

# Calibration of a force vector sensor with a multicomponent calibration system

*collaborative research project of PTB together with:*

**Gassmann Testing and Metrology GmbH**



*encouraged by:*



*PTB:*  
S. Lietz  
Dr. R. Kumme  
Dr. D. Röske  
Dr. F. Tegtmeier

*GTM:*  
D. Schwind  
U. Kolwinski

- Conventional precision force transducers measure forces only as scalar size.
- Transfer-standards for multi-component force and torque test stands do not exist.
- Nowadays multi-component force transducers have an uncertainty within a range of 0.5% and higher, they do not achieve the requirements of all customers in industry (tire development, aviation).
- No calibration procedures in deadweight force standard machines with lowest uncertainty in the realization of force exist

# Prototype of the new multi-component transducer

Constructive design of the prototype:

- Axial force: 100 kN
- Sideway forces: 10 kN
- Torque : 500 Nm
- Uncertainty: < 0,01%

Force vector sensor mounted in a force standard machine



**VN-Digitizer**  
Datei Ansicht MCA Aufzeichnung ?

raw data	transducer values	transformed
Roh Fx <b>-0.10136 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR	KVS Fx <b>0.1 N</b>	Trans Fx <b>0.1 N</b>
Roh Fy <b>0.11678 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR	KVS Fy <b>0.0 N</b>	Trans Fy <b>0.0 N</b>
Roh Fz <b>0.03387 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR	KVS Fz <b>0.1 N</b>	Trans Fz <b>0.1 N</b>
Roh S1 <b>-0.07638 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR	KVS Mx <b>0.0 N·m</b>	Trans Mx <b>0.0 N·m</b>
Roh S2 <b>0.05163 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR	KVS My <b>-0.1 N·m</b>	Trans My <b>-0.1 N·m</b>
Roh S3 <b>-0.03869 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR	KVS Mz <b>0.0 N·m</b>	Trans Mz <b>0.0 N·m</b>
Roh Mz <b>0.07029 mV/V</b> TARED CALIBRATION ERROR		

Calibrate all  
Tare all

Show channel  
 Tared  
 Linearised  
 Averaged

Start recording  
Stop recording  
Pause Recording  
Record single value

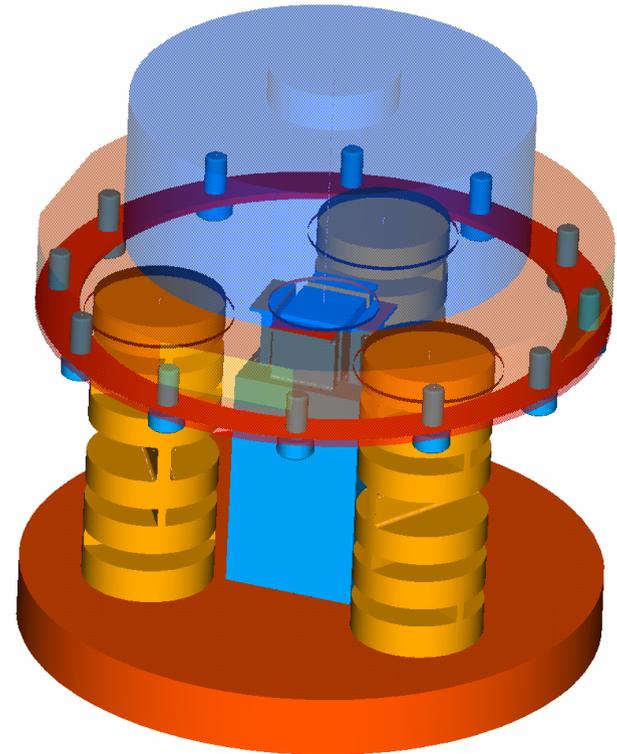
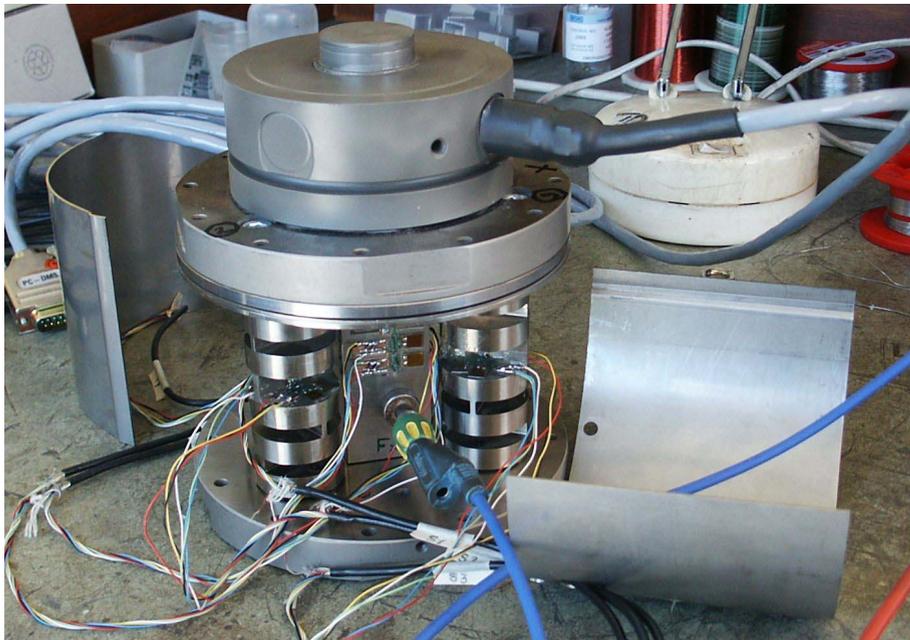
**GTM**

