



Das Observatorium als multidisziplinäre Ingenieuraufgabe

Vortragsreihe zu SOFIA
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
2. Oktober 2014

Jörg F. Wagner, Thomas Keilig et al.
Deutsches SOFIA Institut
Universität Stuttgart







Dryden Flight Research Center

SOFIA

**SOFIA 747SP open door flight fully
exposes infrared telescope for the first time
December 18, 2009**

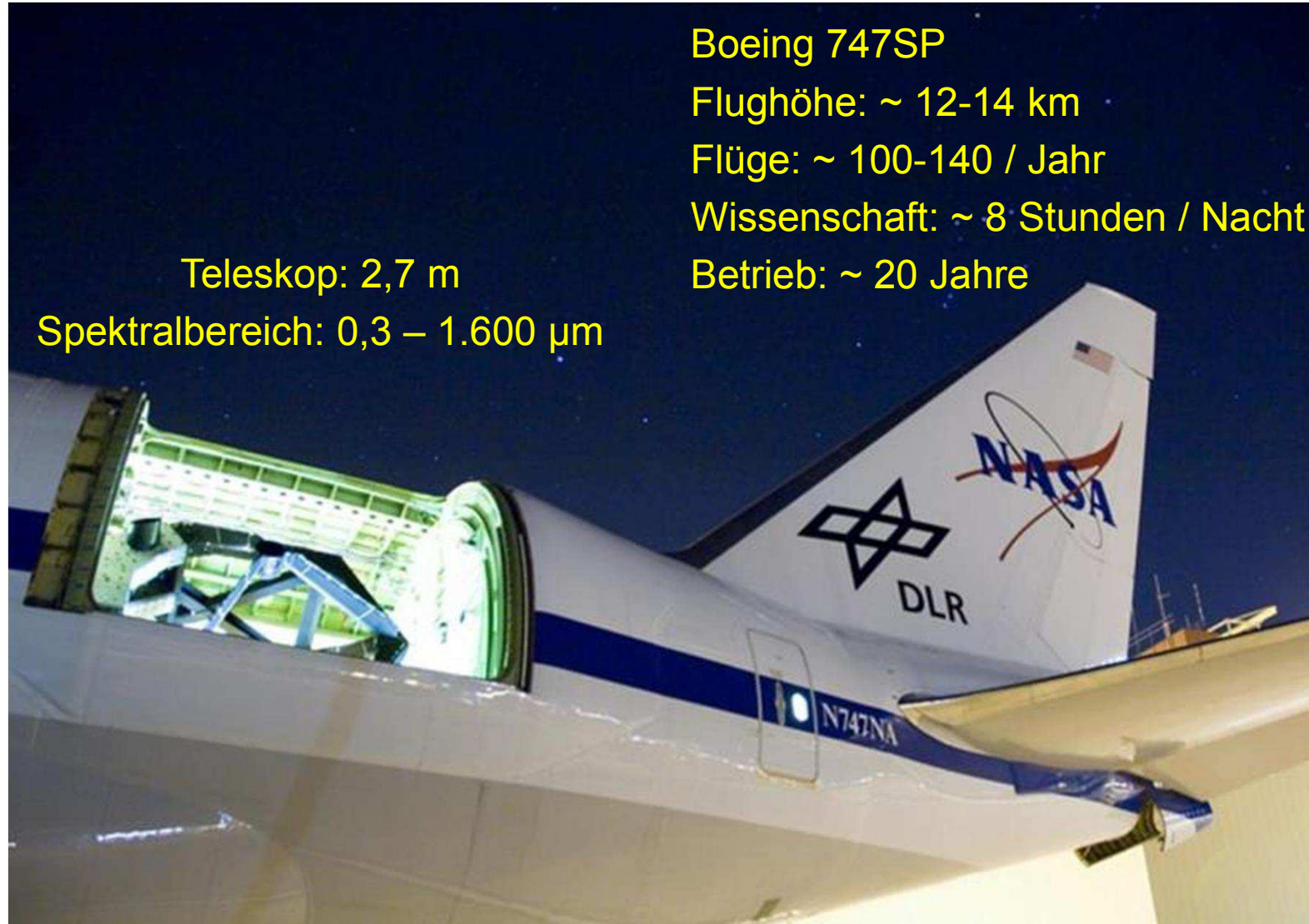
Flugdauer: 1 h 20 min
Höhe: 5 km
Geschwindigkeit: 500 km/h



S tratosphären
O bservatorium
F ür
I nfrarot
A stronomie

deutsch-amerikanisches Gemeinschaftsprojekt
80% NASA, 20% DLR





Teleskop: 2,7 m
Spektralbereich: 0,3 – 1.600 μm

Boeing 747SP
Flughöhe: ~ 12-14 km
Flüge: ~ 100-140 / Jahr
Wissenschaft: ~ 8 Stunden / Nacht
Betrieb: ~ 20 Jahre



Aufbau des Observatoriums



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





Ingenieursdisziplinen

Aerodynamik und Aeroakustik

Flugzeugbau und Leichtbau

Luftfahrtzulassung

Mechatronik und Regelungstechnik

Projektmanagement

Prozessrechentechnik, Echtzeitdatenverarbeitung

Strukturdynamik

Technische Optik

Versuchstechnik incl. Flugerprobung

...

Instrumentenbau (Halbleiterphysik, Kryotechnik usw.)



Inhalt

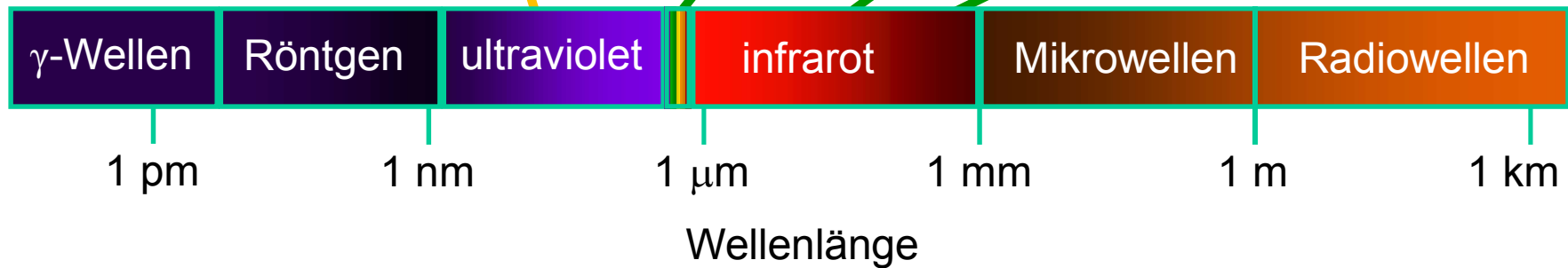
- 1 **Warum SOFIA?**
- 2 **Entstehungsgeschichte von SOFIA**
- 3 **Technik von SOFIA**
- 4 **Erprobung von SOFIA**



1 Warum SOFIA?

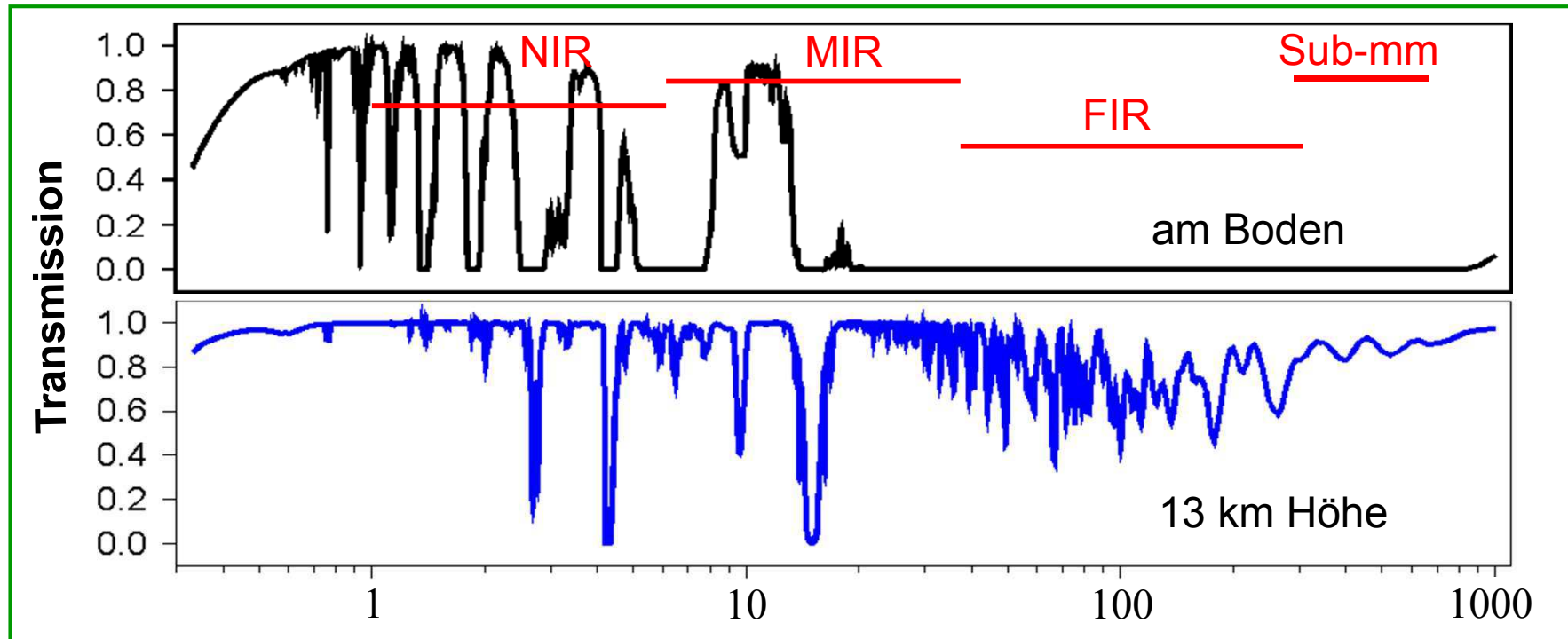


„Vollständigkeit“ des Wellenlängenspektrums





Strahlenabsorption durch Wasserdampf in der Atmosphäre



infrarote Region: 750 nm - 1000 μm

visuell: 400 nm - 750 nm





Früher Vorgänger von SOFIA

1967-1974

Lear Jet Observatory (LJO)

Durchmesser Primärspiegel: 30 cm



After *Galileo's* success, the next step in airborne astronomy was a 12-inch infrared telescope (inset) mounted inside a Lear Jet (above). Using this telescope, astronomers confirmed that Jupiter and Saturn radiate more energy than they receive from the Sun, meaning both planets have substantial internal energy sources.





Unmittelbarer Vorgänger von SOFIA

1974 – 1995

Kuiper-Airborne-Observatory (KAO) – C-141 Starlifter
Durchmesser Primärspiegel: 91,5 cm, Cassegrain-Teleskop





Unmittelbarer Vorgänger von SOFIA





Frühe Studie zu SOFIA, 1985





Das Trägerflugzeug



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





Das Trägerflugzeug

1997 Verkauf an die NASA, 1999 Überführung nach Waco, TX



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





Umbau in Waco, TX

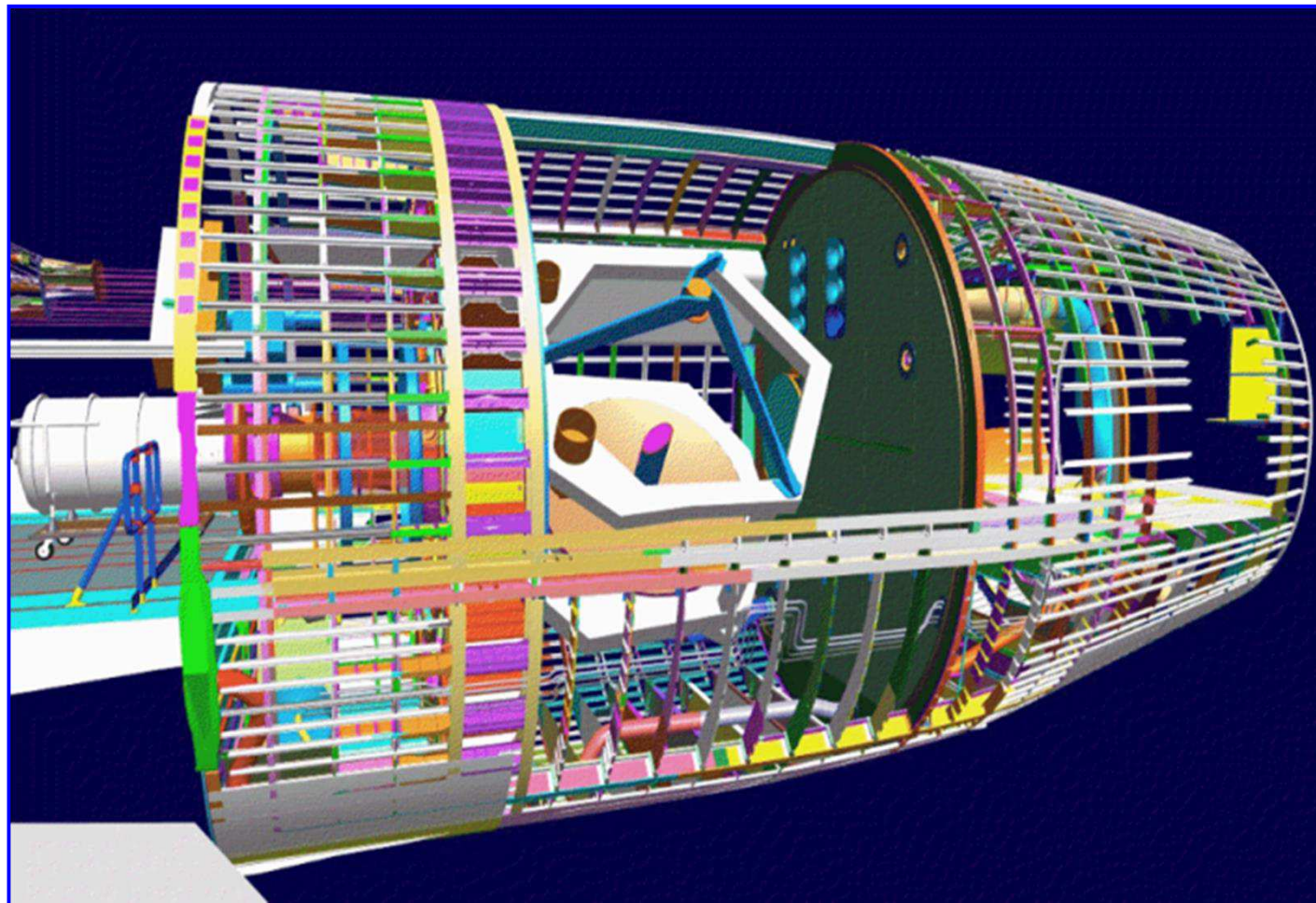
Zustand Sommer 2005





Umbau in Waco, TX

Strukturmodifikation





Umbau in Waco, TX

Testaufbau 1998-2000





Deutscher Beitrag: Teleskop

Hersteller: *MAN*, heute *MT Mechatronics* (Augsburg, Mainz)



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy



Anlieferung September 2002



Einbau Juli 2003





Überführung zur NASA

NASA Dryden Flight Test Center (31. Mai 2007)



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





Überführung nach Palmdale

NASA Dryden Aircraft Operations Facility (15. Januar 2008)



