



# Aufbaubegleitende Vermessung beim Wendelstein 7-X

**Jörg Müller**

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Unternehmung Wendelstein 7-X

D-17491 Greifswald, Wendelsteinstraße 1

# Gliederung

**Allgemeines**

**Messgeräte und Zielzeichen**

**Messbedingungen**

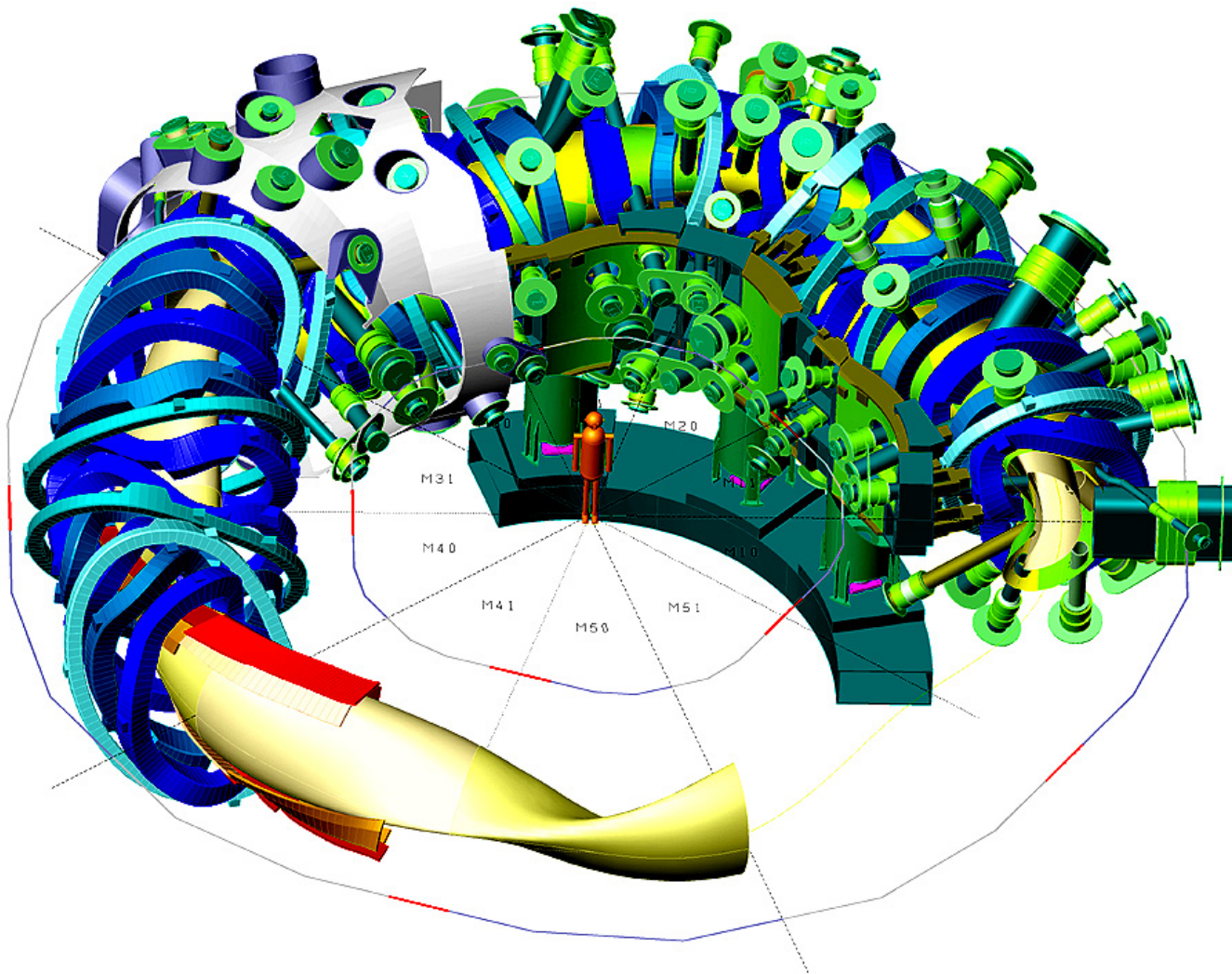
**Eingangsvermessungen der Bauteile**

**Justierung der Bauteile**

**Halbmodulmessung**

**Zusammenfassung**

## Aufbau des Wendelstein 7-X

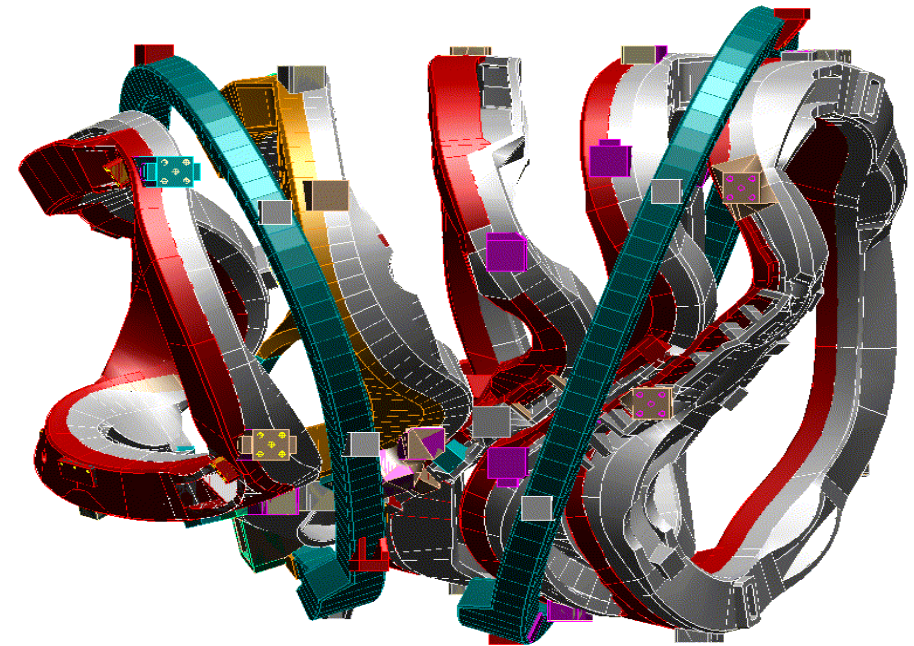
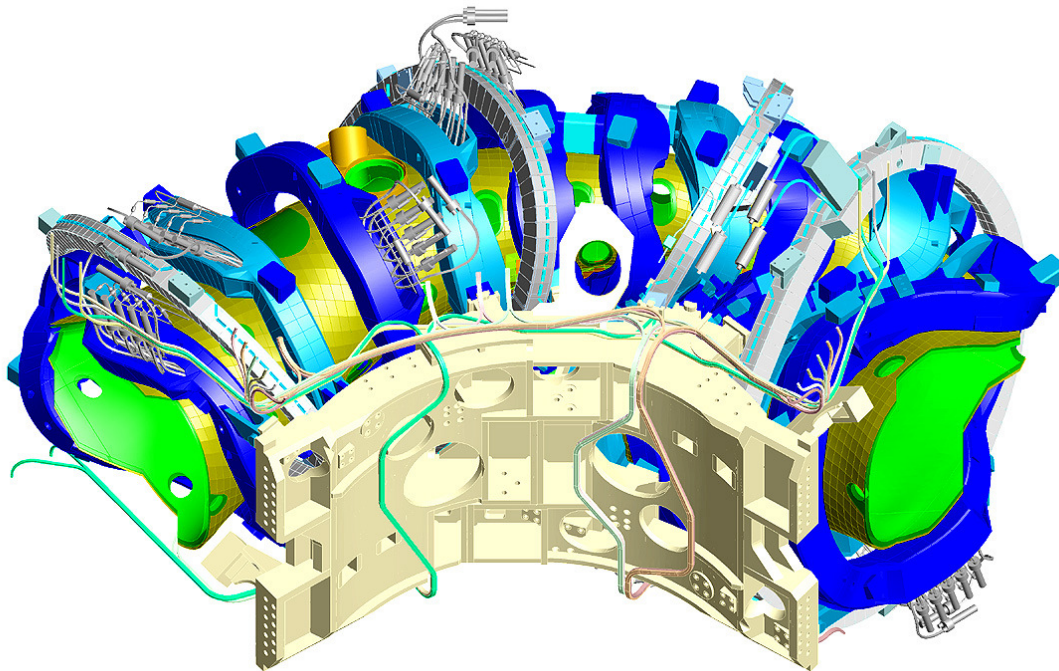