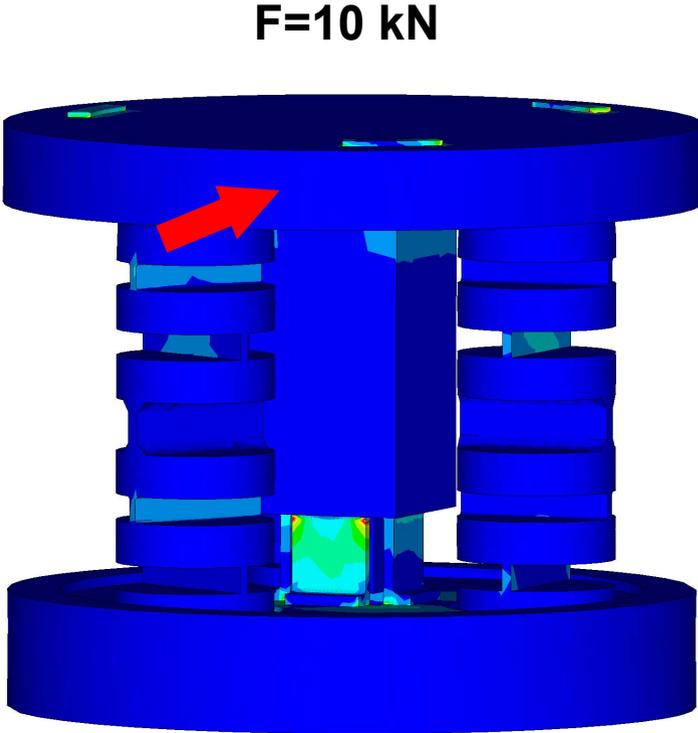
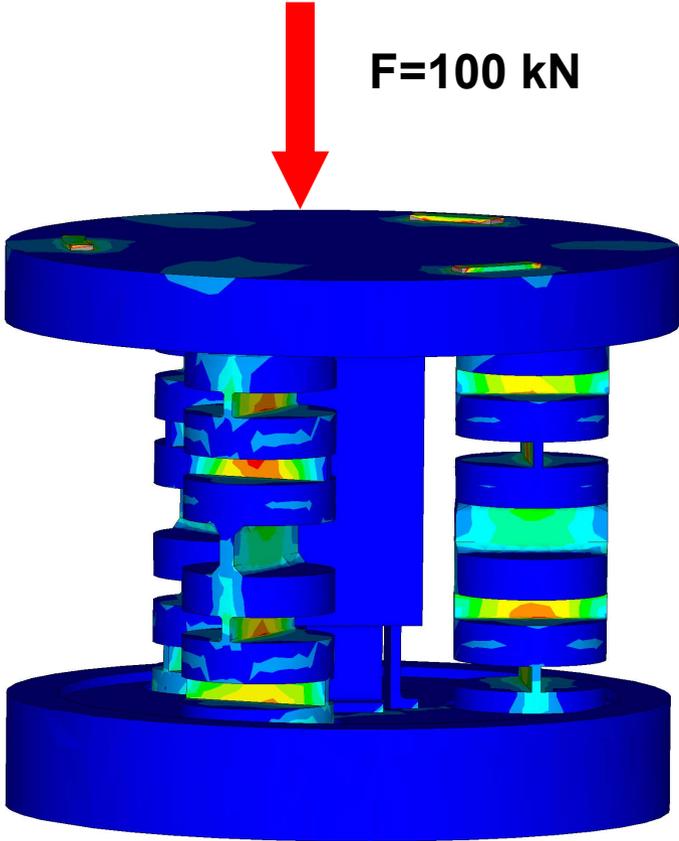
Zeit	KVS Fx	KVS Fy	KVS Fz	KVS Mx	KVS My	KVS Mz	Trans Fx	Trans Fy	Trans Fz	Trans Mx	Trans My	Trans Mz	Roh Fx	Roh Fy	Roh Fz	Roh S1	Roh S2