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





NASA Dryden/Armstrong Aircraft Operations Facility





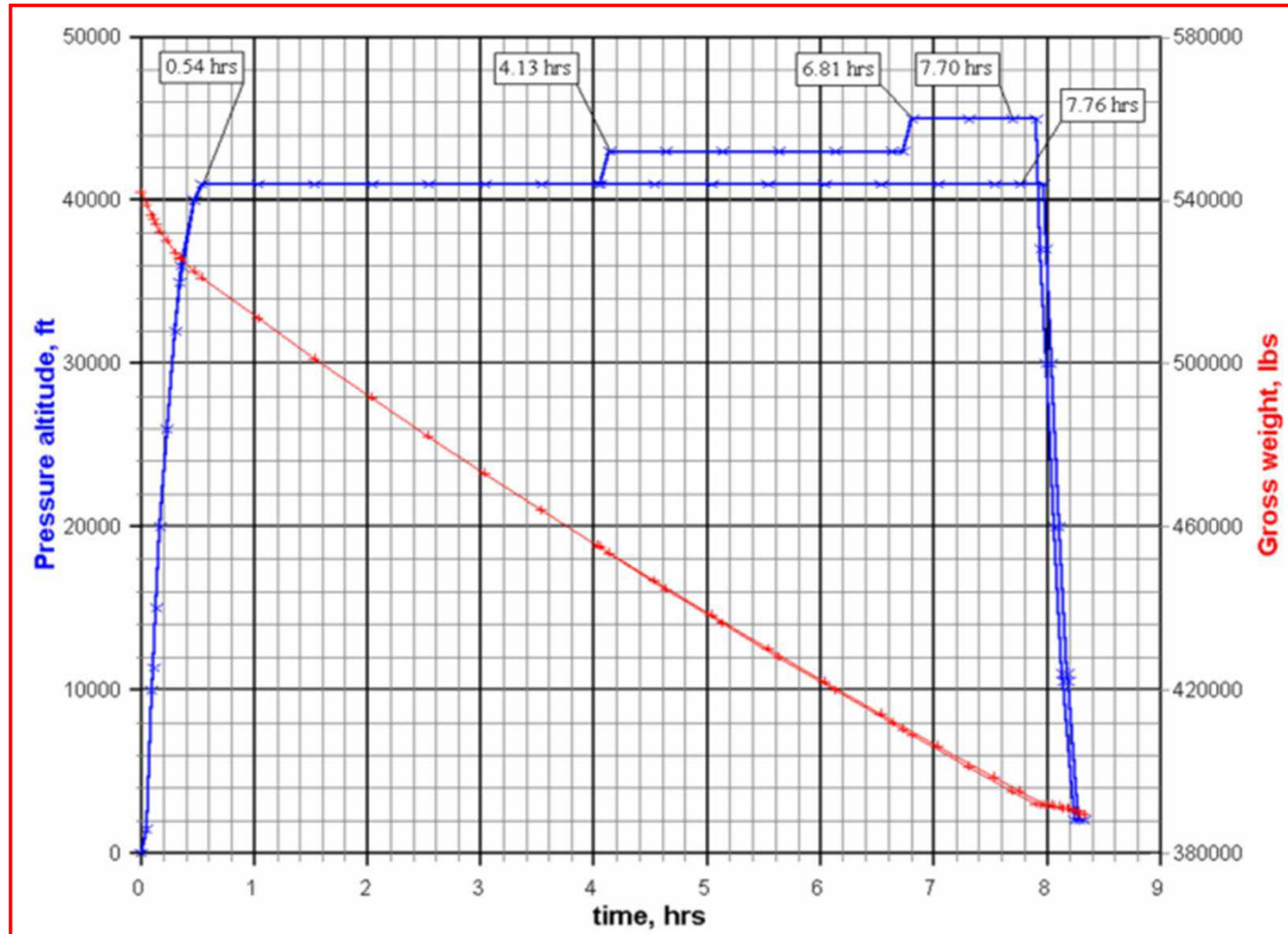
Chronologie

1985	erste Studien
1997	Erwerb des Flugzeugs
1999 - 2007	1. Umbauphase in Waco, TX
26.04.2007	Erstflug , Beginn 1. Phase Testflugbetrieb Überführung nach Kalifornien
19.12.2007	Teleskop erstmals im Flug aktiviert
15.01.2008	Überführung nach Palmdale Beginn 2. Umbauphase Beginn großer Bodentests am Teleskop
Nov. 2009	Beginn 2. Phase Testflugbetrieb
18.12.2009	1. Flug mit offener Türe
26.05.2010	„First-Light“-Flug , Beginn 1. Wissenschaftsphase
Dez. 2010 - Nov. 2011	6 „Initial-Science“- , 28 „Basic-Science“-Flüge
Jan. - Dez. 2012	3. Umbauphase
April 2013	Aufnahme des regulären Wissenschaftsbetriebs
Juli 2013	Beobachtungsflüge von Neuseeland aus
21.02.2014	„Full Operational Capability“





Warum eine Boeing 747SP?

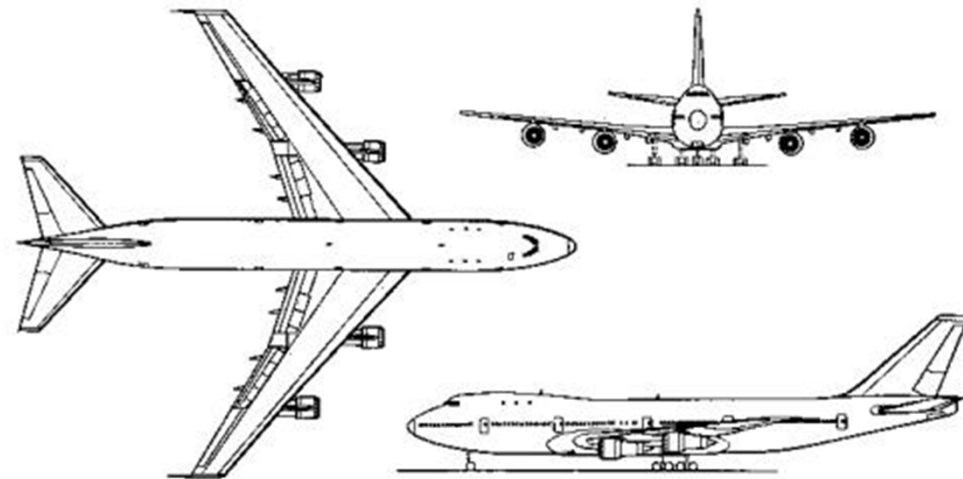




Technische Daten

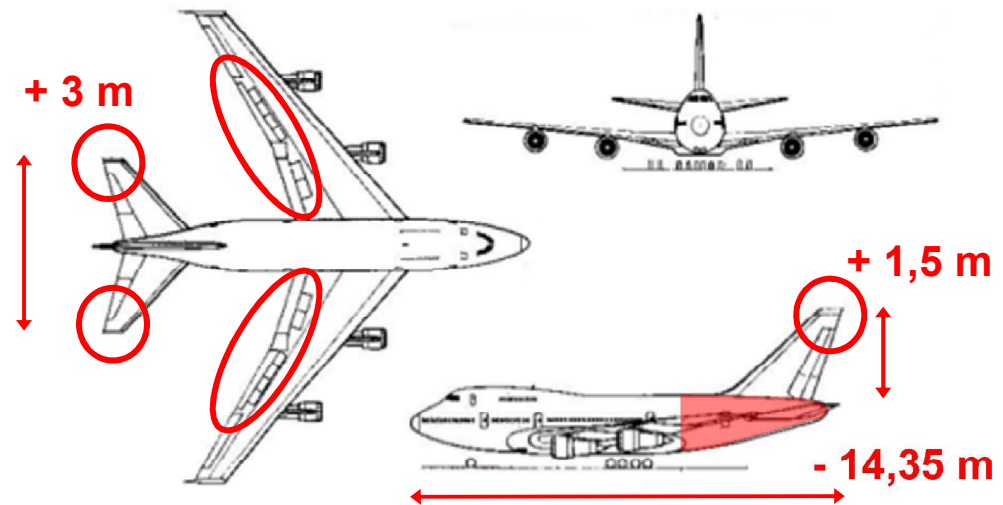
B747-200

Erstflug: 1970
 Länge: 70,6 m
 Höhe: 19,3 m
 Leergw.: 173 t
 Pax: 420 + 32
 Reichw.: ~10.000 km



B747SP

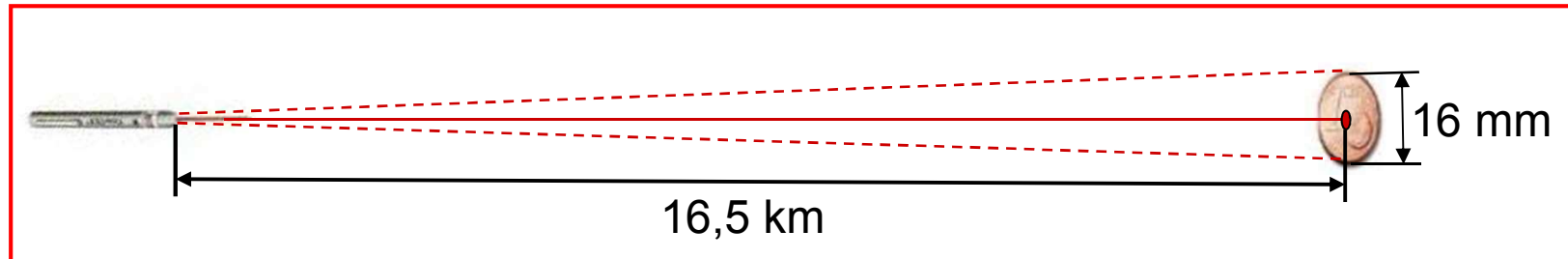
Erstflug: 1975
 Länge: 56,3 m
 Höhe: 19,9 m
 Leergw.: 146 t
 Pax: 229 + 32
 Reichw.: >13.000 km
 Stückzahl: 45





Spezifikationen des Observatoriums

- Ausrichtgenauigkeit: $0,2'' = 0,000056^\circ$

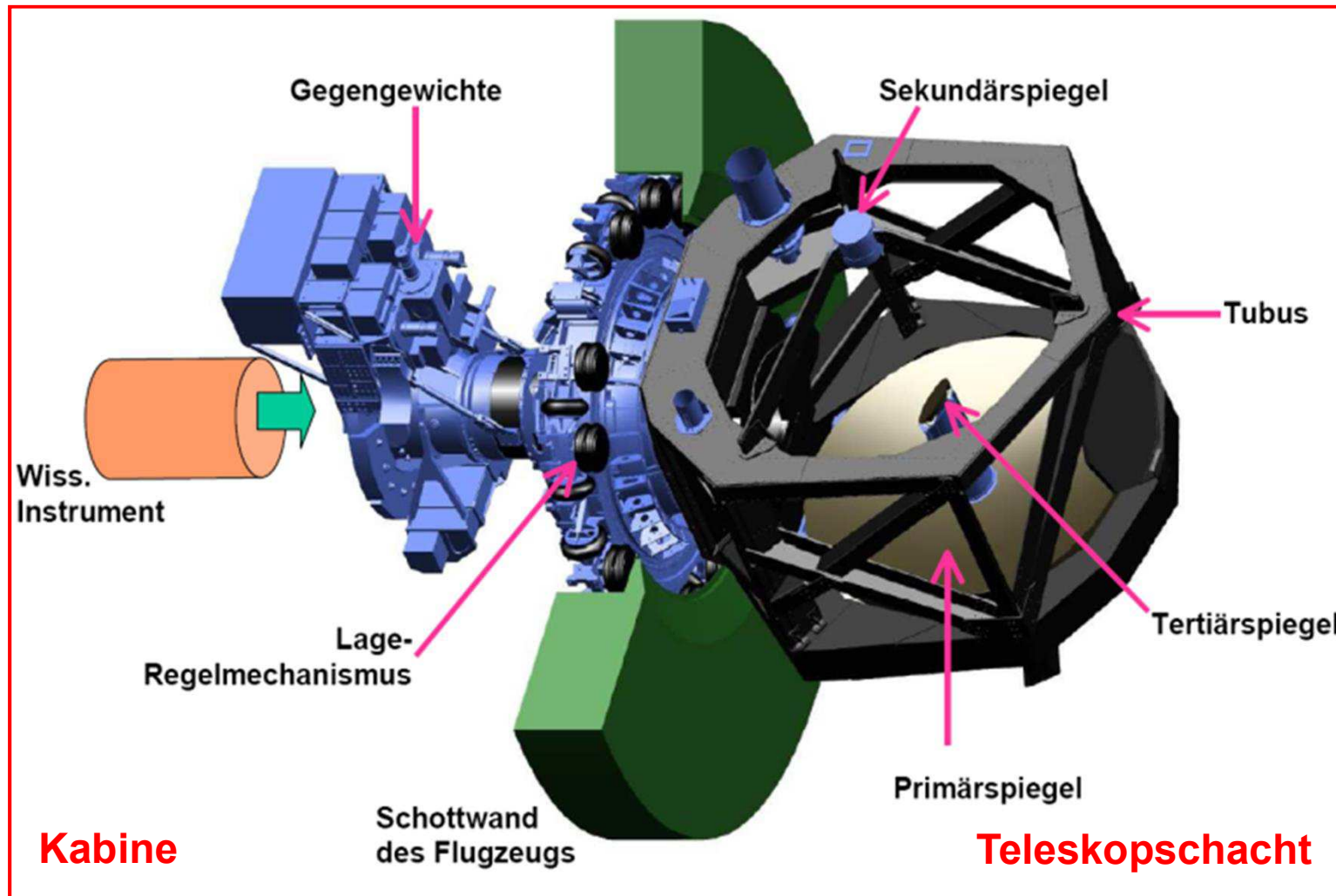


- Öffnungswinkel Kameras: Wide Field Imager (WFI): 6°
Fine Field Imager (FFI): $70'$
Focal Plane Imager (FPI): $8'$
- Detektierbare Helligkeit: Stern 16. Größenordnung bei 4 s Integrationszeit
- Gewichte: Teleskop: 11 t
gesamter Einbau: 17 t