- Dimensionen des W7-X
  - mittlerer Radius: 5.5m
  - Höhe: 5.5m
  - Gesamtmasse: 725t
- 50 nichtplanare Spulen (NPS)  
supraleitend ( $\varnothing = 3.0\text{m}$ ,  $m=5\text{t}$ )
- 20 planare Spulen (PLS)  
supraleitend ( $\varnothing = 3.5\text{m}$ ,  $m=2\text{t}$ )
- Zentralring (ZR)
- Plasmagefäß (PG)
- Außengefäß (AG)
- Fünffachsymmetrie
- Klappsymmetrie

## Fünffach- und Klappsymmetrie:

### Fünffachsymmetrie:

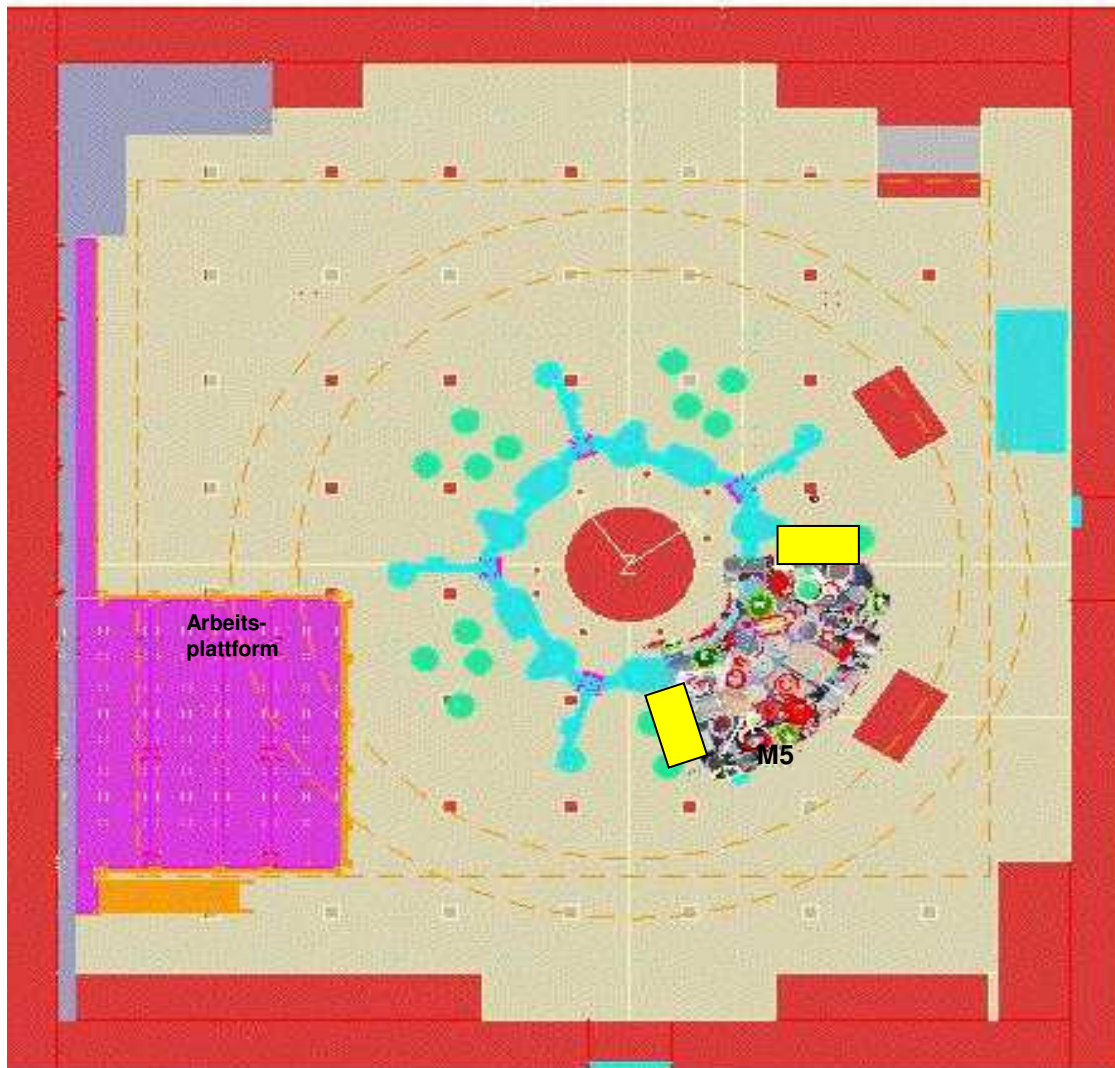
- 5 identische Module mit 10 NPS und 4 PLS, ZR, PG



### Klappsymmetrie:

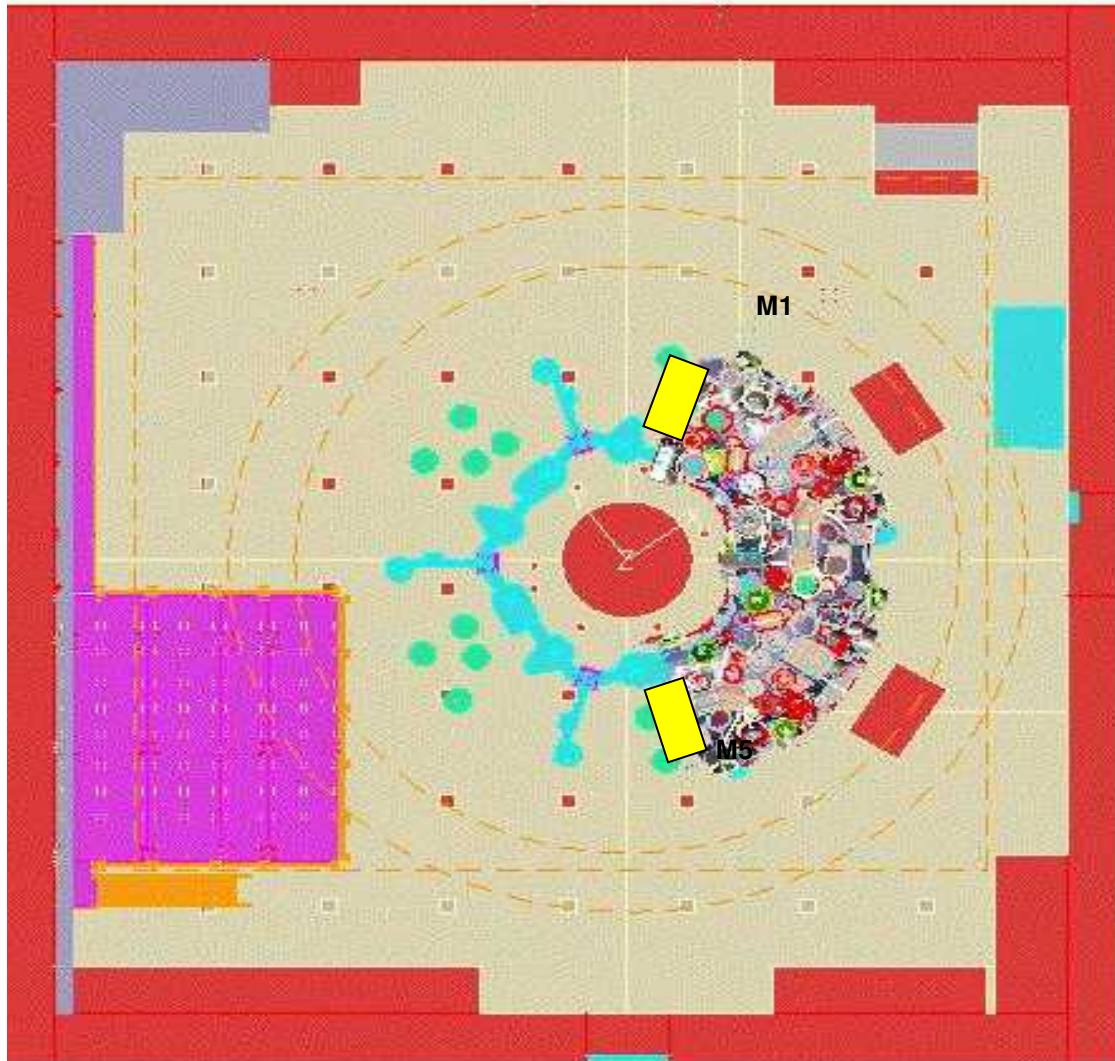
- 2 klappsymmetrische Halbmodule pro Modul
- 5 NPS und 2 PLS pro Halbmodul
- Klappsymmetrische Halbmodule der ZR
- Klappsymmetrische Halbmodule der PG