Bereit NUM

Start VN-Digitizer 10:14

# Internal structure of the new multi-component transducer





# Field for use of multi-component transducers



tire test stands



tests in aviation industry



wheel load sensor

# Field for use of multi-component transducers

first multi-component calibration facility accredited in DKD

Mehrkomponenten Kraft und Moment  
 Mehrkomponentenaufnehmer

250 N bis 1,2 MN  
 5 N·m bis 5kN·m



Deutscher Kalibrierdienst (DKD)  
 Akkreditierungsstelle bei der  
 Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)  
 vertreten im

**Deutschen Akkreditierungsrat**

**Akkreditierung**

Die Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes akkreditiert gemäß des  
 Kalibrierlaboratorium für mechanische Messgrößen  
 bei  
 GTM Gasemann Thies Messtechnik GmbH  
 Philipp-Reis-Straße 6  
 64404 Bickenbach

als Kalibrierlaboratorium nach DIN EN ISO/IEC 17025 für Kalibrierungen in den Bereichen:

**Kraft, Drehmoment, Spannungsverhältnis**

Bestandteil der Urkunde ist: Anlage 06 (1 Seite), 2005-08-03

DAR-Registrierungsnummer: DKD-K-10401-06  
 Akkreditiert im DKD seit: 1993-03-01

Braunschweig, 2005-08-03

Dr.-Ing. Wolfgang Stroh  
 Leiter der Akkreditierungsstelle

Seite 1 von 1 der Urkunde

Deutscher Kalibrierdienst  
 Akkreditierungsstelle bei der  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
 Braunschweig, 2005-08-03

**Anlage 6**

Zur Akkreditierung des Kalibrierlaboratoriums des Deutschen Kalibrierdienstes  
 bei GTM  
 Gasemann Thies Messtechnik GmbH, 64404 Bickenbach  
 (DKD-K-10401)

Das Kalibrierlaboratorium ist berechtigt für die in der Tabelle angegebenen Messgrößen und Kalibriergegenstände unter Einhaltung der nachfolgend genannten Bedingungen DKD-Kalibrierregeln auszuführen. In der Tabelle sind die relevanten angegebenen Messunsicherheiten nach DKD 3 (23.4.02) festgelegt. Diese sind ersetzte Messunsicherheiten mit einer Überdeckungsvermutlichkeit von 95 % und haben, sofern nichts anderes angegeben ist, den Erweiterungsfaktor  $k = 2$ . Messunsicherheiten ohne Einheitsangabe sind auf der Messwert folgende Kalibrierwerte, sofern nichts anderes vermerkt ist.