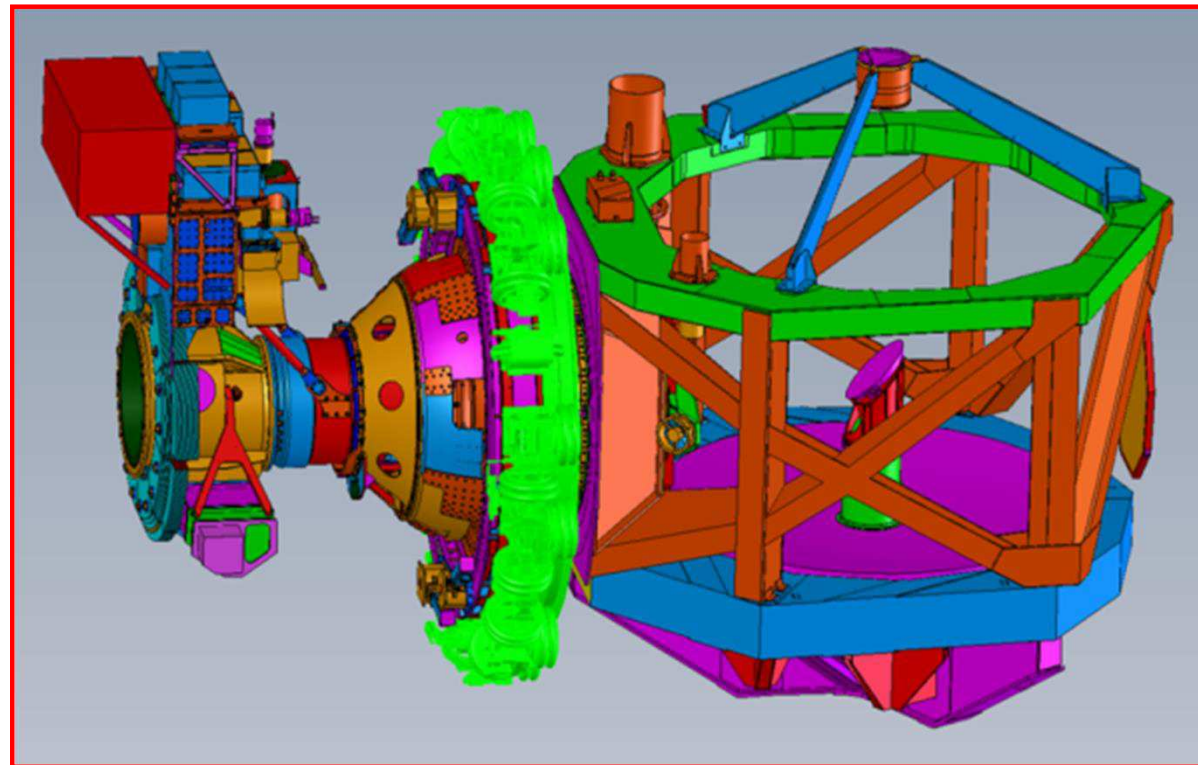


Aufbau des Teleskops





Aufbau des Teleskops



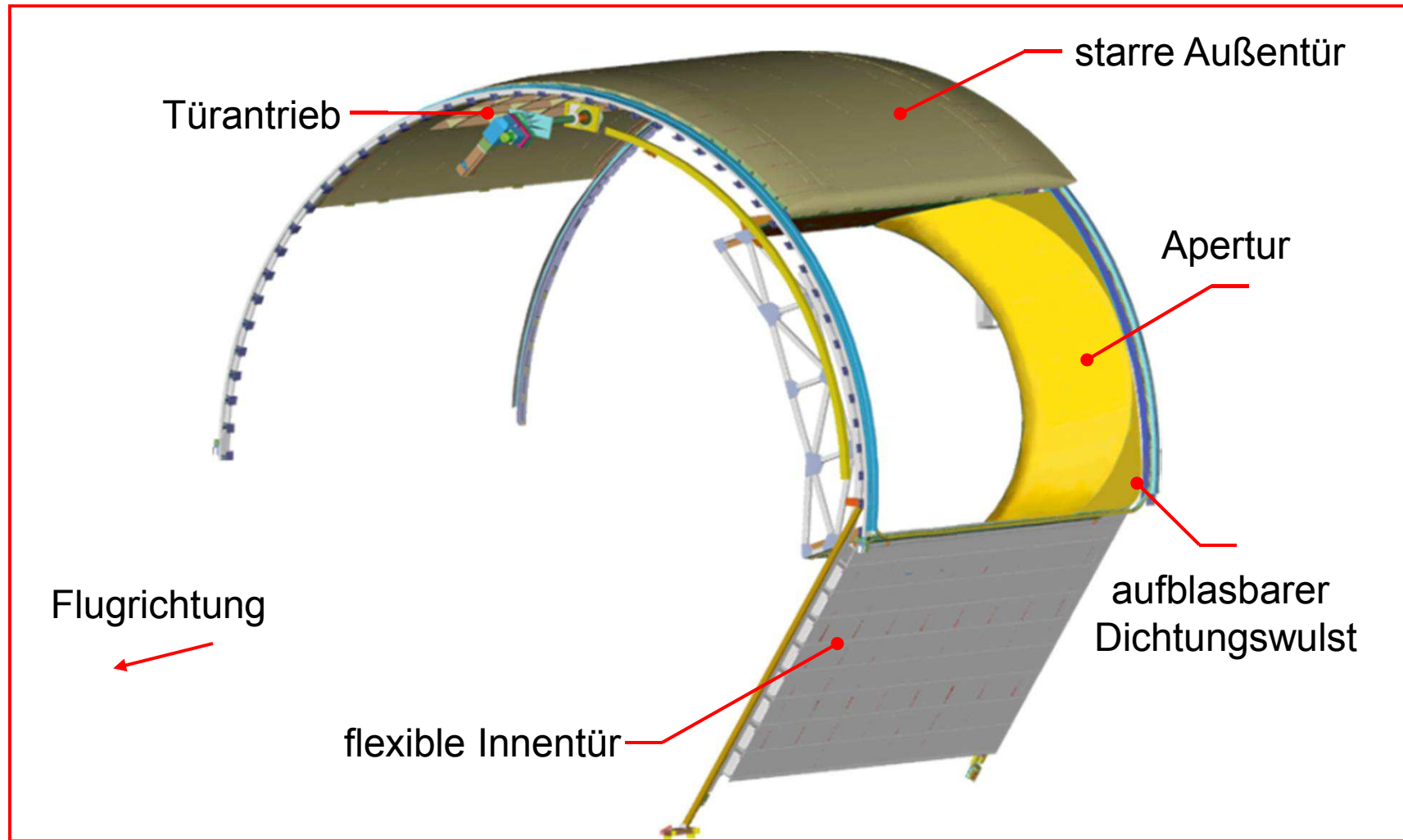
Fine drive:
räumliche Drehung,
Bereich $\pm 3^\circ$

