plattform
„Harrier“



„Aufbau INS“

RPMD



CRPMD

Filmwechsel/Projektor

Appendix XII – Basteln@Home