Permanentes Laboratorium

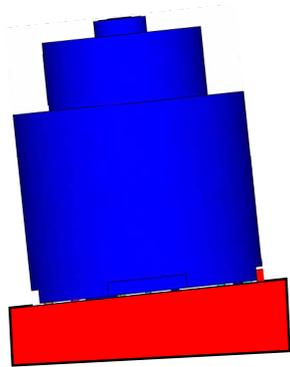
Messgröße / Kalibriergegenstand	Messbereich	Maßeinheiten / Verfahren	Messunsicherheit	Bemerkungen
Kraft	200 N bis 5 kN	DIN EN 10002-2	1,5 %	110-44-cub-30-ME
	5 kN bis 120 kN	ISO 9000-2	1,5 %	21-46-Kraft-3000
	120 kN bis 1000 kN	DIN EN ISO 1716	2,5 %	21-46-Kraft-3000
Drehkraft	20 N·m bis 1000 N·m		2,5 %	21-46-Kraft-3000
	200 N·m bis 2 kN·m		1,5 %	21-46-Kraft-3000
Drehmoment	5 N·m bis 100 N·m	DIN 51308	2,5 %	Klasse 3 B 1 nach DIN 51308-1:Ed.10/14
	100 N·m bis 5 kN·m	DIN 51308-2	1,5 %	Klasse 3 B 1 nach DIN 51308-2:Ed.10/14
	5 kN·m bis 50 kN·m	EN 12194	1,5 %	Klasse 3 B 1 nach DIN 51308-2:Ed.10/14
Drehmoment-Transducer	5 N·m bis 2 kN·m		2,5 %	Klasse 3 B 1 nach DIN 51308-2:Ed.10/14
	200 N bis 1,2 MN 5 N·m bis 5kN·m		0,10 %	Mehrkomponenten-Mehrkomponentenaufnehmer
Spannungsverhältnis	2 mV/V 4 mV/V 10 %-Dreh	Gleichstrom Betriebsstrom -10 %	0,2 µV/V	Kalibrierung von DMS-Messbrücken- und Anzeigegeräten
	2 kV mV/V Betriebs	Messbrücke 220 Hz Betriebsspannung 5 V	0,05 µV/V	
	0,2 bis 2 kV mV/V über Betriebs		0,5	

Die Kalibrierverfahren für die in den Tabellen aufgeführten Messgrößen/Kalibriergegenstände sind im Qualitätsmanagement-Handbuch (QM) des Kalibrierlaboratoriums festgelegt.  
 Für die Kalibrierungen sind die in DIN 91301 aufgeführten Normale, Mess- und Hilfsvorrichtungen zu benutzen, wenn diese dort festgelegten Fristen und nach den Vorgaben zu rekalibrieren, die den Messunsicherheitsbudgets zu Grunde liegen.  
 Diese Anlage 6 beschreiben den Gesamtumfang der Akkreditierung für die Messgrößen Kraft, Drehmoment und Spannungsverhältnis und ersetzt die Anlage 5 vom 2004-10-05.

Seite 1 von 1 der Anlage 6  
 DKD-K-10401

- a) additional equipment for force standard machines to generate sideway forces and moments
  
- b) inclined mounting of the force transducer in dead weight machines generates combination of axial load and additional components
  
- c) multi-component calibration device for generating arbitrary force and moment vectors

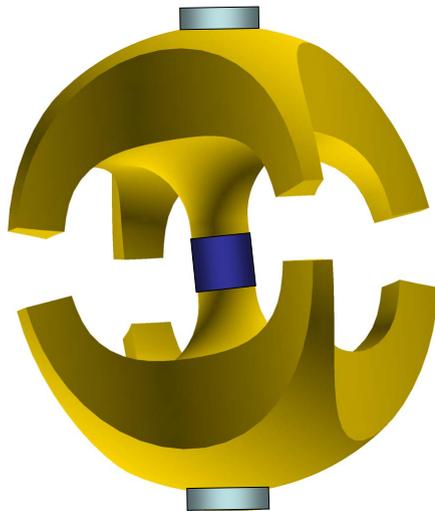
# Methods for generating force and moment vectors