Coarse drive:
Elevationsbereich
 $20^\circ - 60^\circ$



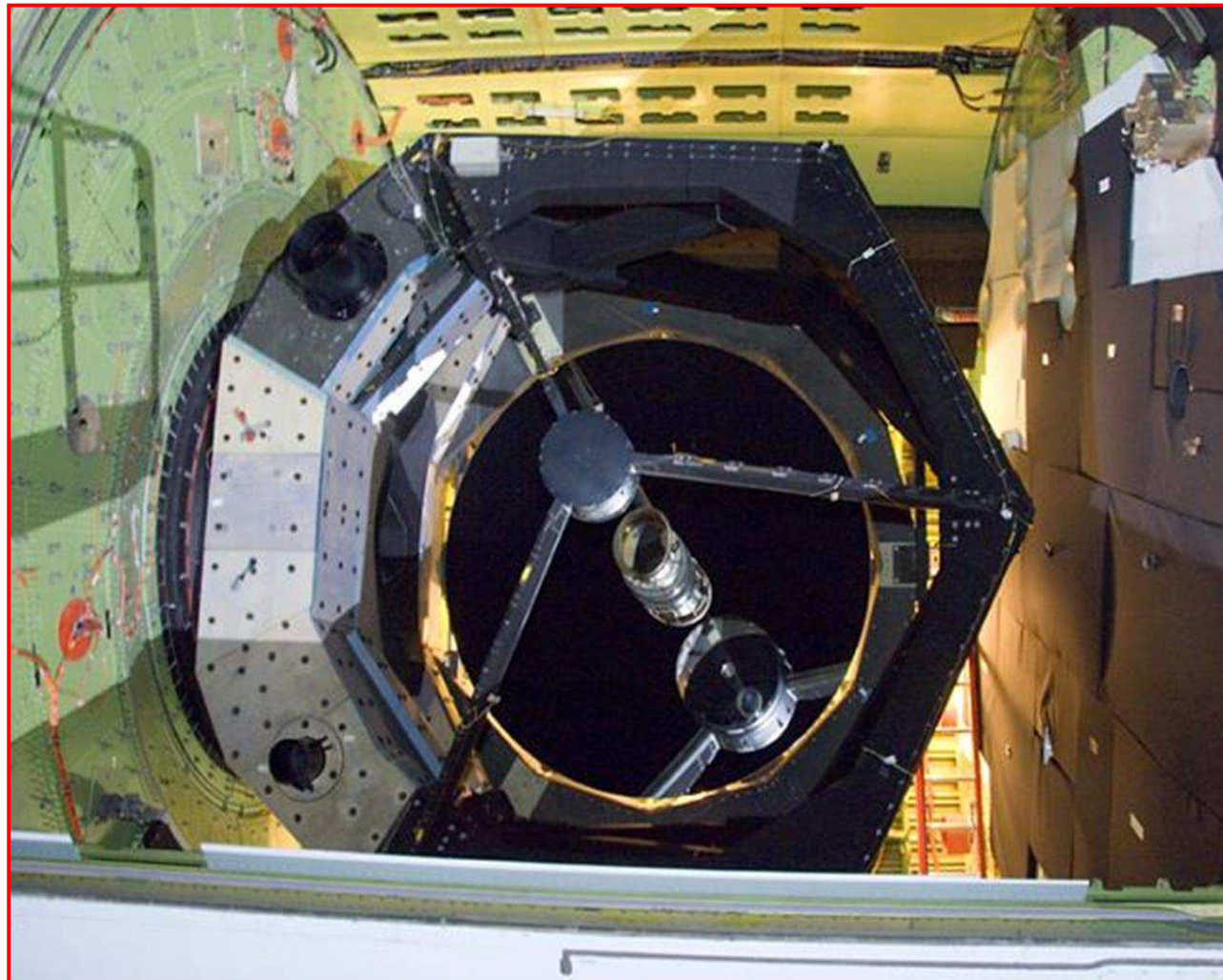


Das Türsystem



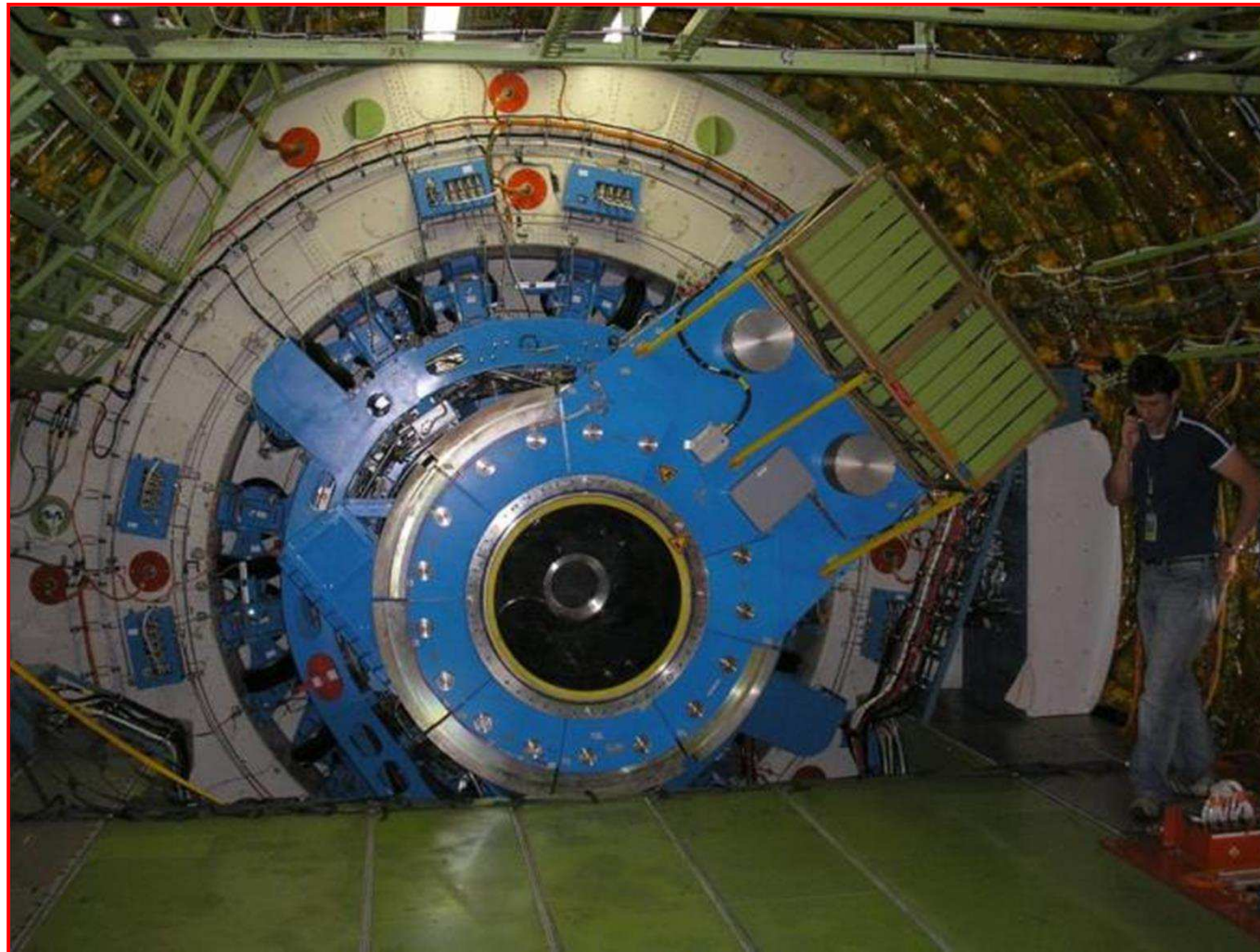


Blick in den Schacht



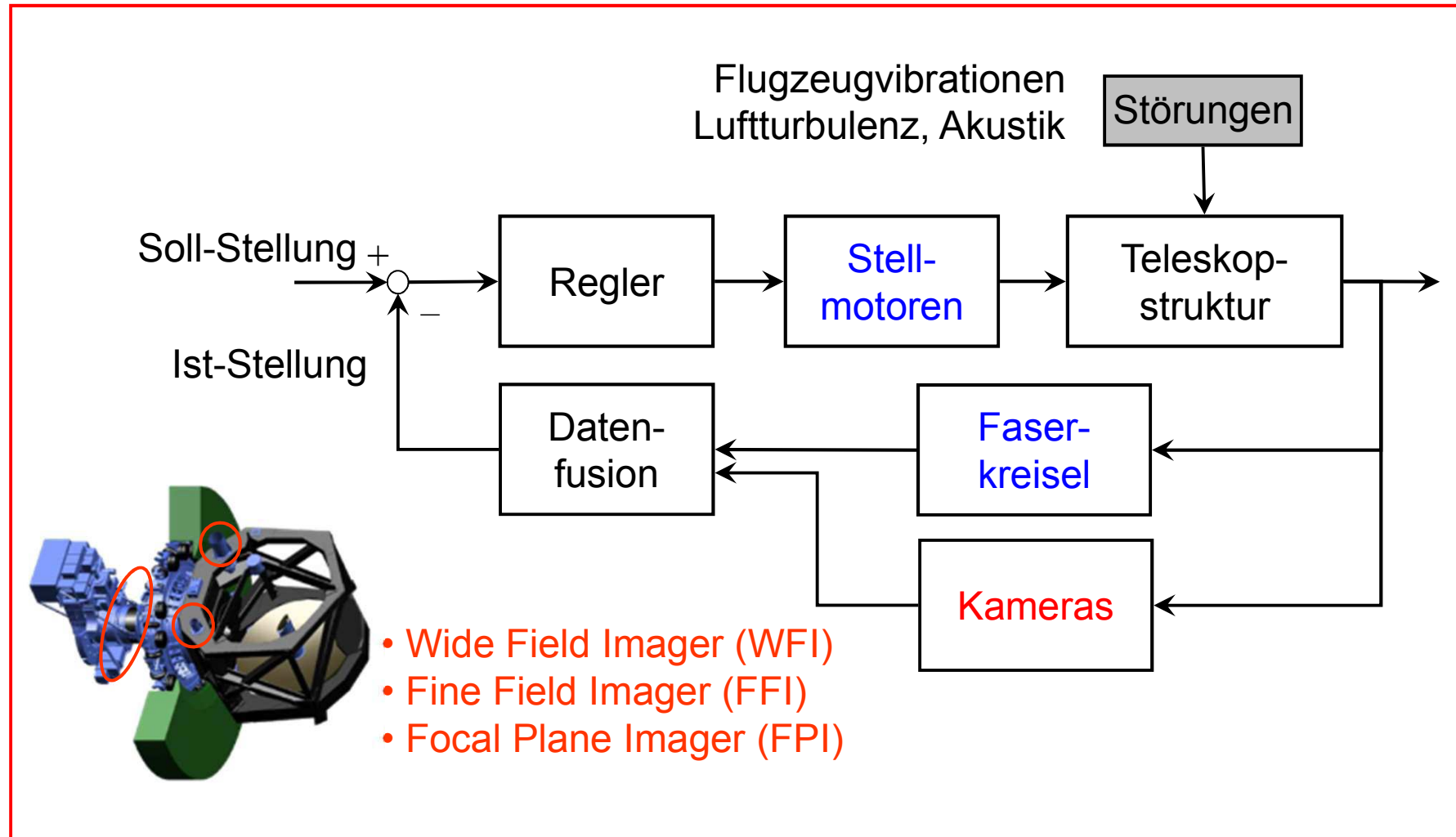


Kabinenseitiger Blick



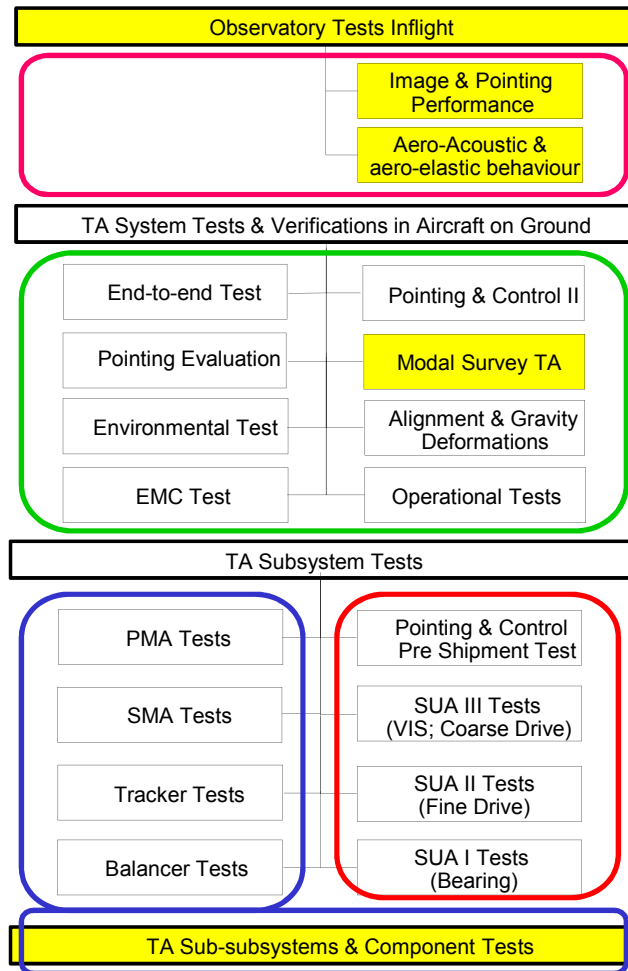


Das Lageregelungssystem





Teststruktur für das Teleskop



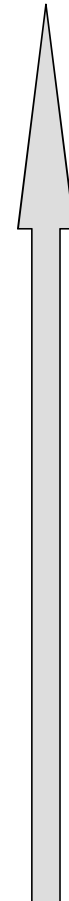
Observatorium im Flug
ab 2009

Observatorium im Bodenbetrieb
ab 2007

Subsysteme (Teleskopintegration)
ab 2002

Subsysteme (Hersteller)
bis 2002

Abgleich mit Simulationsrechnungen

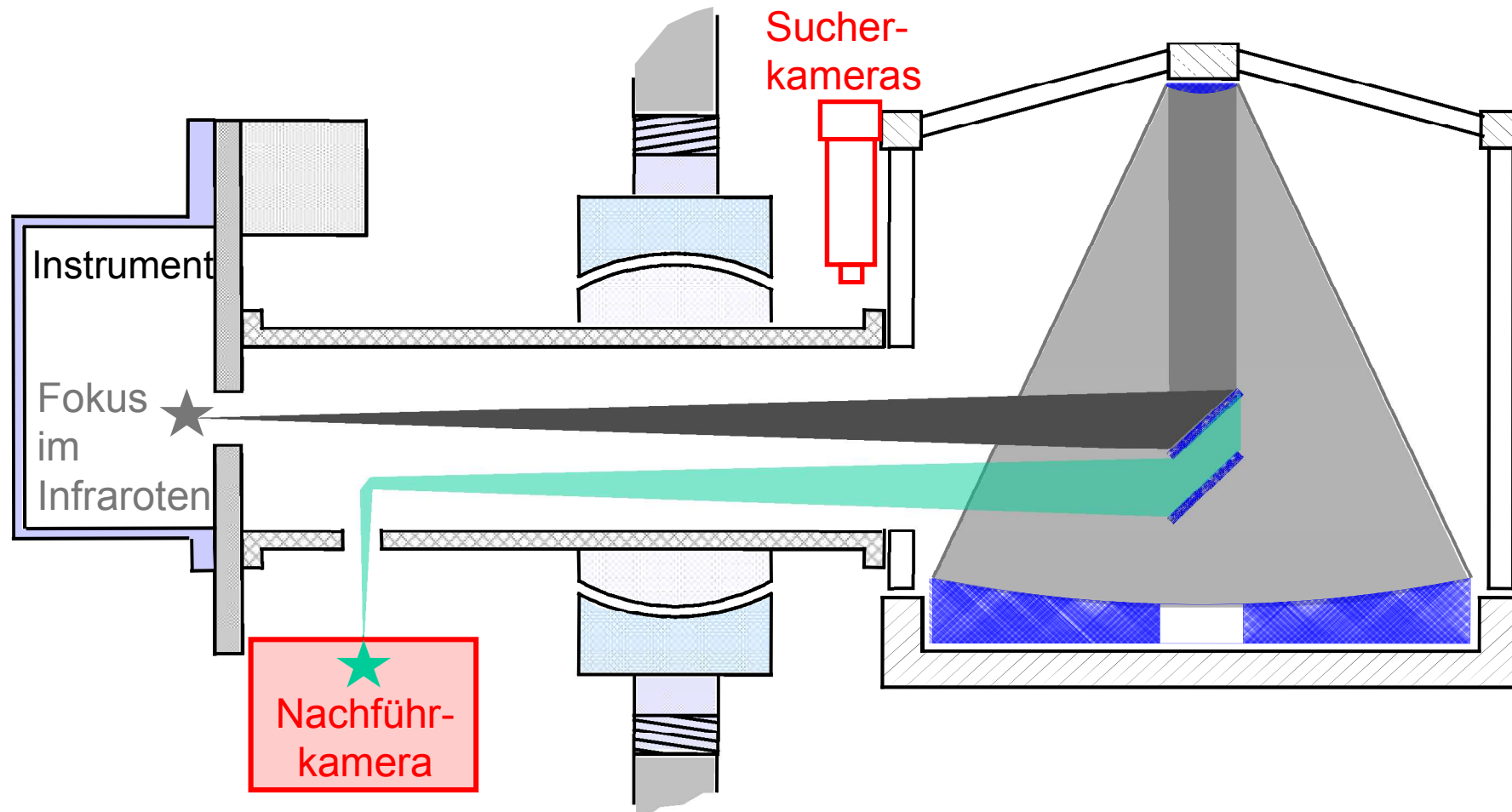


Reihenfolge



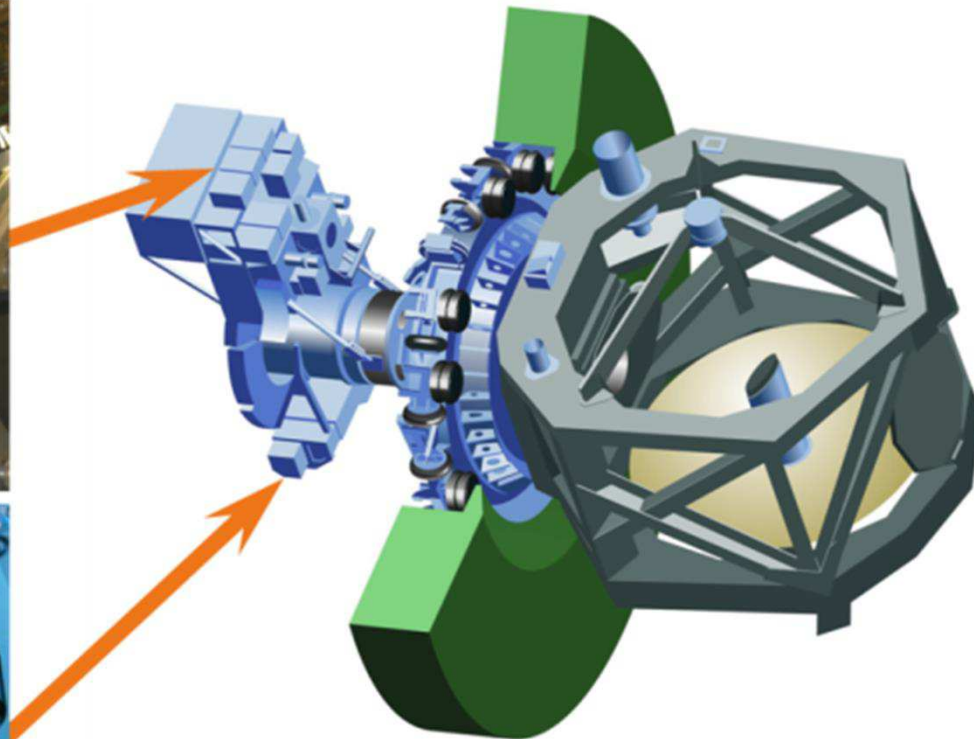
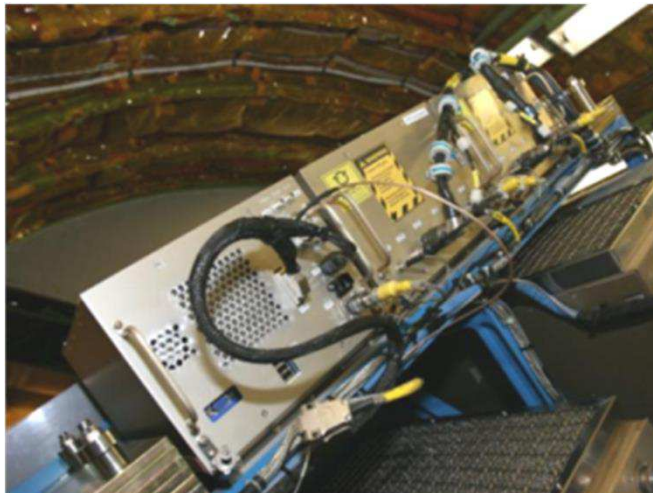


Zusatzkameras





Neuer FPI: Andor iXon Kamera mit Steuergerät





Gründe für den Kameraaustausch

höhere Sensitivität und Genauigkeit

	Spezifikation	alte Kamera	neue Kamera
Sensitivität	$m_v = + 16^{\text{mag}}$	$m_v = + 16^{\text{mag}}$ $t_{\text{exp}} = 1 \text{ s: } S/N = 4$	$m_v = + 16^{\text{mag}}$ $t_{\text{exp}} = 1 \text{ s: } S/N = 70$
Führungskamera	ja	nein	ja
Führungsgenauigkeit $\leq 0.5 \text{ arcsec}$	$m_v = + 16^{\text{mag}}$	$m_v = + 13^{\text{mag}}$	$m_v = + 16^{\text{mag}}$



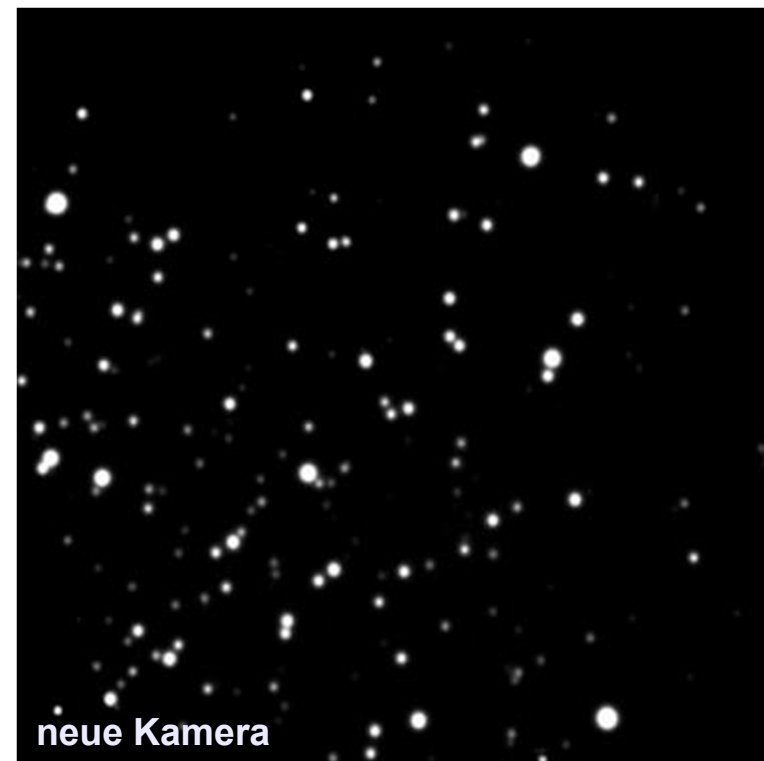


Vergleich zwischen alter und neuer Kamera

Belichtungszeit 360 s (alte Kamera) bzw. 352 s (neue Kamera)

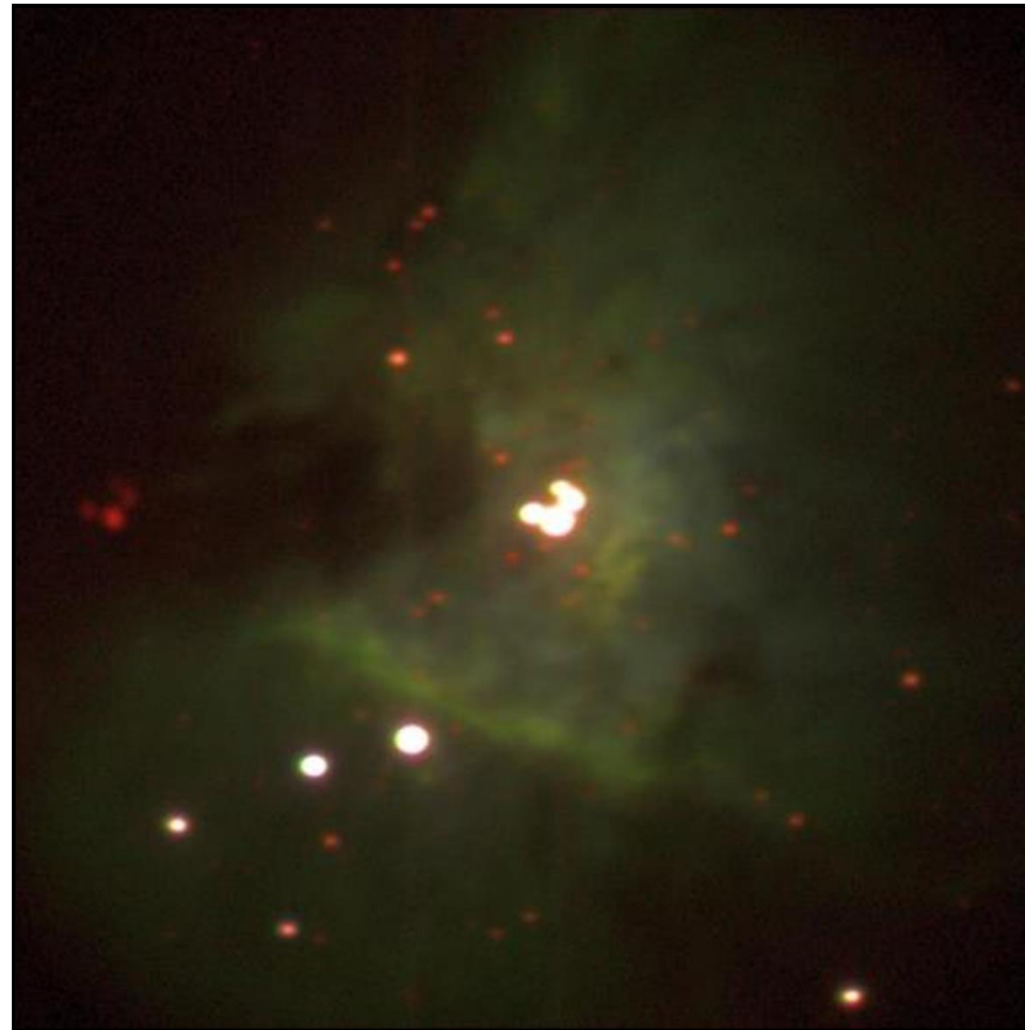


Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





Orion-Nebel (14. - 15.02.2013)