## Montagereihenfolge der Module



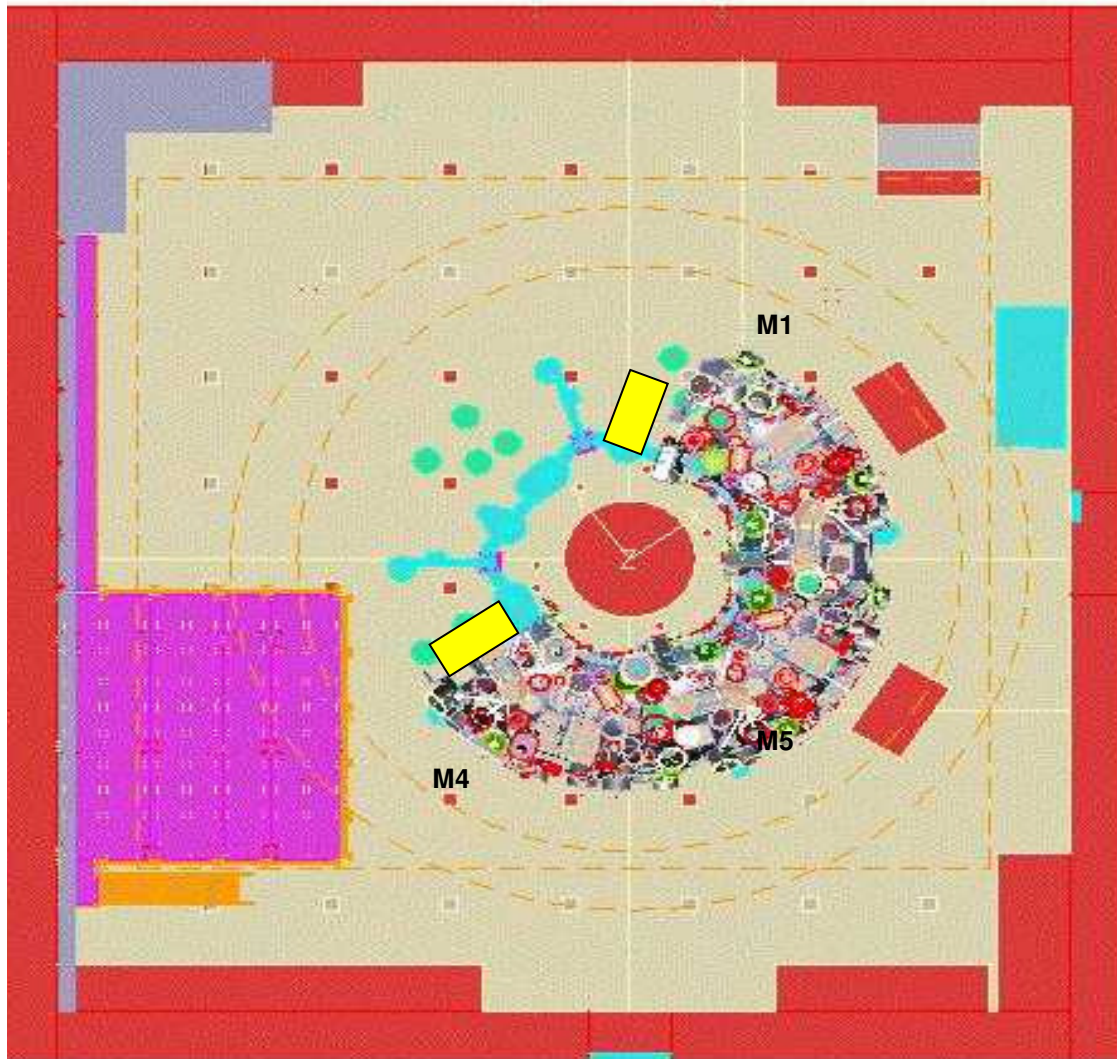
Schritt 1 : Modul 5

## Montagereihenfolge der Module



Schritt 2 : Modul 1

## Montagereihenfolge der Module



Schritt 3 : Modul 4

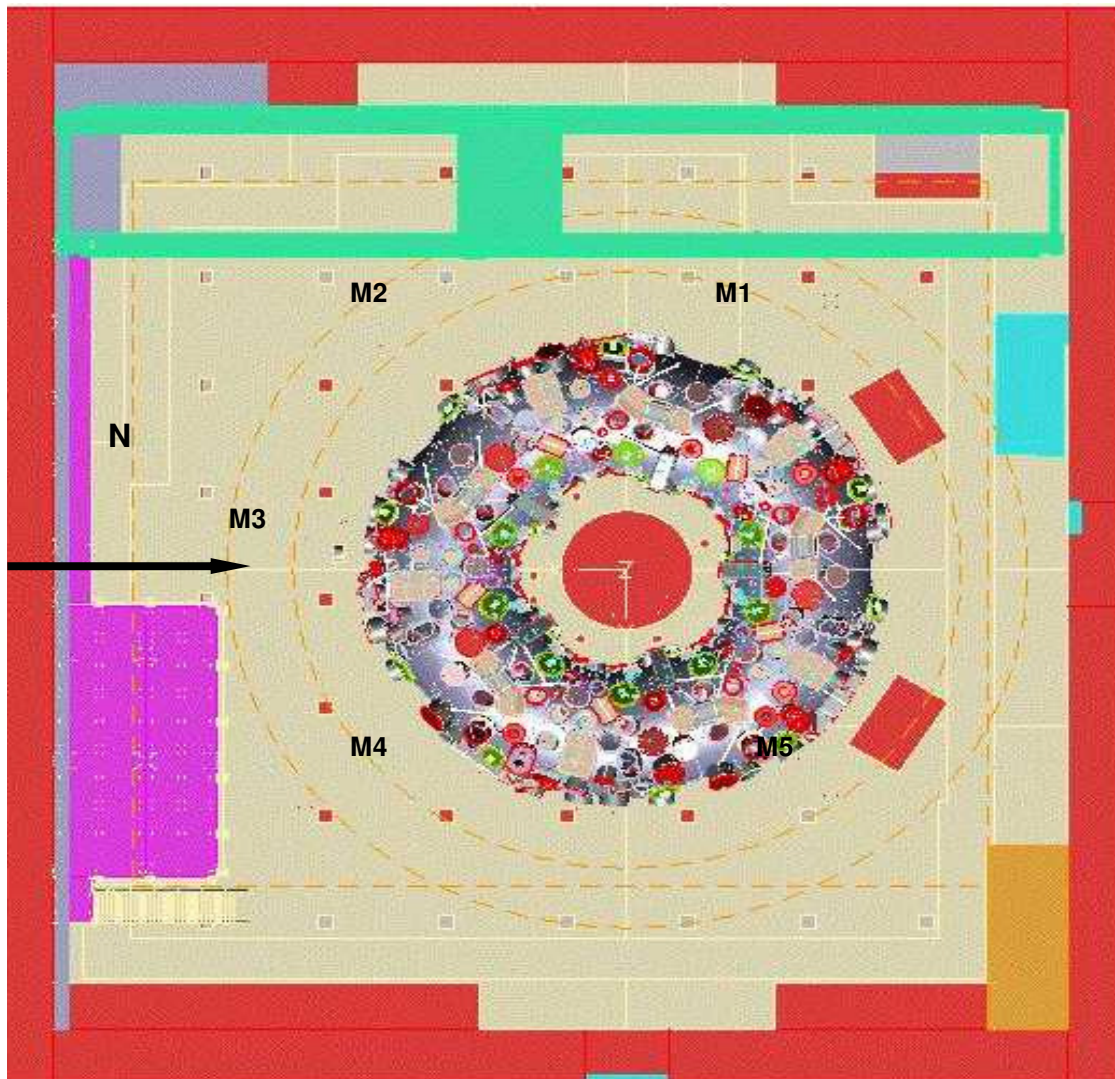
## Montagereihenfolge der Module



Schritt 4 : Modul 2



## Montagereihenfolge der Module



Schritt 5 : Modul 3

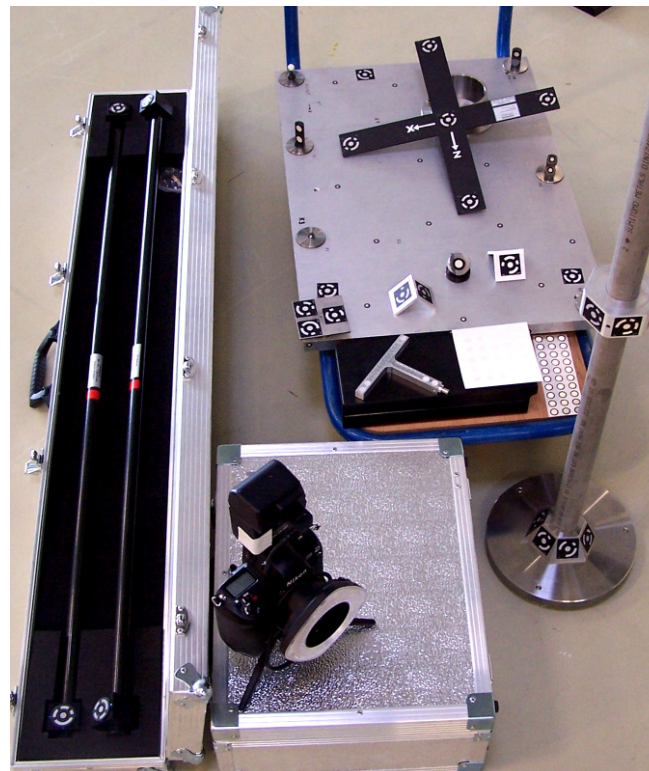
# Messgeräte

## Hauptmesssysteme

Lasertracker



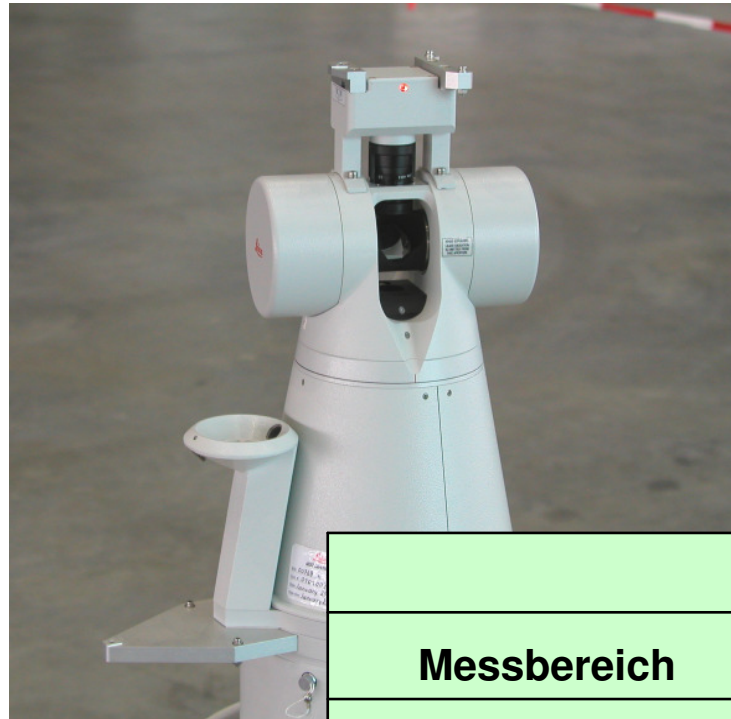
Photogrammetriesystem



Faro-Arm mit  
Handscanner

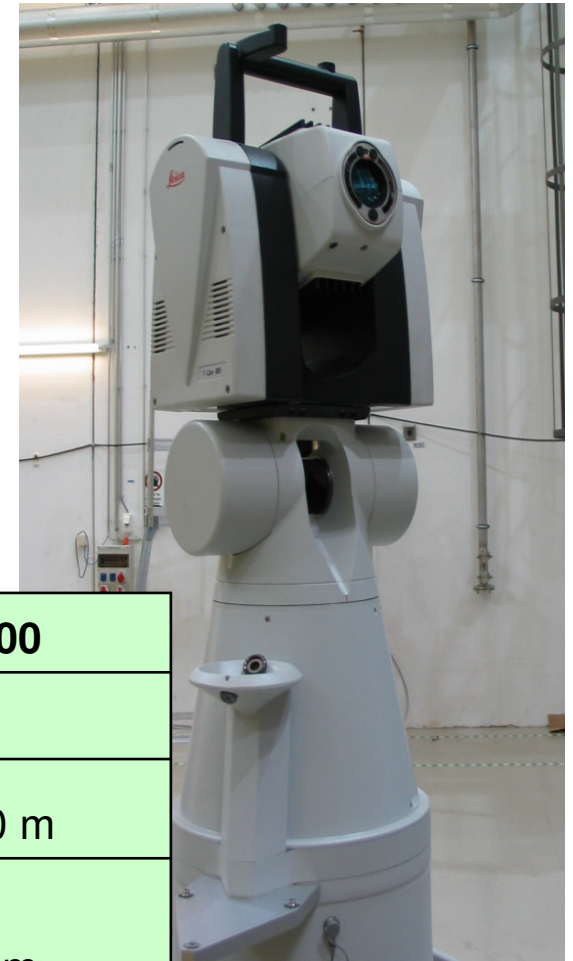


## Lasertracker



LTD 500

Indoor-Messsystem



LTD 800 mit T-Cam

	LTD 500	LTD 800
<b>Messbereich</b>		