wedge

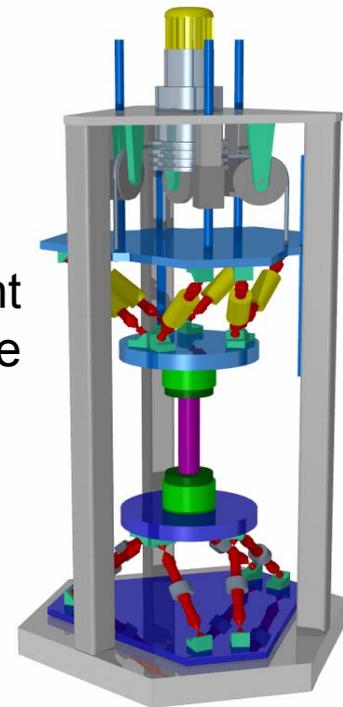


load-frame for the 100-kN-FSM to generate sideways forces



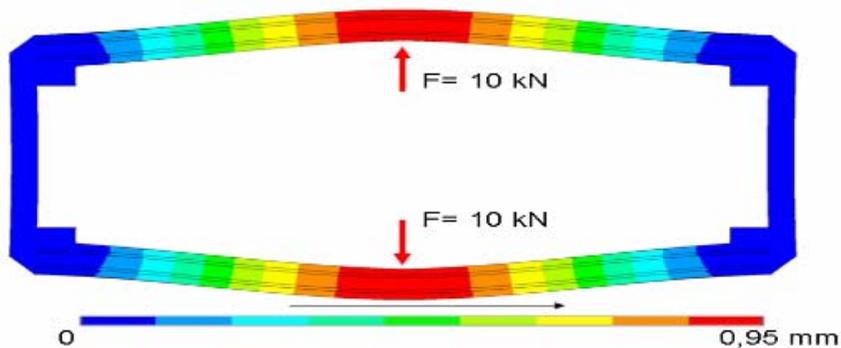
spherical calibration facility

multi-component calibration device

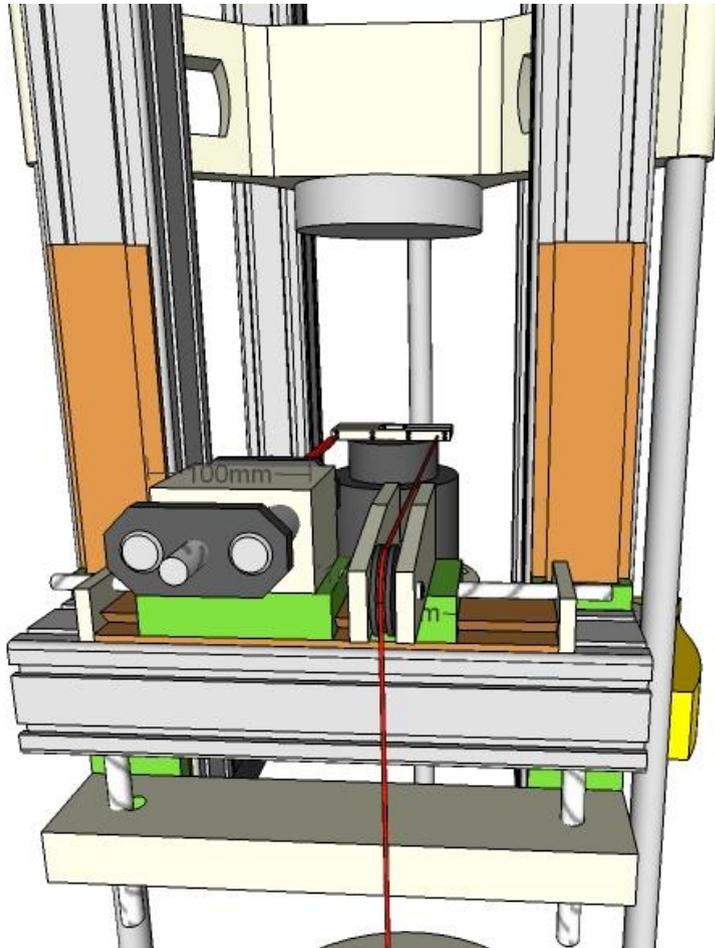


## a) Additional equipment

frame for generating sideway forces which is clamped around the cross heads of the 100-kN-force-standard-machine