Standschwingversuch am Teleskop

- **Ziele**
 - Verifikation der strukturmechanischen Modelle
 - Frequenzgänge ermitteln
- **Methodik**
 - Schwingungsmoden und Eigenfrequenzen ermitteln
 - Modale Dämpfungen ermitteln
- **Dynamische Charakteristik**
 - ~ 80 Moden unterhalb 110 Hz
 - Gleichungen: $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}(t)$

$$\mathbf{q} = \underbrace{(-\Omega^2 \mathbf{M} + \sqrt{-1} \Omega \mathbf{D} + \mathbf{K})^{-1} \mathbf{F}}_{\mathbf{G}(\Omega)}$$

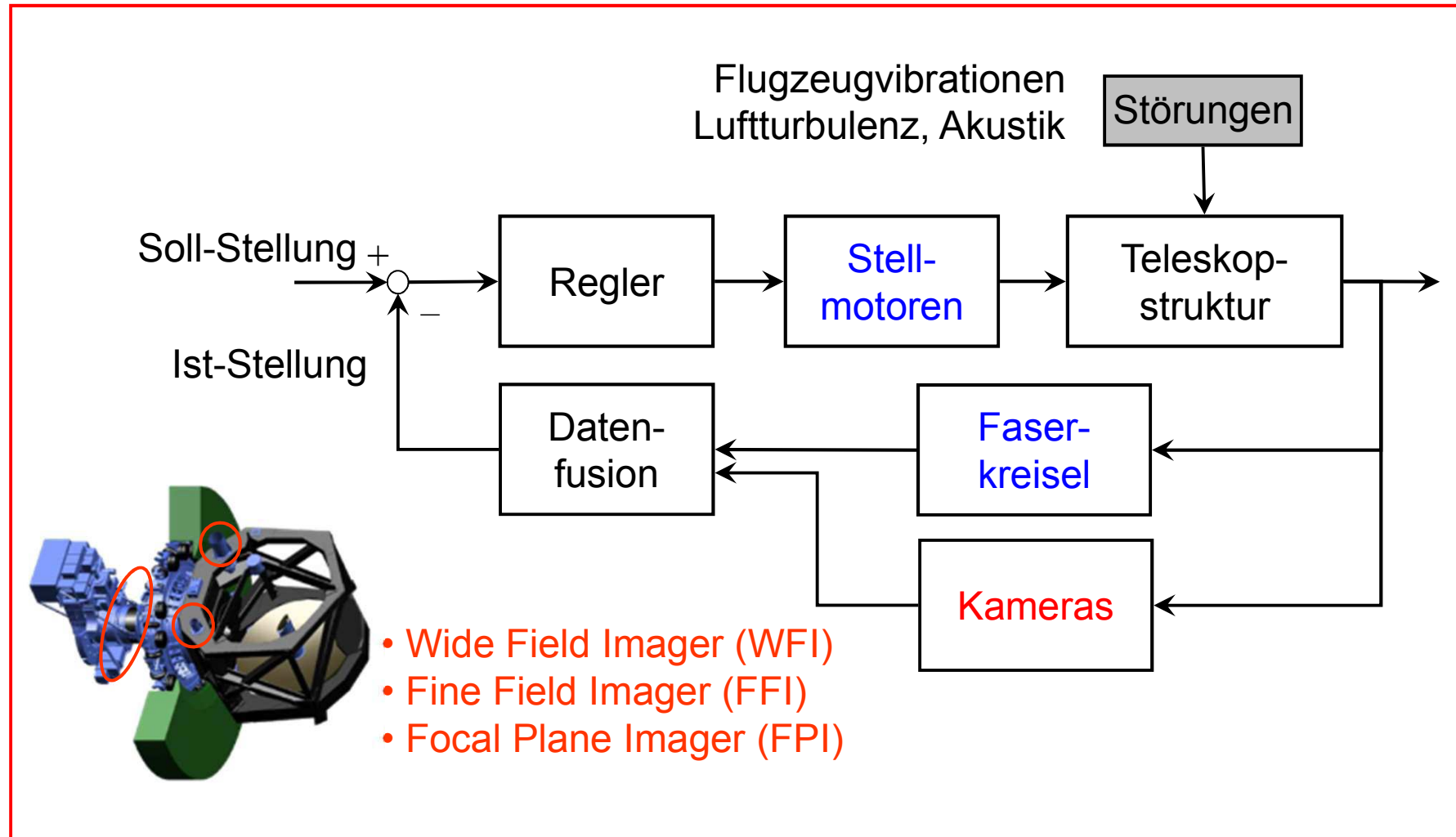
$$\hat{\mathbf{q}}_i, \omega_i$$

→ Parameteridentifikation von \mathbf{M} , \mathbf{D} , \mathbf{K}



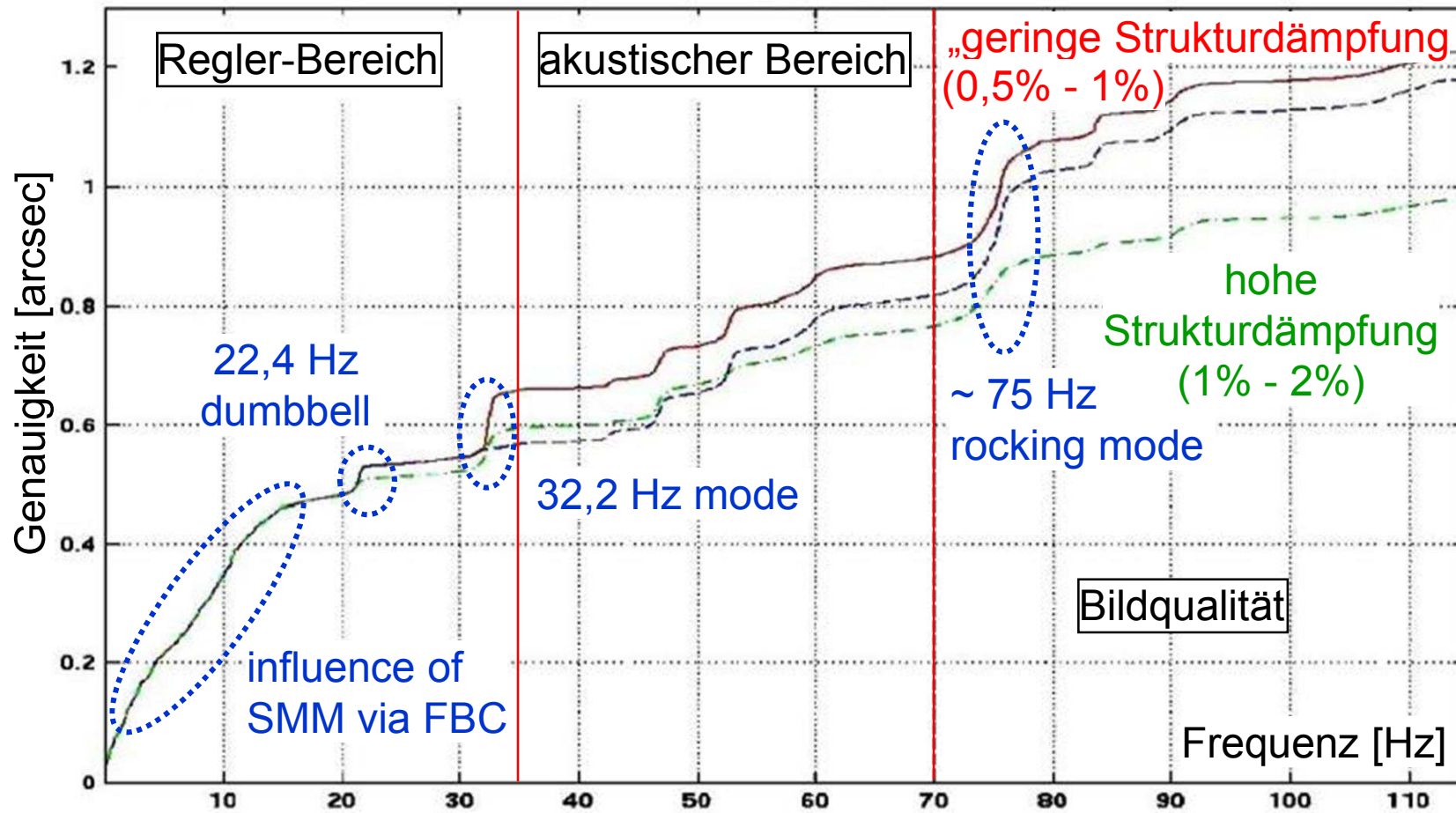


Das Lageregelungssystem



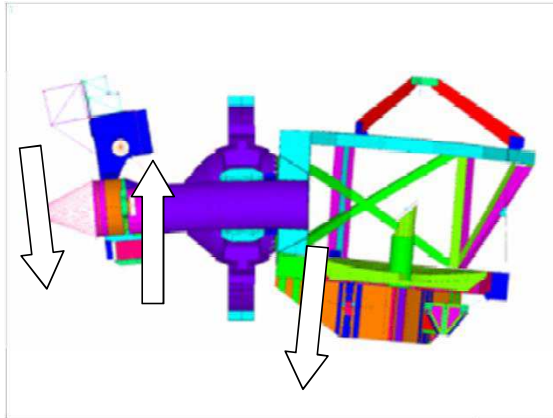


Genauigkeitsbilanz

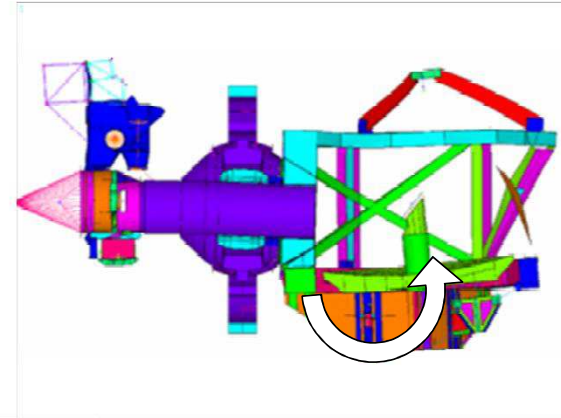




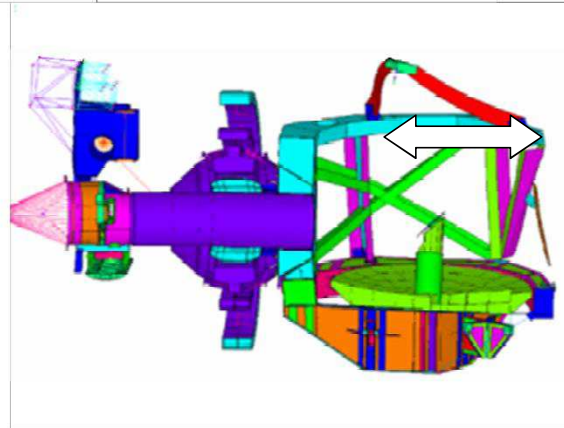
Typische Schwingungsmoden



Dumbbell Modes
(20 Hz – 30 Hz)



Rocking Modes
(> 50 Hz)



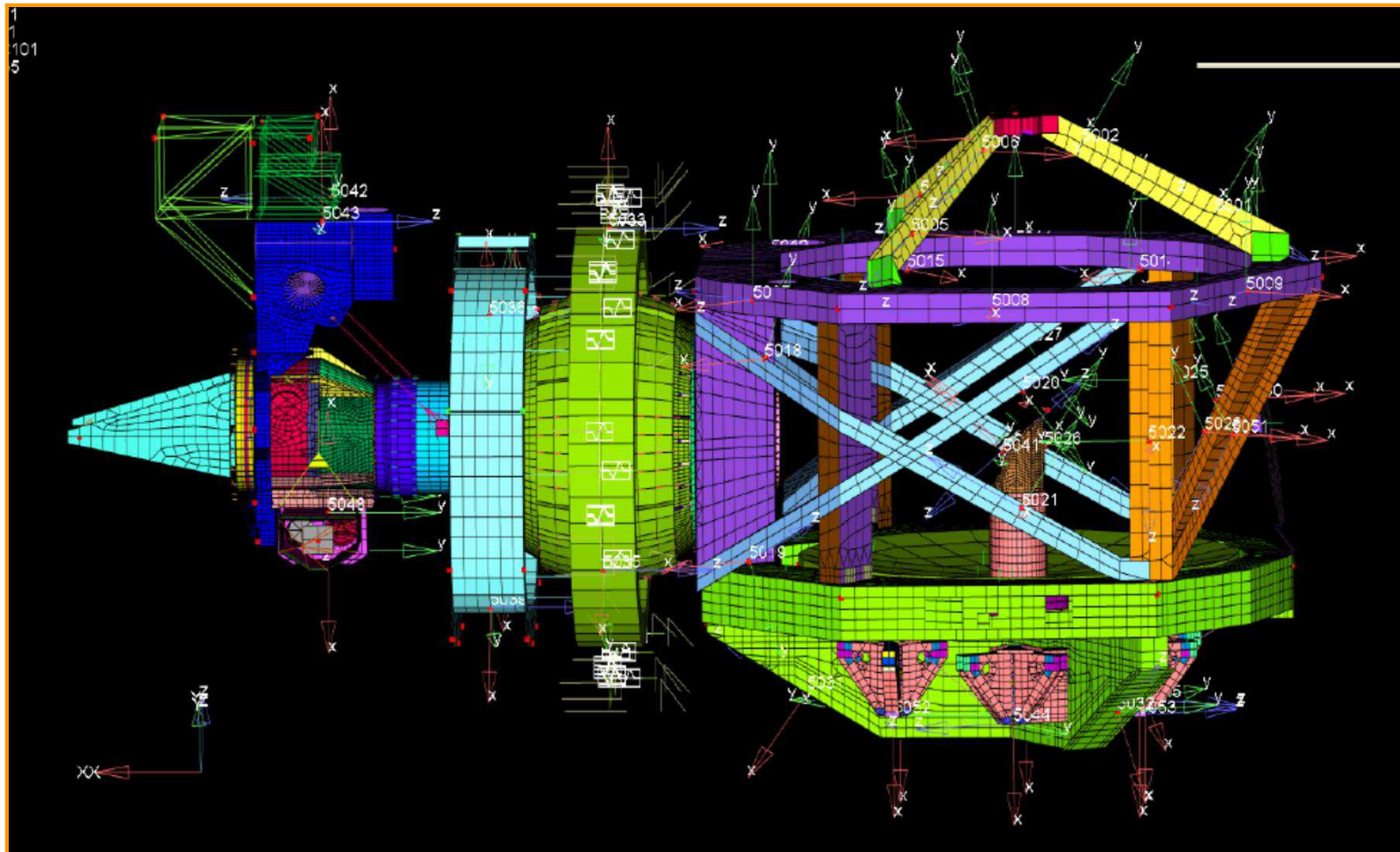
Pumping Modes
(40 Hz – 50 Hz)