Distanz (ADM)	1,7 - 35 m	1,5 - 40 m
Distanz (Interferometer)	0 - 35 m	0 - 40 m
<b>Genauigkeit</b>	10 $\mu\text{m}/\text{m}$ + 50 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}/\text{m}$ + 25 $\mu\text{m}$
<b>Software</b>	XYZ	XYZ Metrolog

## Zielzeichen für Lasertracker

### 1.5" Corner Cube (Support)

drei Planspiegel  
Mitte zentriert auf Kugelmittelpunkt  
Offset 25mm Support (CCR-Wert)

- Standardmessungen
- Dynamische und statische Messungen

### 0.5" Reflector RFI

unzentrierte Glas-  
prismen, feste Installation  
(kleben)

- relative Messungen
- Deformationsmessungen
- Wiederholungstests

### T-Probe mit T-Cam

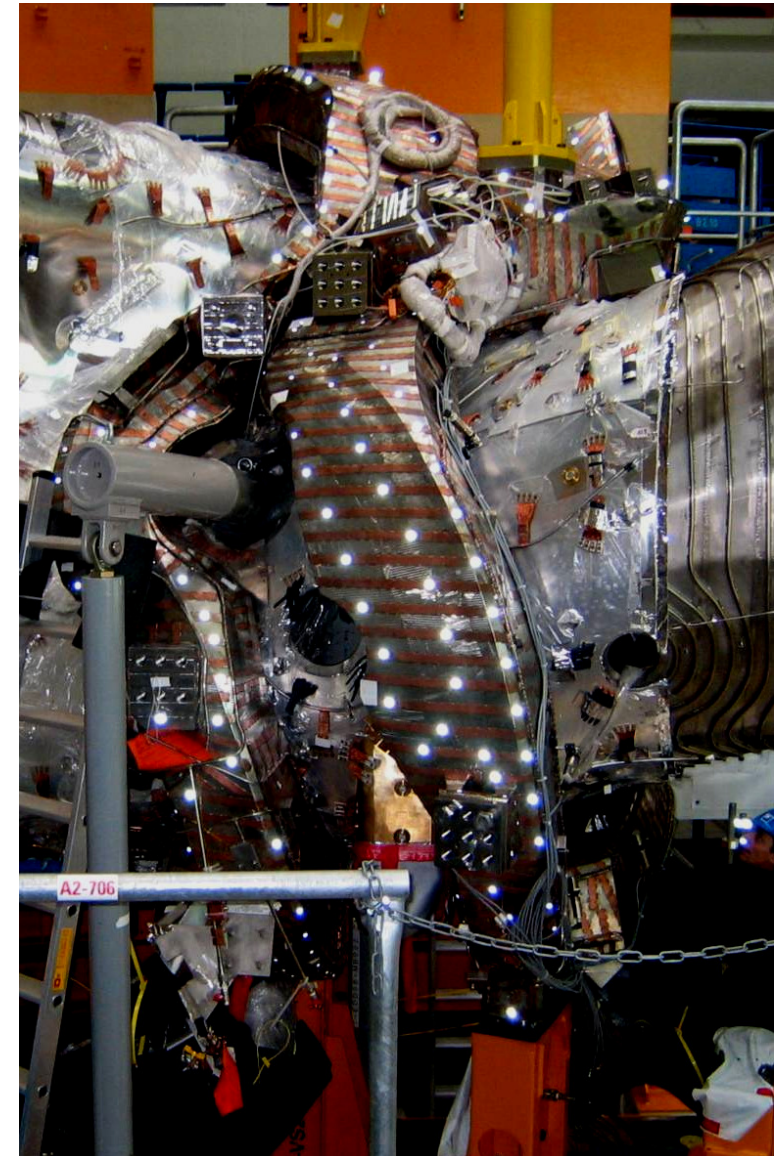
Glasprisma  
10 Infrarotmarken für die  
T-Cam