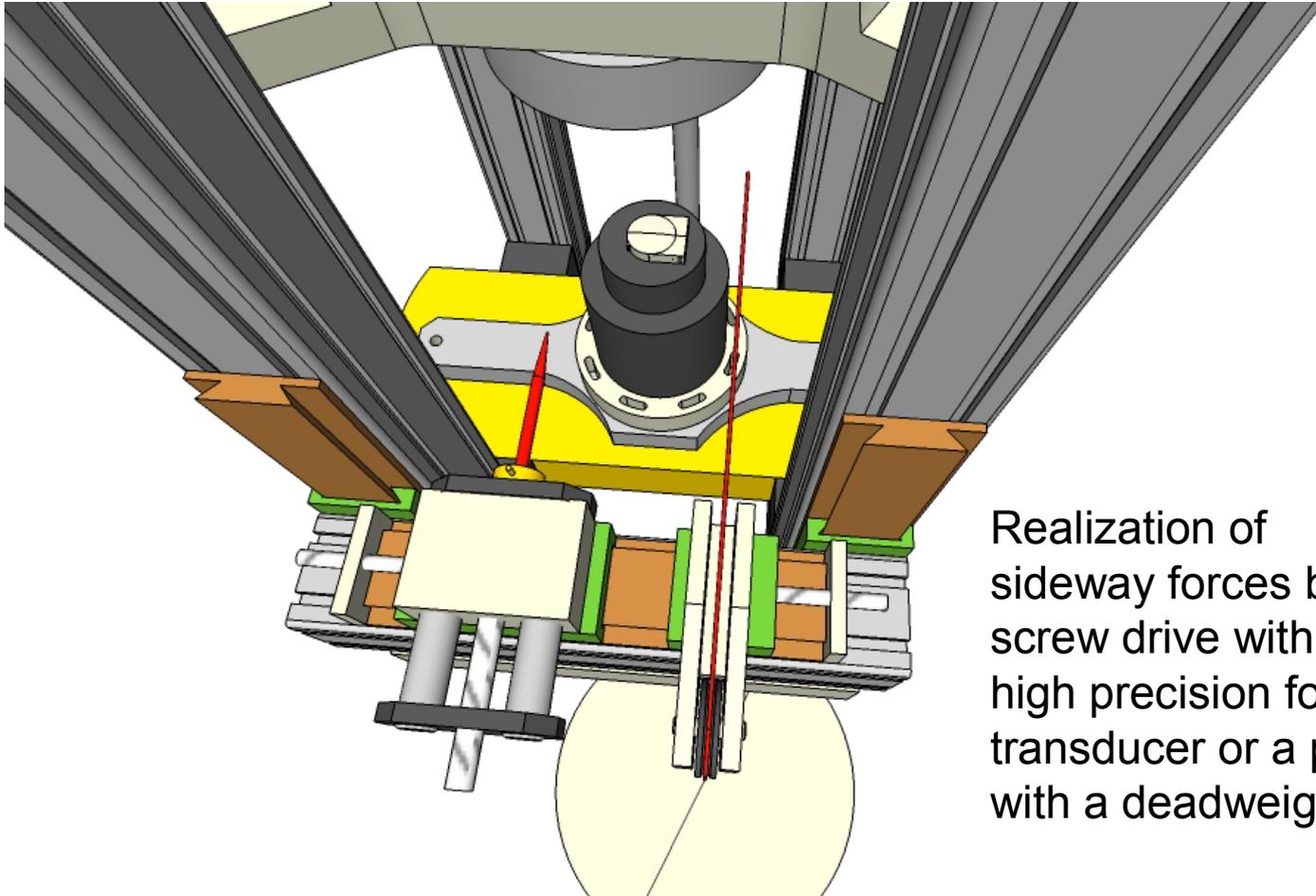


## a) Additional equipment



Vertically and horizontally movable crosshead at the load frame with loading facilities