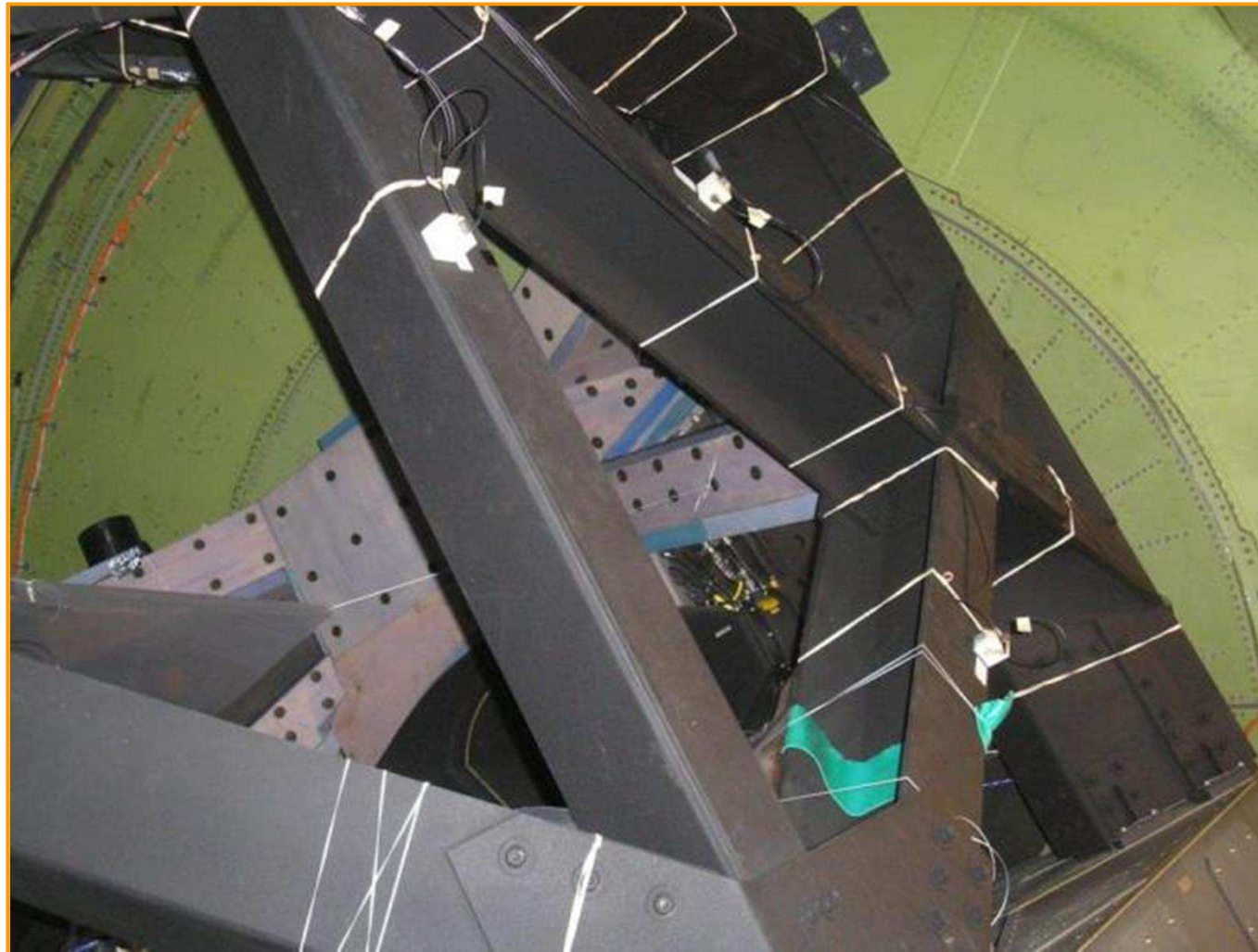
Standschwingversuch am Teleskop

5 Erregungspunkte (≤ 1000 N), 256 Beschleunigungsmesser (≈ 5 g)



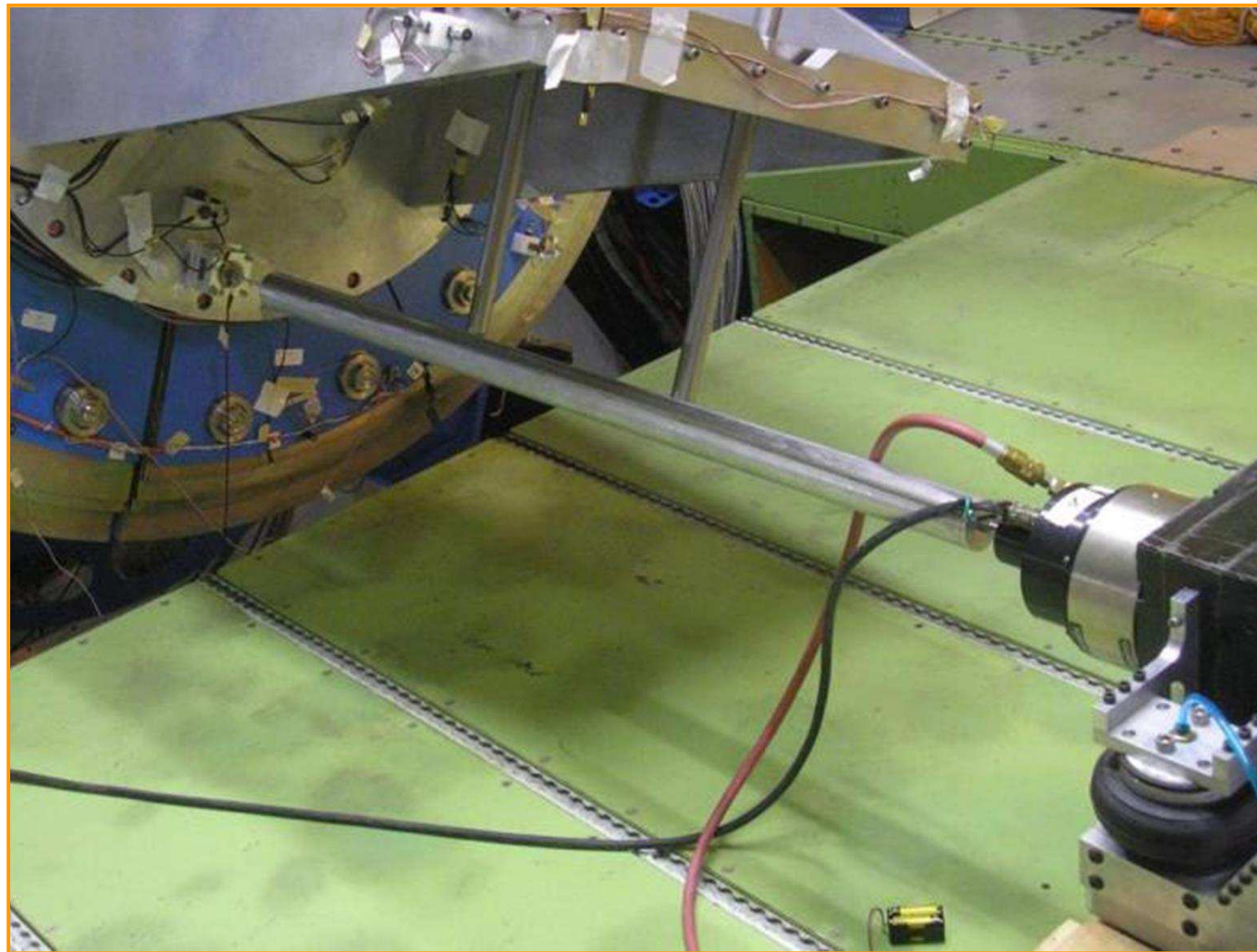


Standschwingversuch am Teleskop





StandSchwingversuch am Teleskop

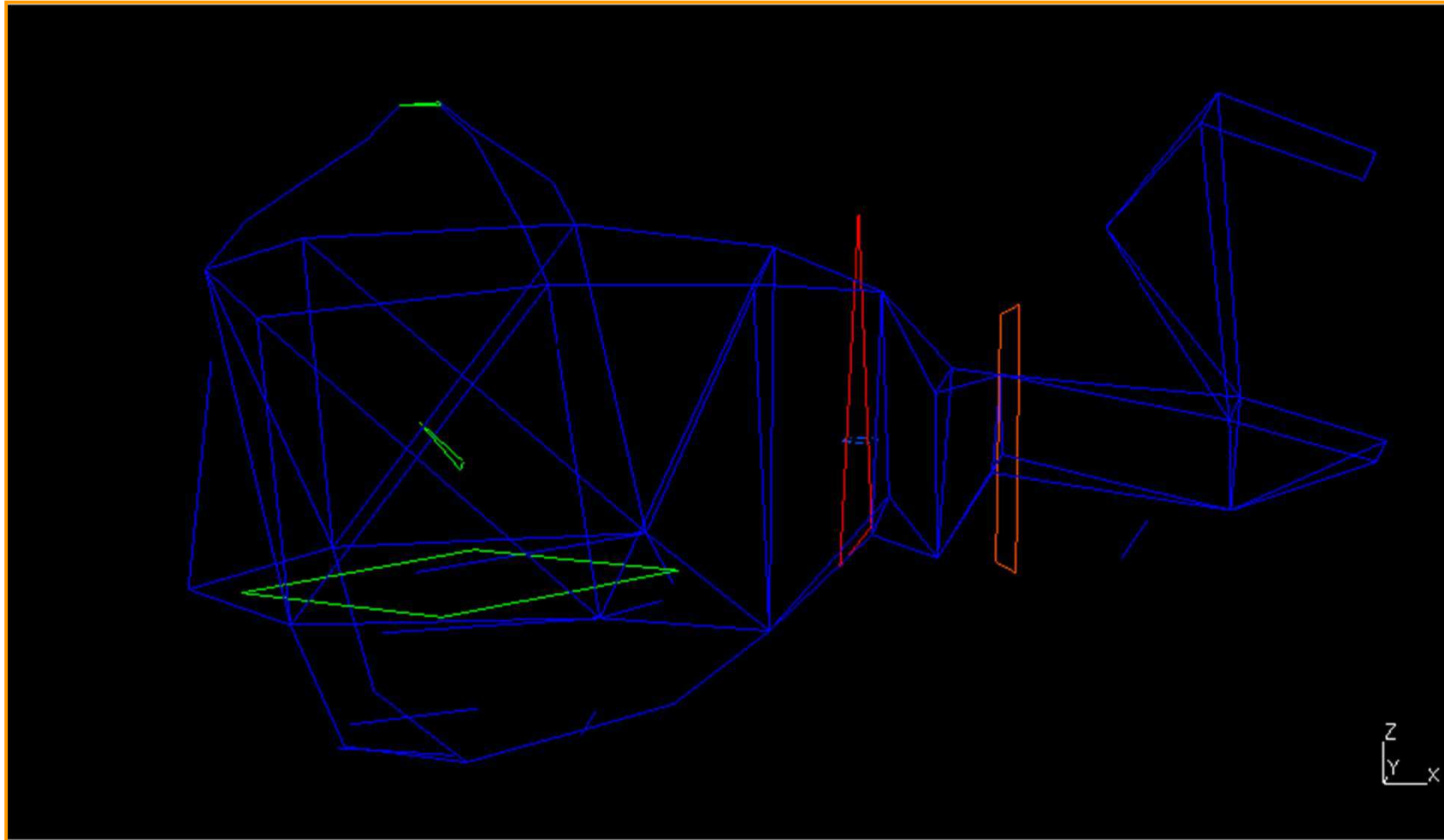




Typisches Ergebnis des Standschwingversuchs



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy

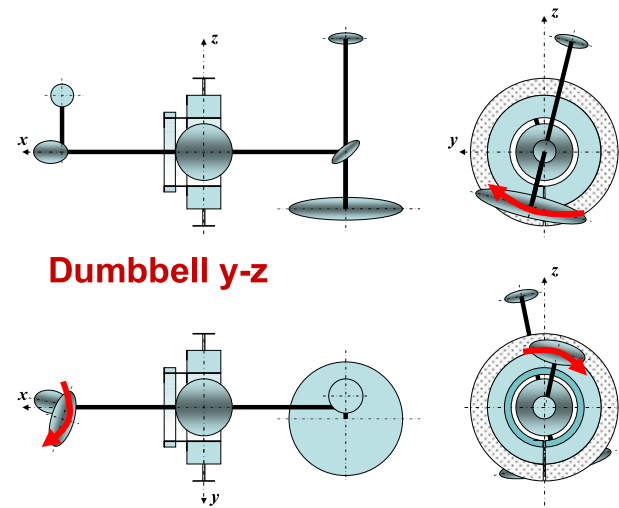
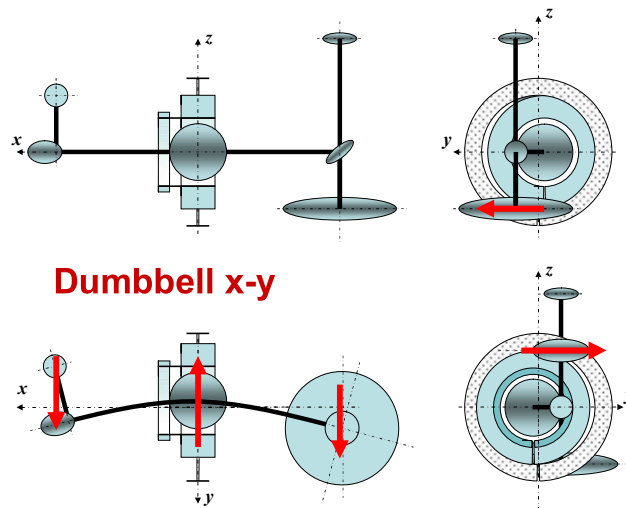
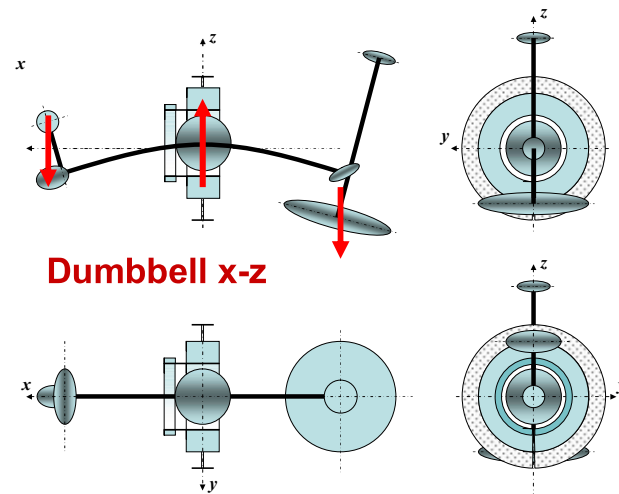