- Oberflächen, Körnerschläge
- verdeckte Punkte
- nur mit LTD 800



## Photogrammetriesystem

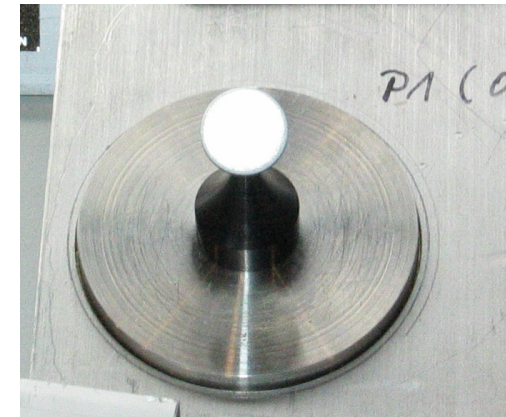
- Software: AICON 3D-Studio
- Nikon D1X - 6 Megapixel (f=20mm; bzw. f=24mm)
- 10mm retroreflektierende Messmarken
- Messabstand max. 5m
- Genauigkeit: 0,1 ...0,2mm



## Messmarken und Adapter



Mehrpunktadapter (IPP)



HUBBS-Adapter mit 25mm Offset



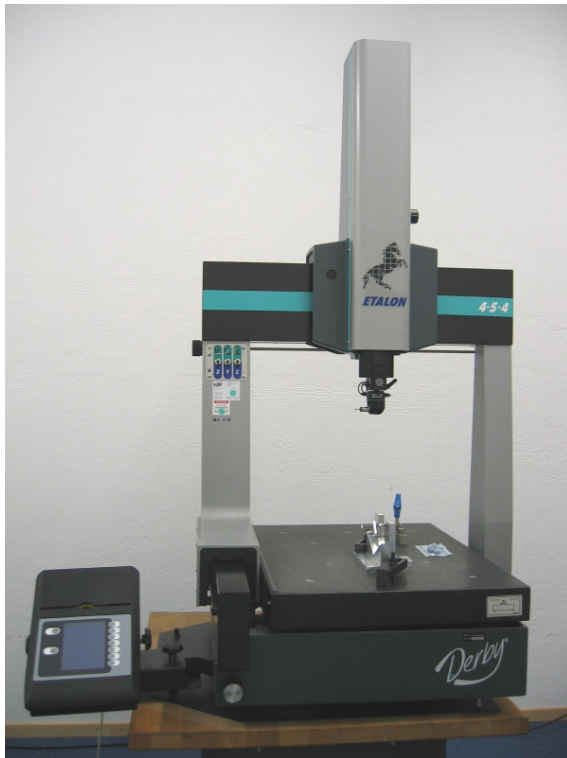
HUBBS-Adapter (Durchstoßungspunkt)

## FARO-Scanner am FARO-Arm

- Zum Scannen von Oberflächen
- Volumen (Kugel):  $d \leq 3.7\text{m}$
- Genauigkeit (Arm):  $\leq 0.073\text{mm}$
- Genauigkeit (Scanner):  $\leq 0.10\text{mm}$
- Abstand Scanner zum Objekt: ca. 20cm
- Scann-Raster: 0.8mm x 0.8mm
  
- Software: Polyworks



## KMG Etalon Derby



- für kleine Bauteile
- Messgenauigkeit: 0,01mm

## Industrial Total Station TDA 5005



- Einsatz selten
- Messgenauigkeit( $1\sigma$ ) bei 20m:  $\leq 0,3\text{mm}$



## Montagehalle



- rechtshändiges KoSy
- Messsäule ist Nullpunkt
- Auf beiden Ständen unterschiedliche KoSy
- Maschinentisch (25) und Seitenstruktur (10) mit Passbohrungen
- Halle nicht klimatisiert, aber temperiert

Montagestand 1A

## Torushalle

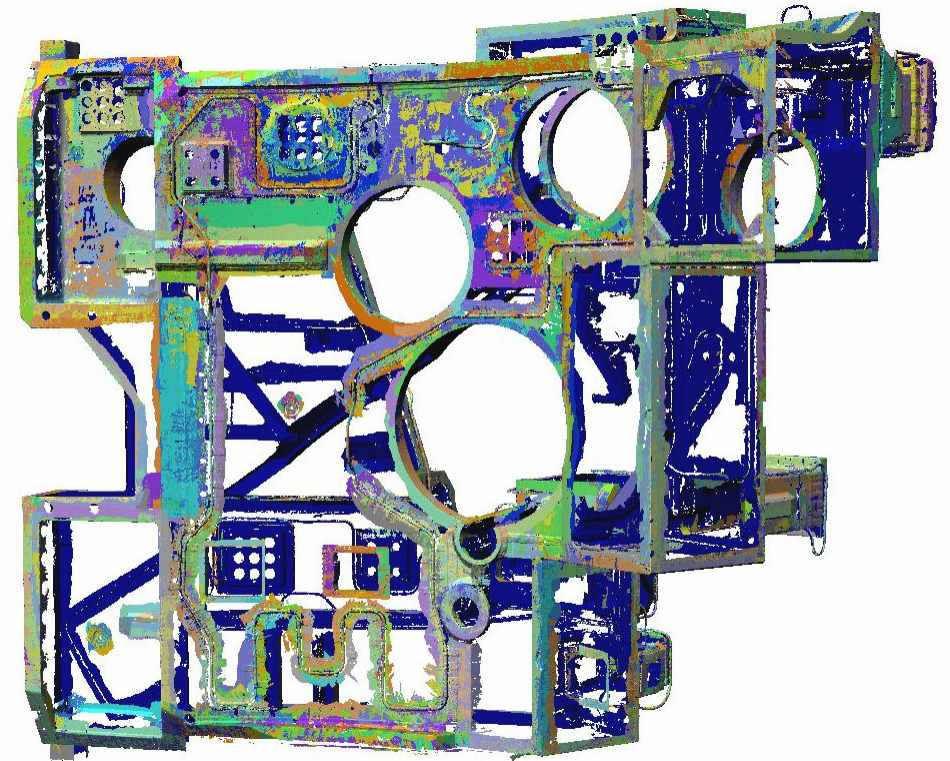


HUBBS-Aufnahme für 1.5" CCR



- Halle klimatisiert (32m x 30m x 18m)
- 102 Punkte in bis zu 5 verschiedenen Ebenen für Lasertracker und TDA 5005
- 6 Punkte in der obersten Ebene nur für TDA 5005
- innere Genauigkeit  $\approx 0,4\text{mm}$
- Vermessung und Horizontierung des Torushallennetzes – Diplomarbeit

## Scannen

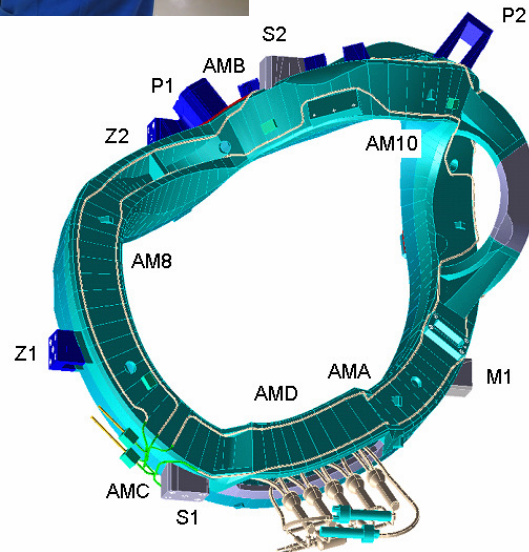


- As-build-model der Bauteile
- zur Kollisionsuntersuchungen
- Messung Spule – 5 Tage (2 - 3GB)

## Eingangsvermessung Spulen



- alle Passbohrungen (CCR-Werte, DP und Flächen)
- 3 Standpunkte
- Abweichungen zu Referenzmessung des Herstellers im best-fit max. 0,5mm
- Dauer der Messung 2 - 4h



Coordsys Transformation Solution

Coordsys ID: Stella BESTFIT

Comment:

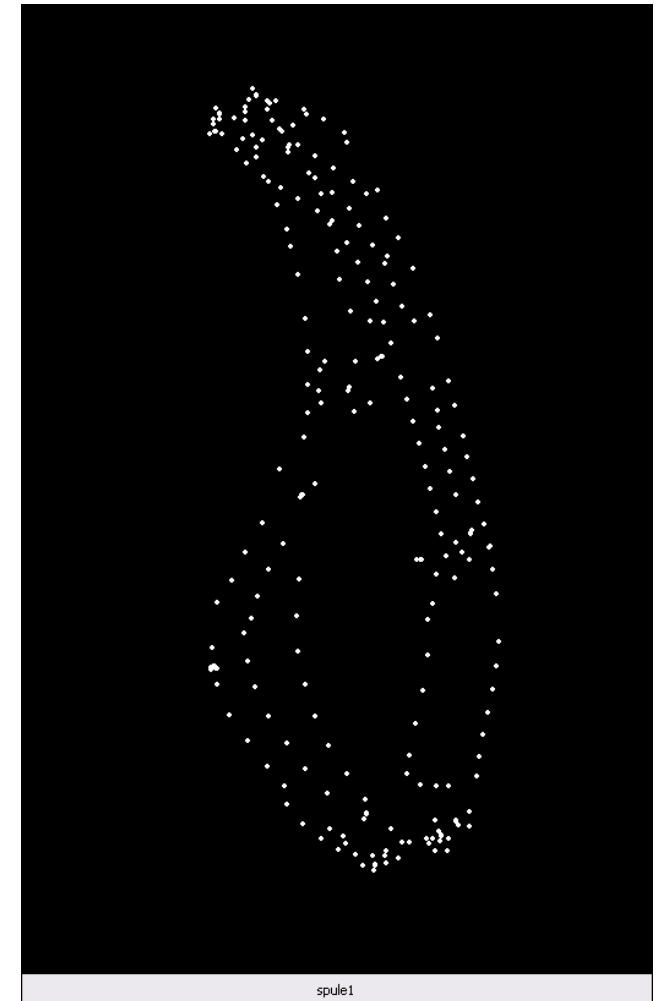
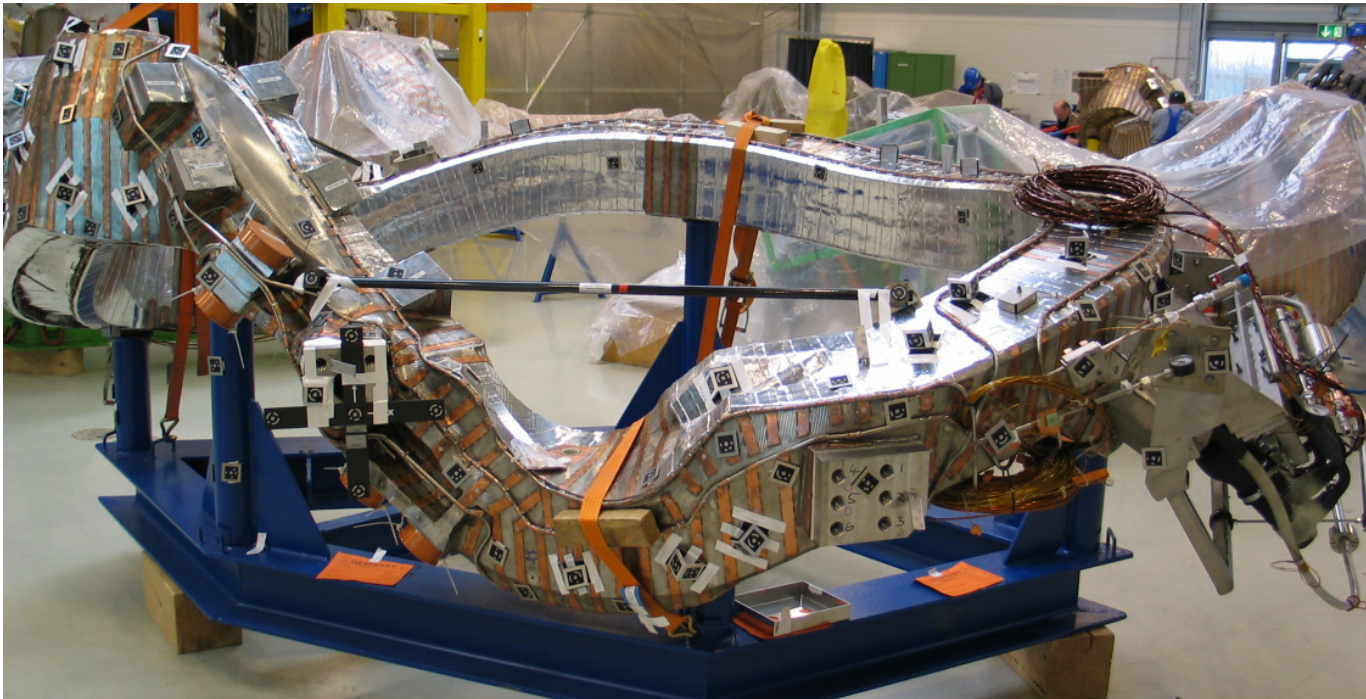
Set new Coordinate System as active  Inherit Scale from active CS

Total RMS Error: 0.216 [mm]

Point Deviations	dX	dY	dZ	DEV
Stella/M1	-0.320	-0.103	-0.204	0.3
Stella/P1	-0.207	0.096	-0.066	0.2
Stella/S1	0.119	0.208	-0.218	0.3
Stella/Z1	0.118	0.035	-0.111	0.11
Stella/Z2	0.166	-0.001	0.194	0.2
Stella/AM1	-0.072	0.029	0.023	0.0
Stella/AM2	-0.063	-0.283	-0.087	0.3
Stella/AM3	0.161	0.158	-0.179	0.2
Stella/AM4	-0.055	-0.086	-0.154	0.1
Stella/AMA	0.067	-0.013	-0.151	0.11
Stella/AMB	-0.040	0.141	0.072	0.11

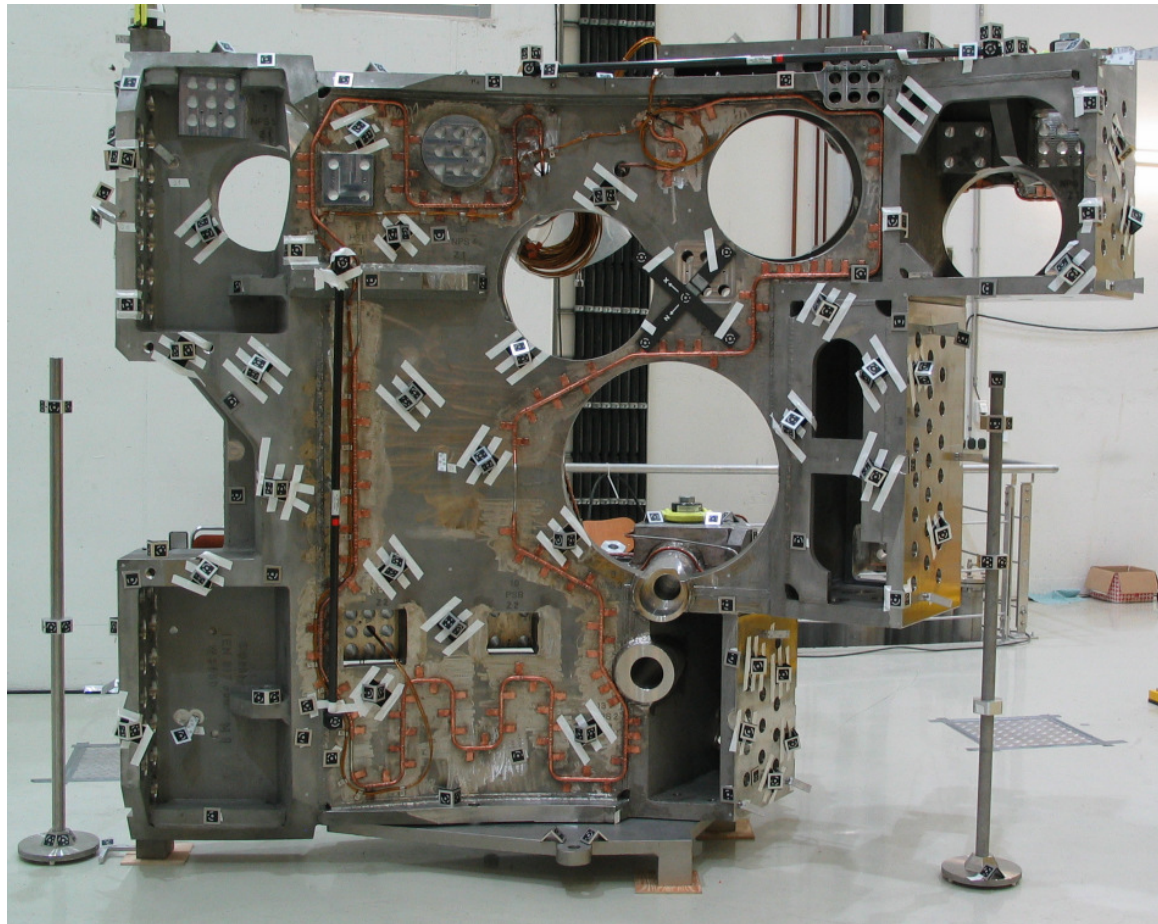
Buttons: Save, Close, << Back, Select ID..., Parameters..., Print, Report, Help