Typisches Ergebnis des Standschwingversuchs



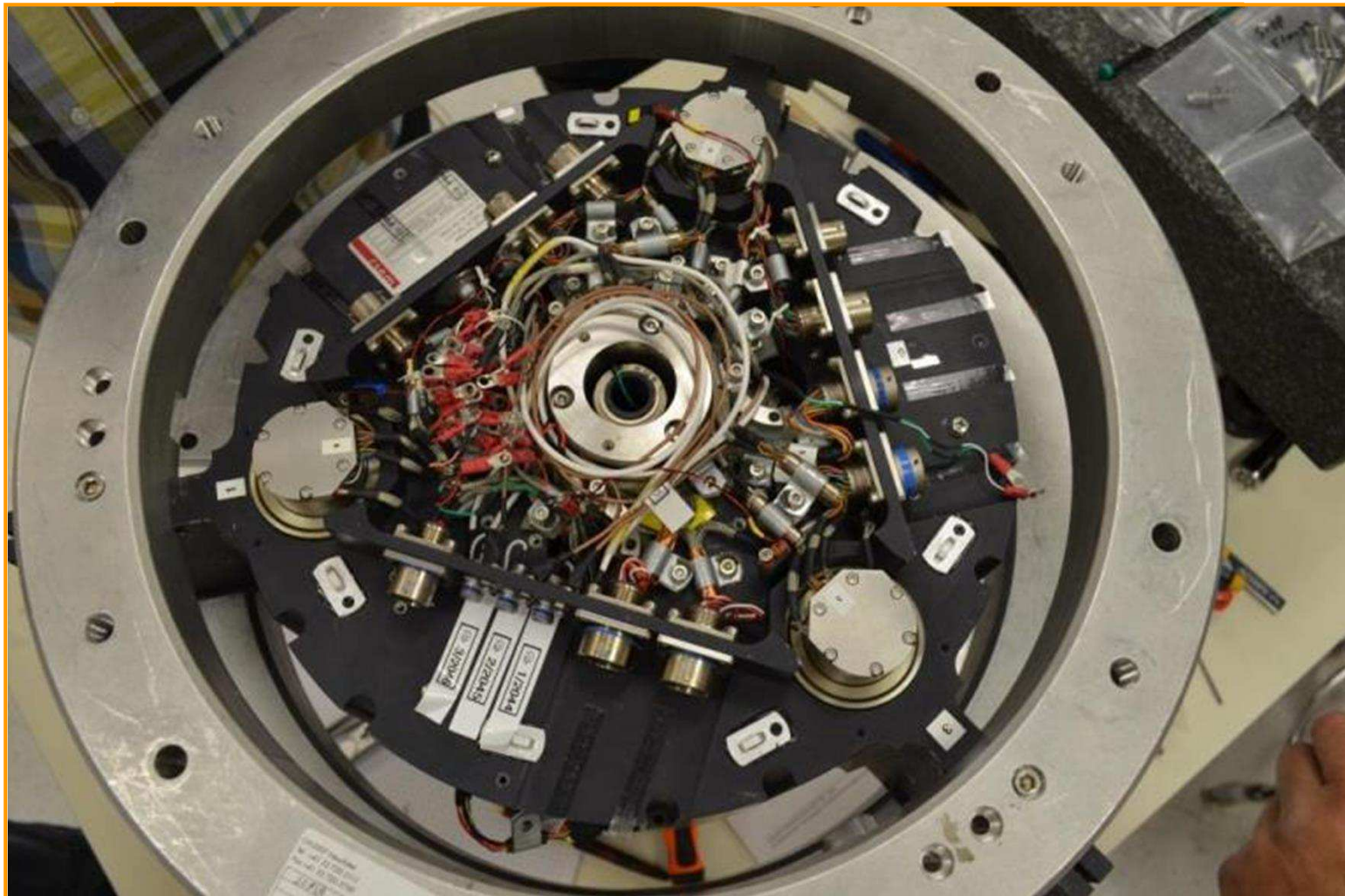
Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy



	Testergebnis		Sim.
	Freq. Hz	Dämpf. %	Freq. Hz
Dumbbell x-z	21,98	1,30	20,53
Dumbbell x-y	24,83	0,72	21,70
Dumbbell y-z	30,63 32,46	1,80 1,20	31,72 32,64