## Photogrammetrie von Spulen



- 180 - 200 uncodierte Marken
- ca. 200 codierte Marken
- 13 - 16 Adapter für Passbohrungen
- Messung mit 24mm Kamera
- 300 - 350 Einzelbilder
- mindestens 2 Messungen
- Gesamtdauer der Messung 8h
- Auswertung 8h

## Photogrammetrie des ZR



Innenseite des ZR

- ca. 150 uncodierte Marken
- ca. 330 codierte Marken
- 300 – 350 Messbilder
- Messung mit 24mm Kamera
- Gesamtdauer der Messung: 8h
- Auswertung: 8h

## Justage einer Spule



Befestigung der Spule über Spulenstandfüße  
und drei Gewindestangen

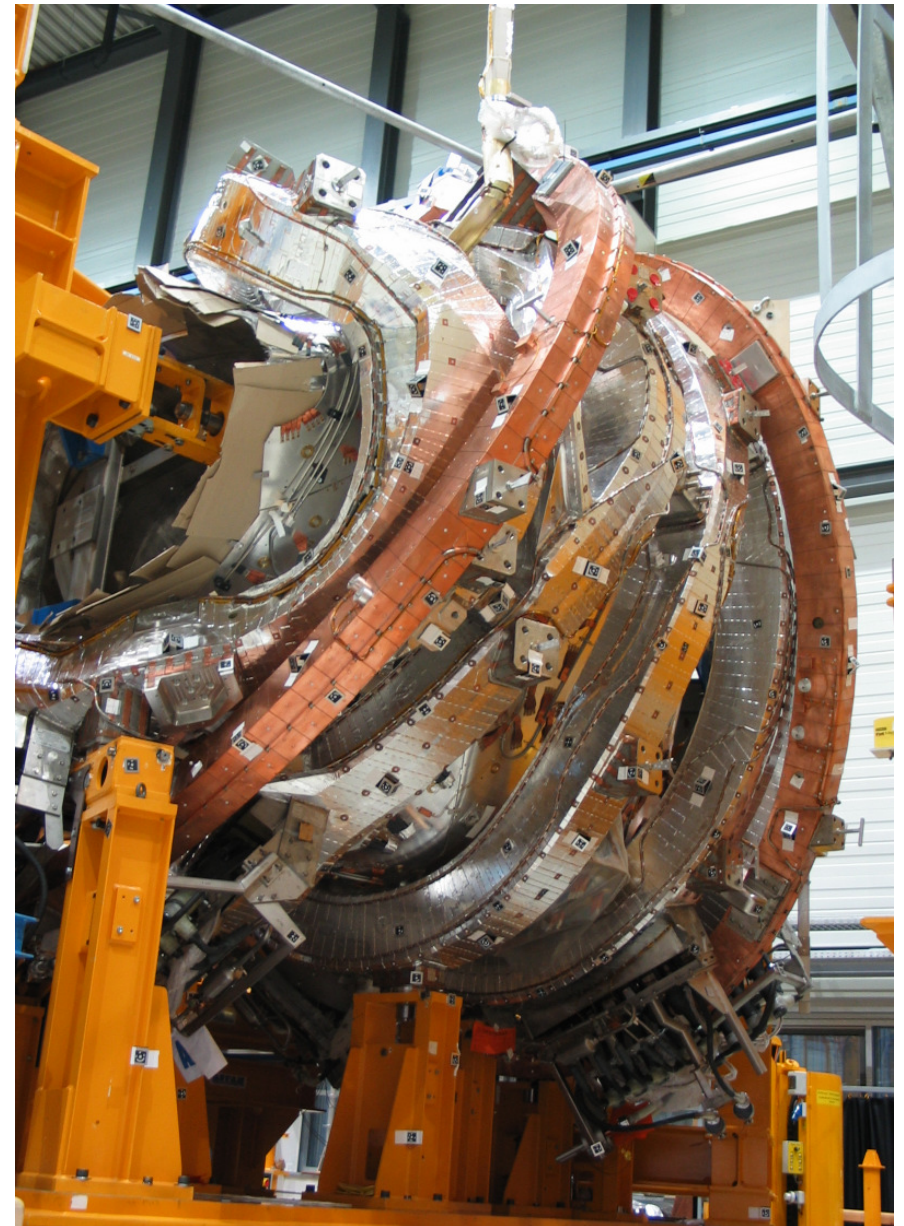


Detailaufnahme von der Kopfhalterung der Spule

- Ausrichten einer Spule: generell  $< 1,5 \text{ mm}$
- an besonderen Anschlusspunkten  $< 1,0 \text{ mm}$
- Wiederholgenauigkeit eines Ausrichtzustandes  $< 0.5 \text{ mm}$

## Vermessung Spulenverband mit LTD

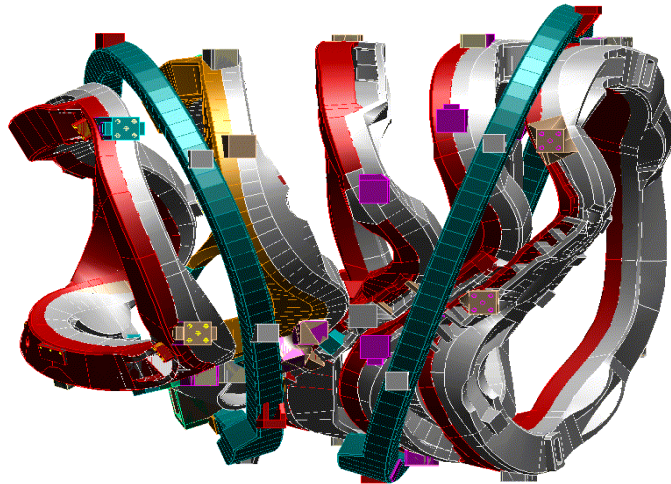
- 5 Standpunkte
- 55 von 92 messbaren Punkten gemessen
- max. Abweichung: 1,52mm
- Messzeit ca. 8h