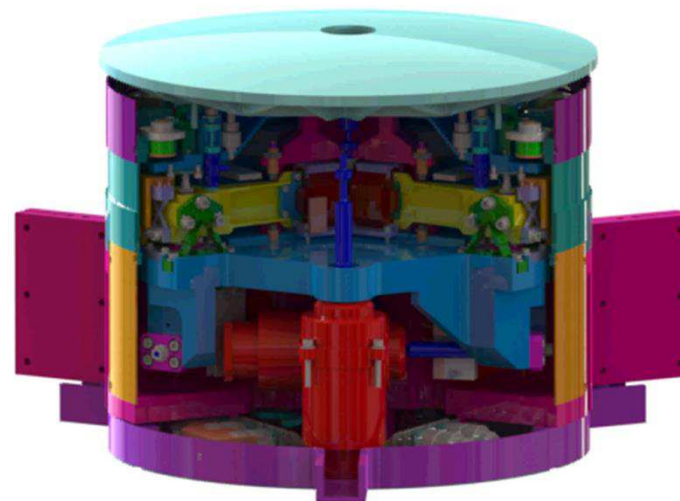


Sekundärspiegel





Sekundärspiegelmechanismus



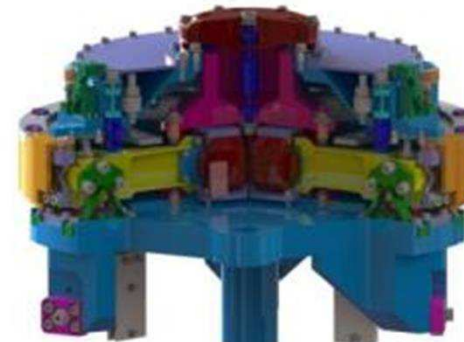


Sekundärspiegelmechanismus

Hyperbolischer Spiegel



Tilt Chop Mechanismus

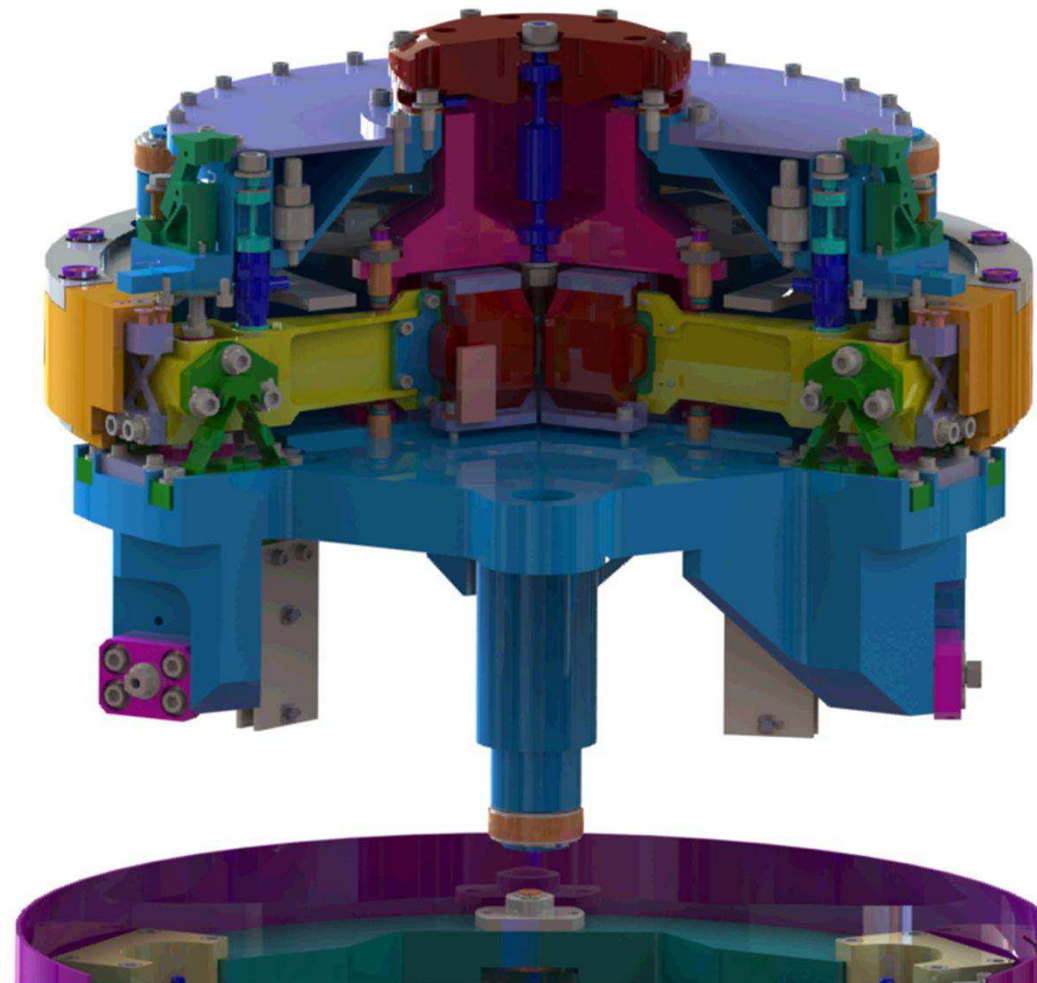


Focus Center Mechanismus



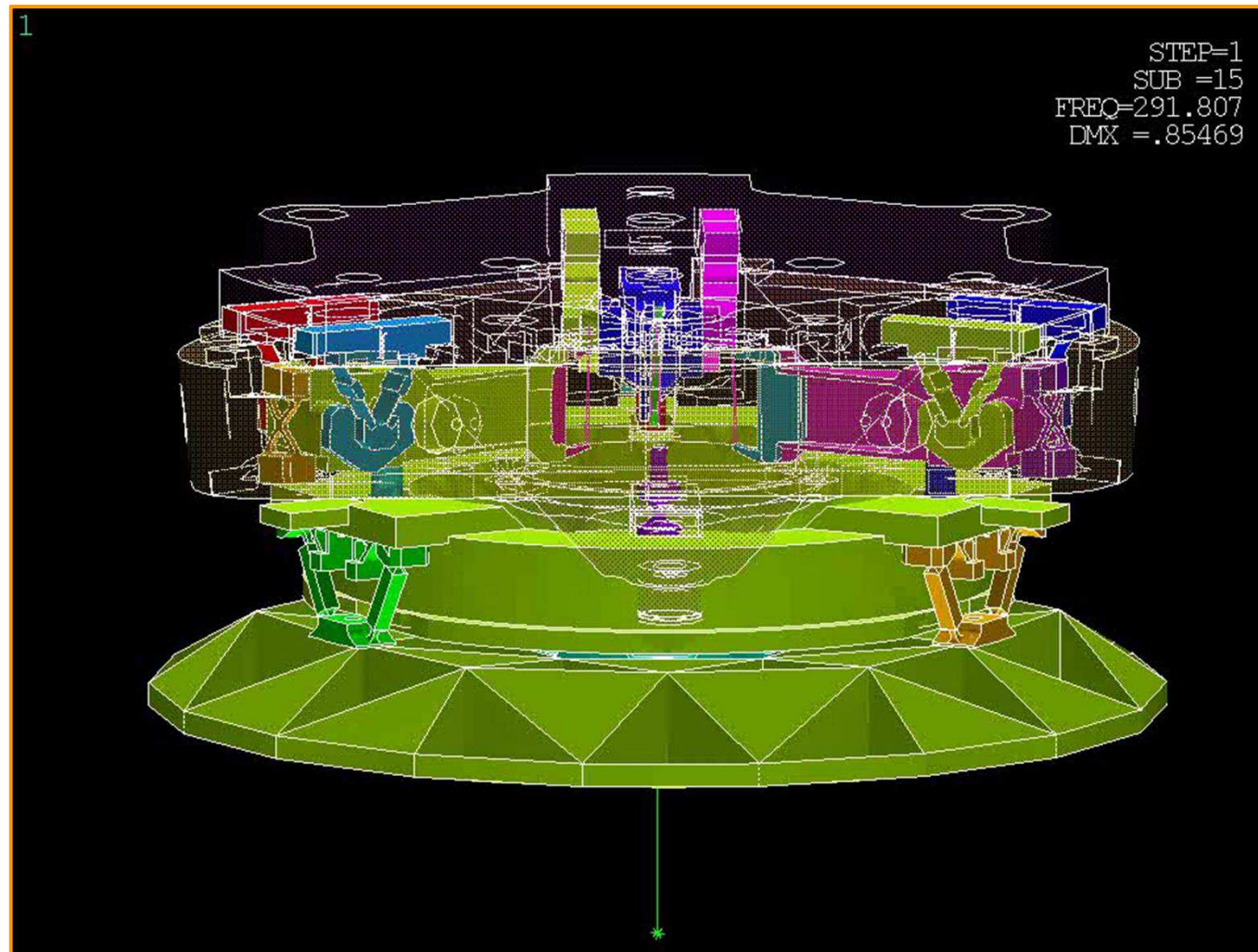


Tilt Chop Mechanismus



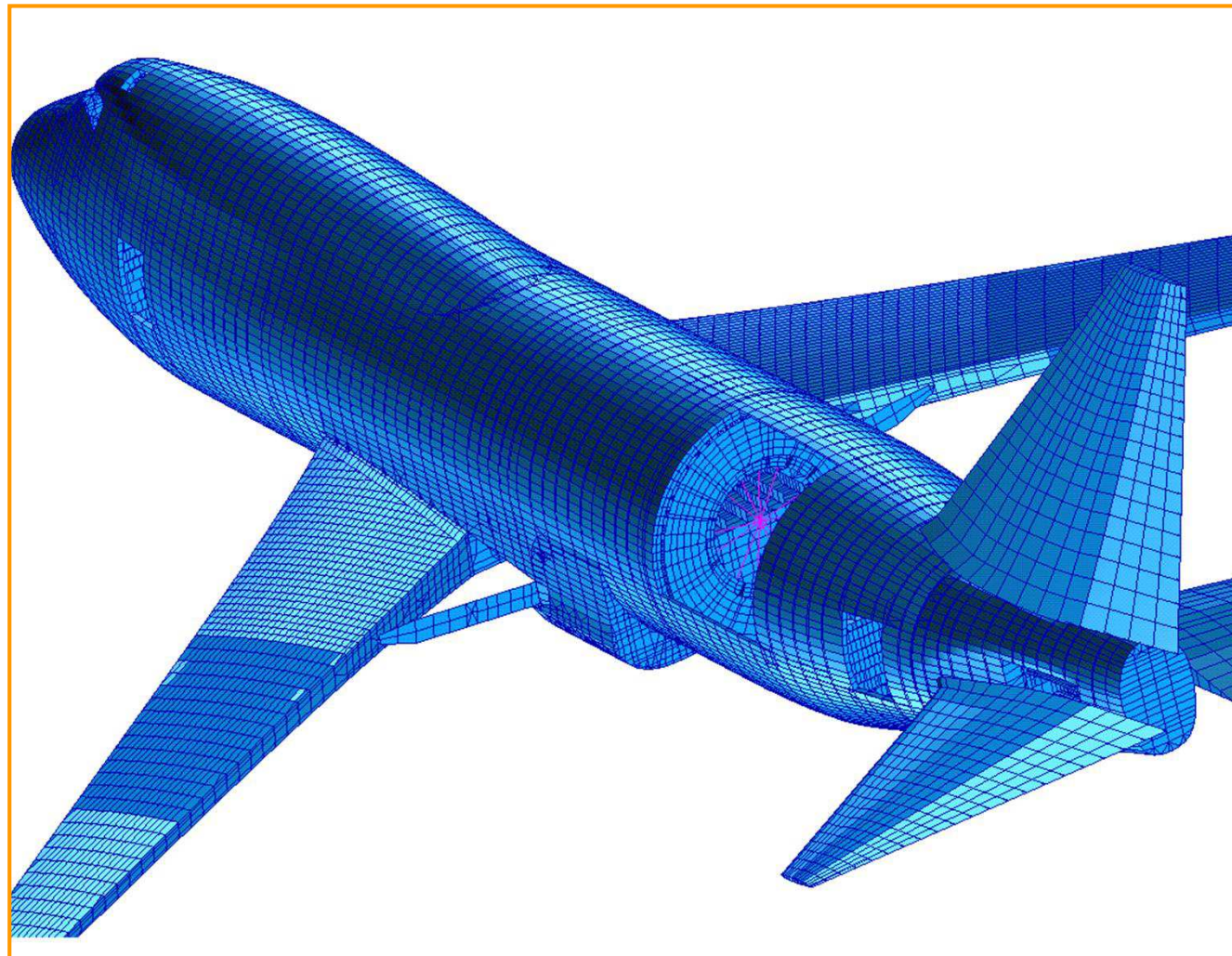


Identifikation „300 Hz-Schwingung“



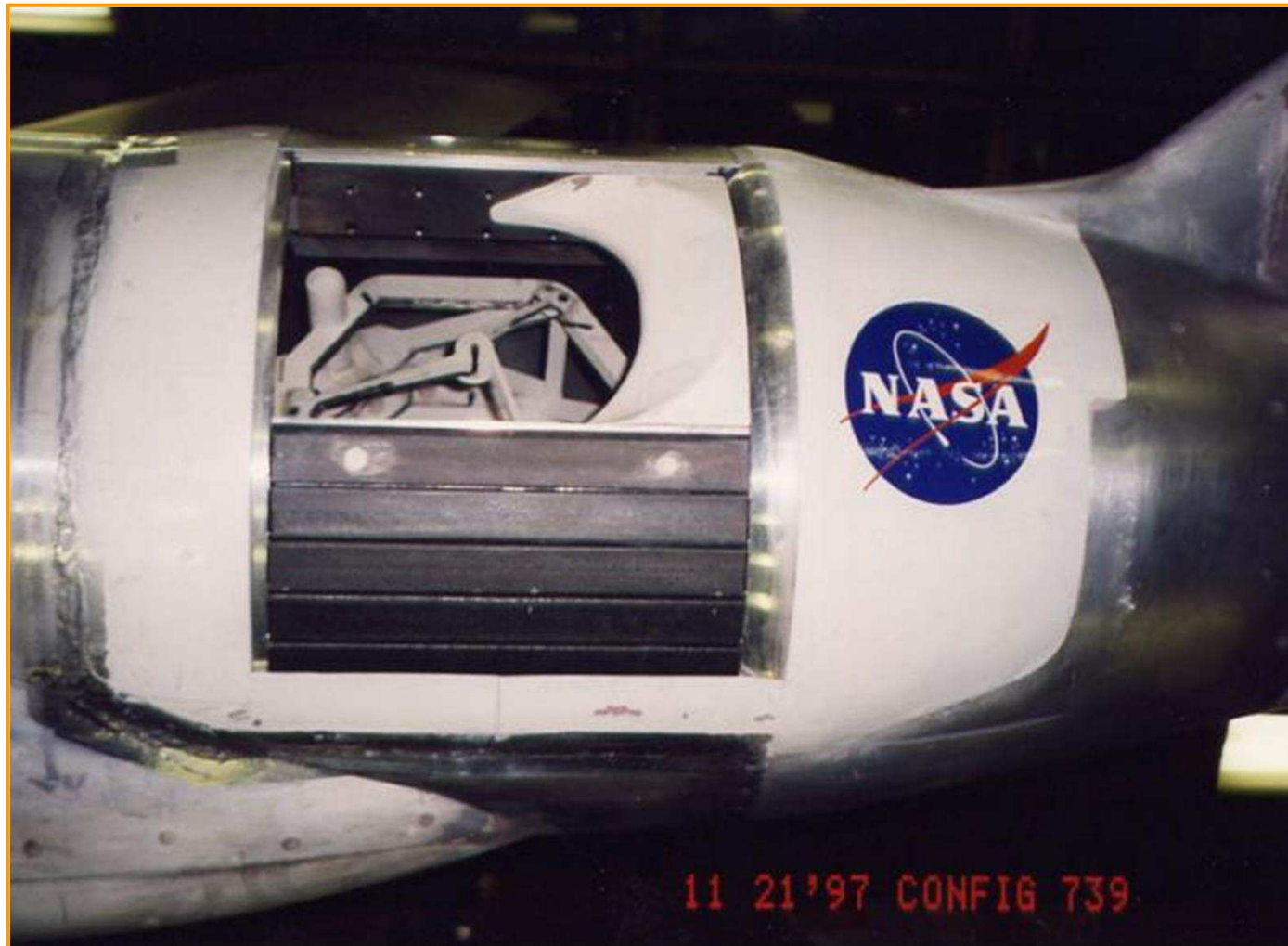


Gesamtflugzeug – Finite-Elemente-Modell





Windkanalmodell (1:14,3 = 0,07)



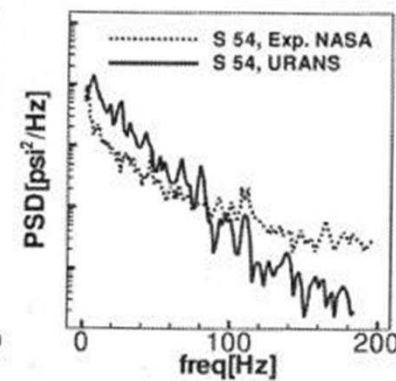
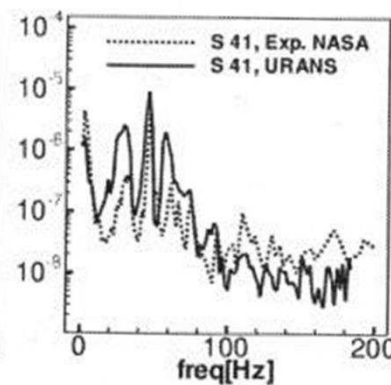
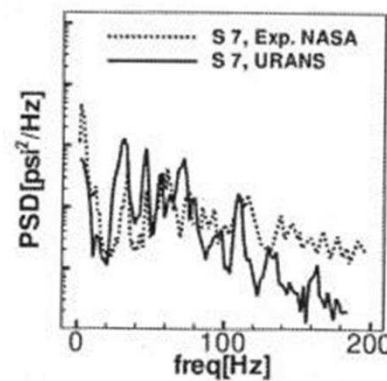
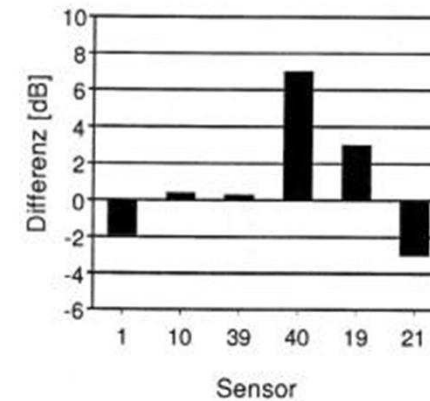
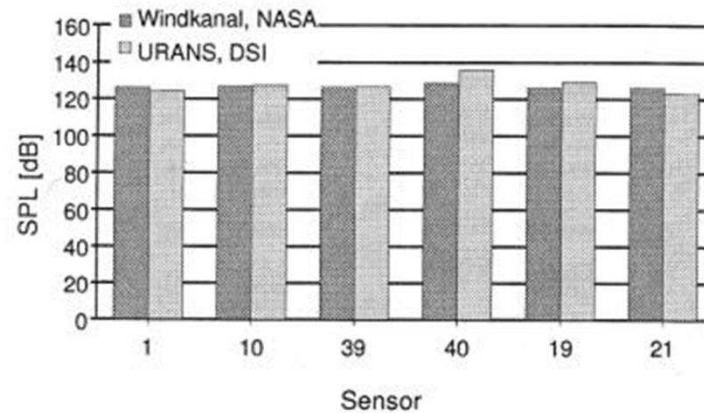
Windkanalmodell (1:14,3 = 0,07)





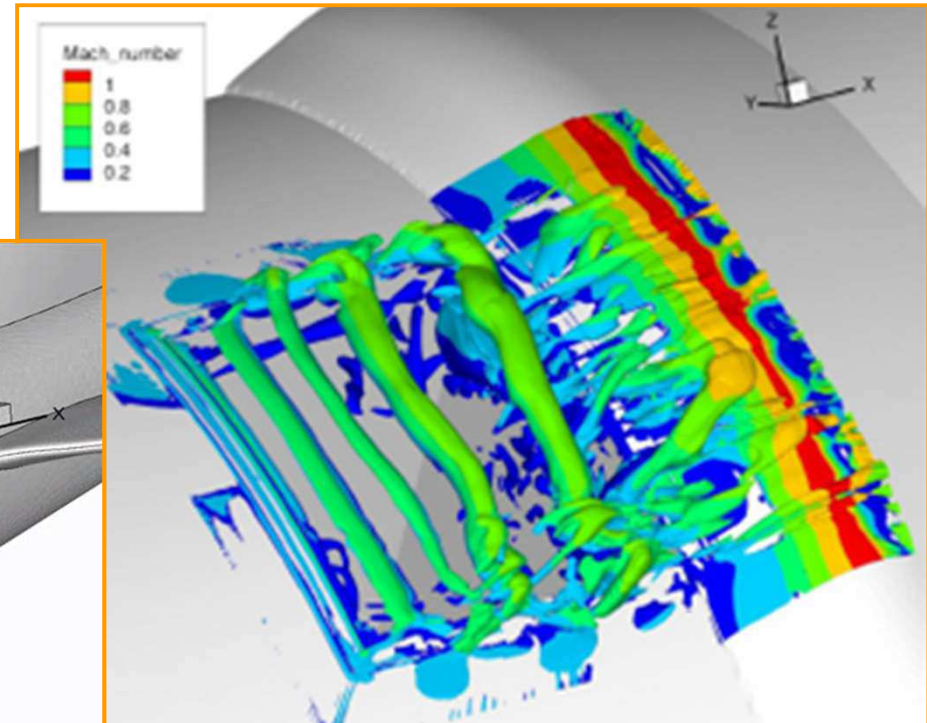
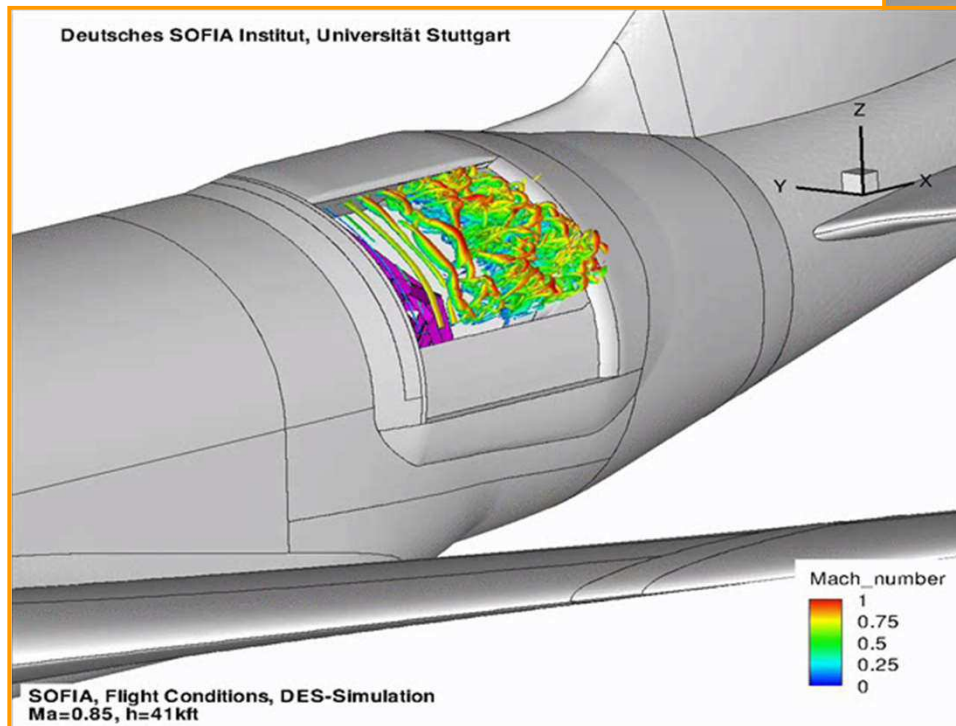
Nachrechnen der Windkanalversuche

Schalldruck und -spektrum



Strömungssimulation

Detached Eddy Simulation





Landung mit offener Tür





Übersicht Testflüge für Zulassung

26.04.2007: SOFIA Erstflug

Mai – Nov. 2007: 7 Closed Door Envelope Expansion Flights

- Festigkeitsnachweis Strukturmodifikationen (**850 DMS**)
- **Lastvielfache bis 2.3 g**
- Testpunkte für **Flutterfreigabe**
- Kälteeinfluss auf Steuerseilspannungen

Dez. 2009 – Nov. 2010: 39 Open Door Envelope Expansion Flights

- stückweise Öffnung der Türe (**Aeroakustik**)
- schrittweise Erhöhung der Türposition (23°, 30°, 40°, 50°, 58°)
- Nachweis von unveränderten Handling-Qualities (Leitwerksumströmung)
- Nachweis einer sicheren **Open Door Landung**
- Testpunkte für Flutterfreigabe
- Maximale Fehlausrichtung zwischen Türe und Teleskop im Fluge
- Erfliegen der maximalen Schiebewinkel (bis 18°, Rollen 16°)
- Erfliegen der maximalen Machzahl mit offener Türe (Ma=0.92)
- Max. asymmetrischer Schub (2 Triebwerke aus)



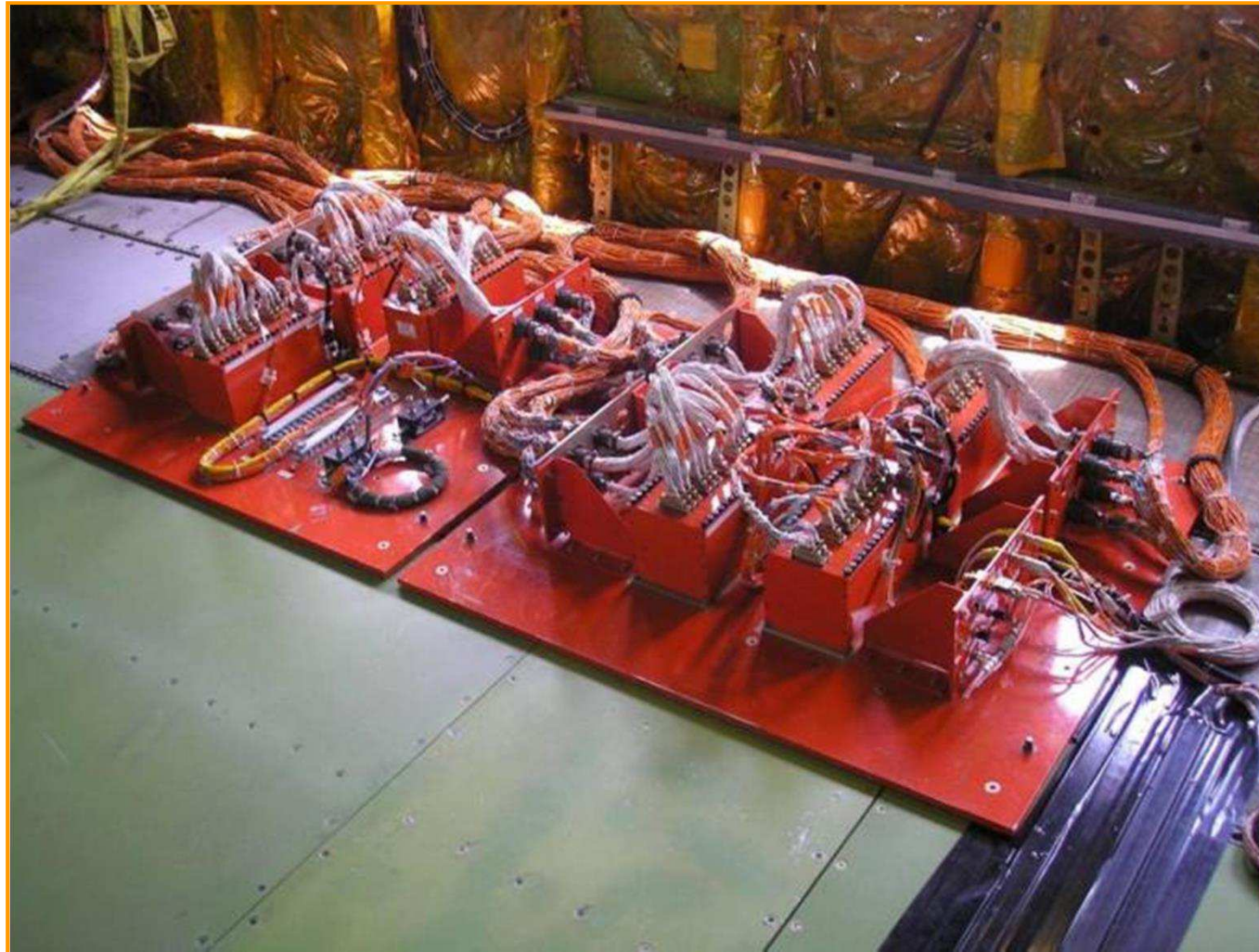


Flugversuchsausrüstung





Flugversuchsausrüstung





Flugversuchsausrüstung





Begleitflugzeug





Bodenkontrolle





11. April 2013: 100. SOFIA-Flug



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy





28. Juni 2014: 180. SOFIA-Flug