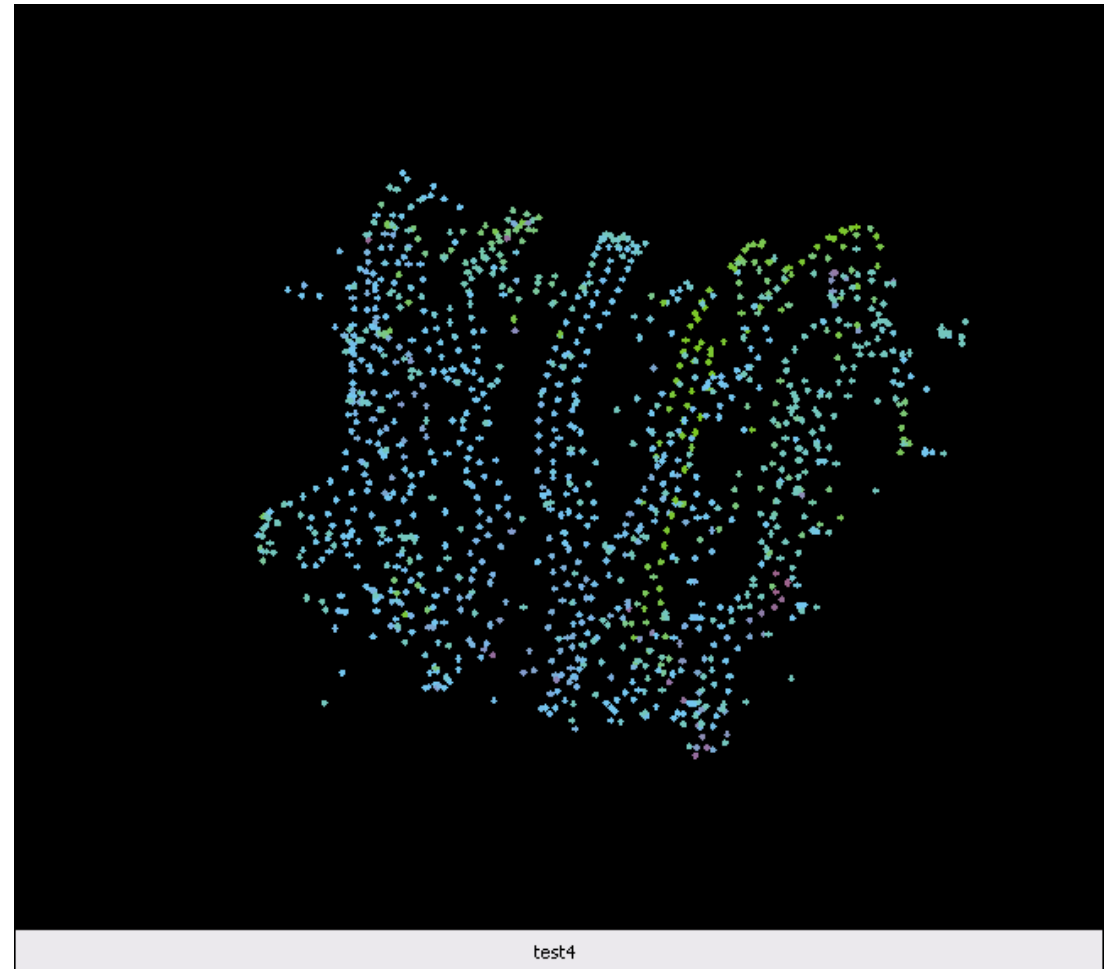
Spulenpaket Rückseite



## Vermessung Spulenverband mit Photogrammetrie

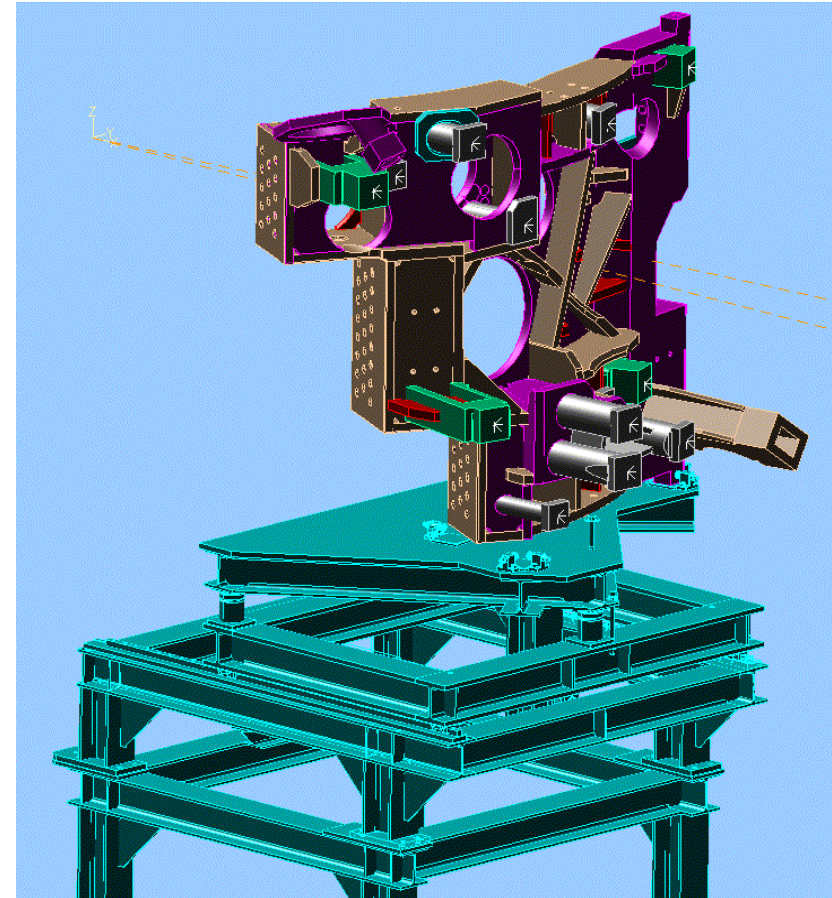


- ca. 1100 Bilder (Dauer 2h)
- 16 h Vorbereitung – Gesamtdauer 24h
- Rechenzeit pro Messung ca. 3h
- Abweichungen bis 1,6mm (Sollwerte Eingangsvermessung)
- 996 von 1515 Punkte



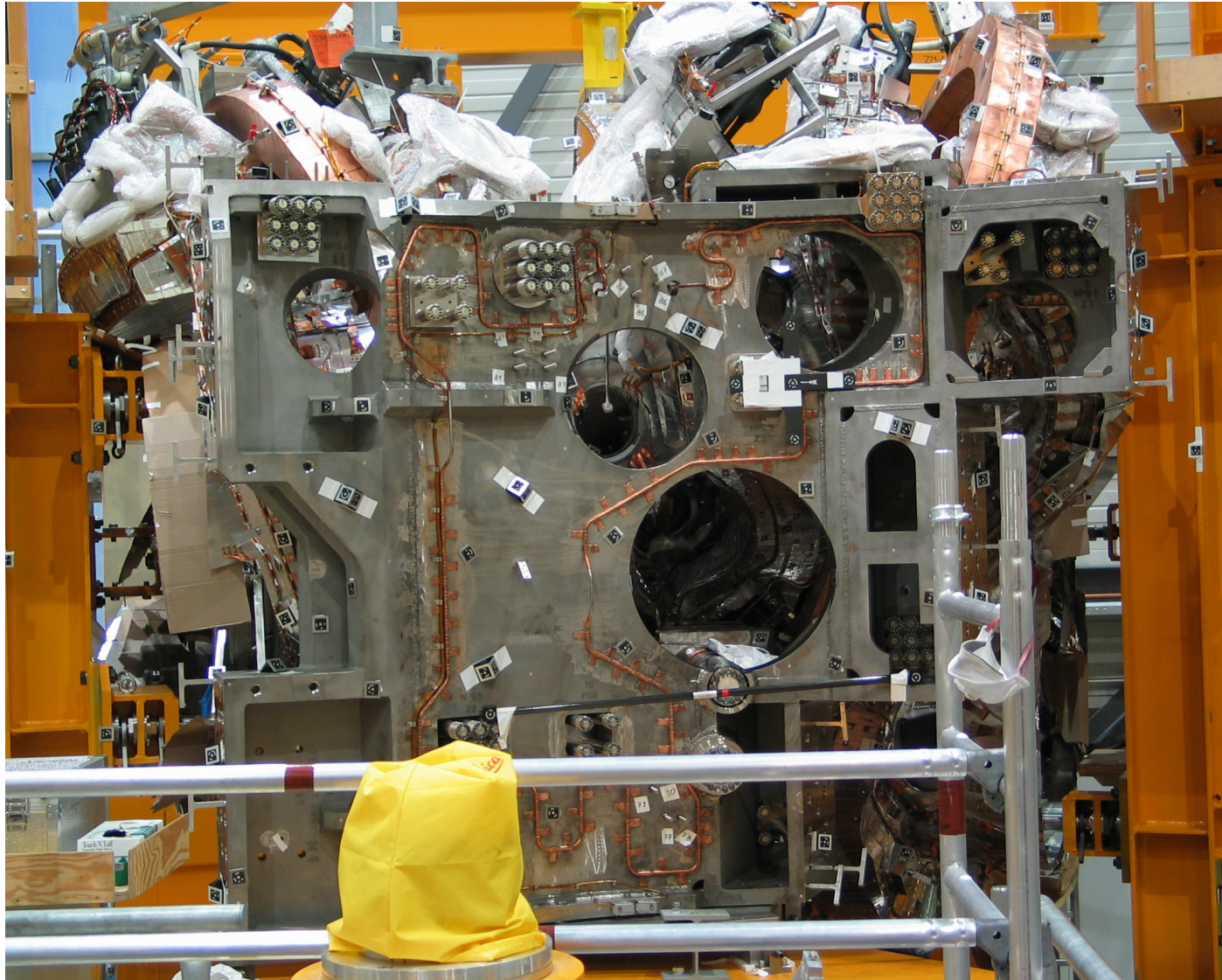
## Ausrichten des Zentralrings auf dem Verfahrtisch

- Trafo über alle Zentralringpassbohrungen der Spulen => Koordinatensystem
- Messen des Verfahrsstrahls – Errechnen Ausrichtwerte für ZR
- Aufsetzen ZR auf Verfahrtisch – Ausrichten
- Heranfahen an den Spulenverband
- Verschrauben und Verschweißen



Positionierung des ZR auf dem Verfahrtisch

## Sichtverhältnisse



## Zusammenfassung

- Messtechnik ist adäquat zusammengestellt mit LT, Photogrammetrie und Laserscanner
- Realisierung gestellter Anforderungen mit Messunsicherheit von 0,2 – 0,3mm
- geplante Toleranzen für erste Modul wurden gehalten



**Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit!**