## a) Additional equipment



Realization of  
sideway forces by a  
screw drive with a  
high precision force  
transducer or a pulley  
with a deadweight

## b) Inclined mounting

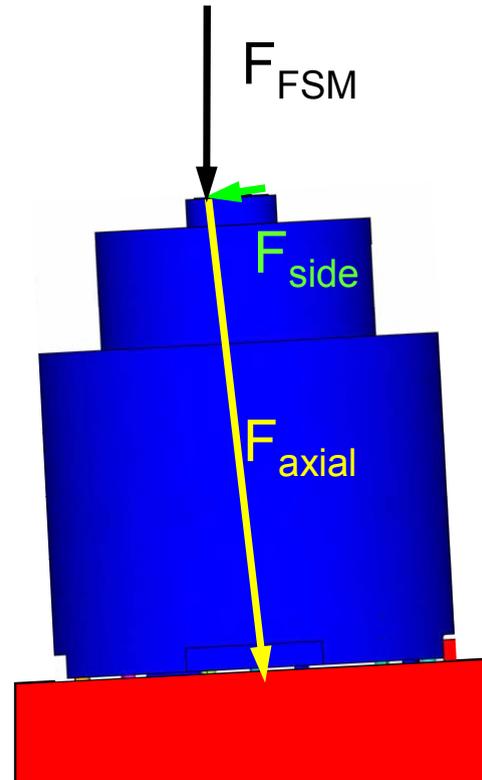
Realization of sideways force by mounting the vector sensor on a wedge inside the FSM.

*Disadvantages:*

- uncertainties in centering
- no arbitrary angles

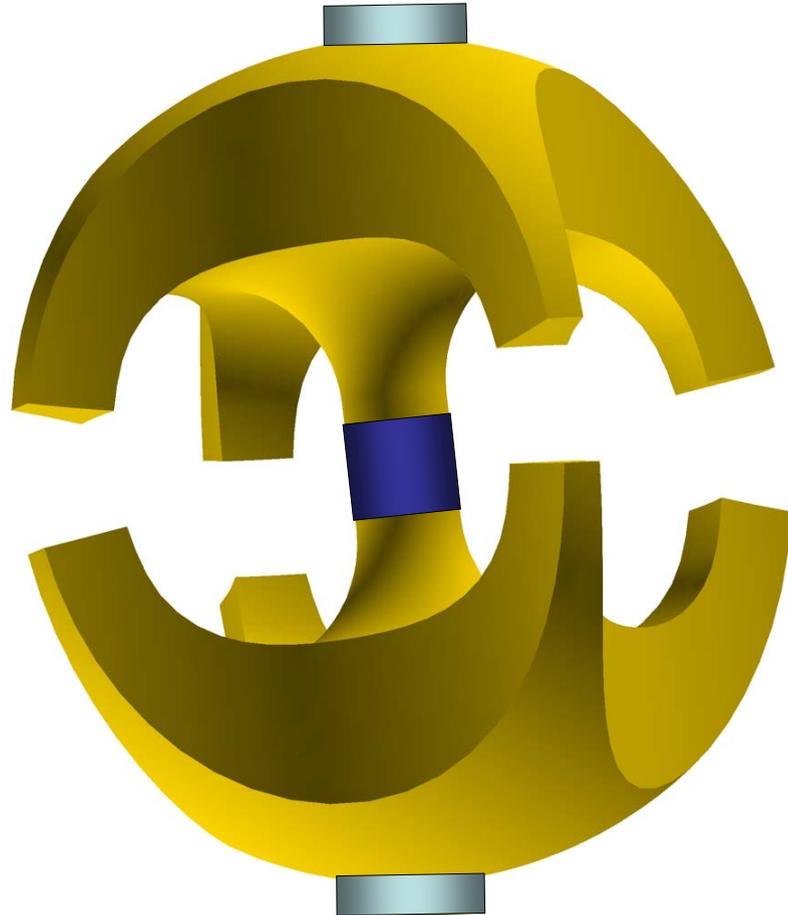
*Solution:*

Development of a so called spherical calibration body

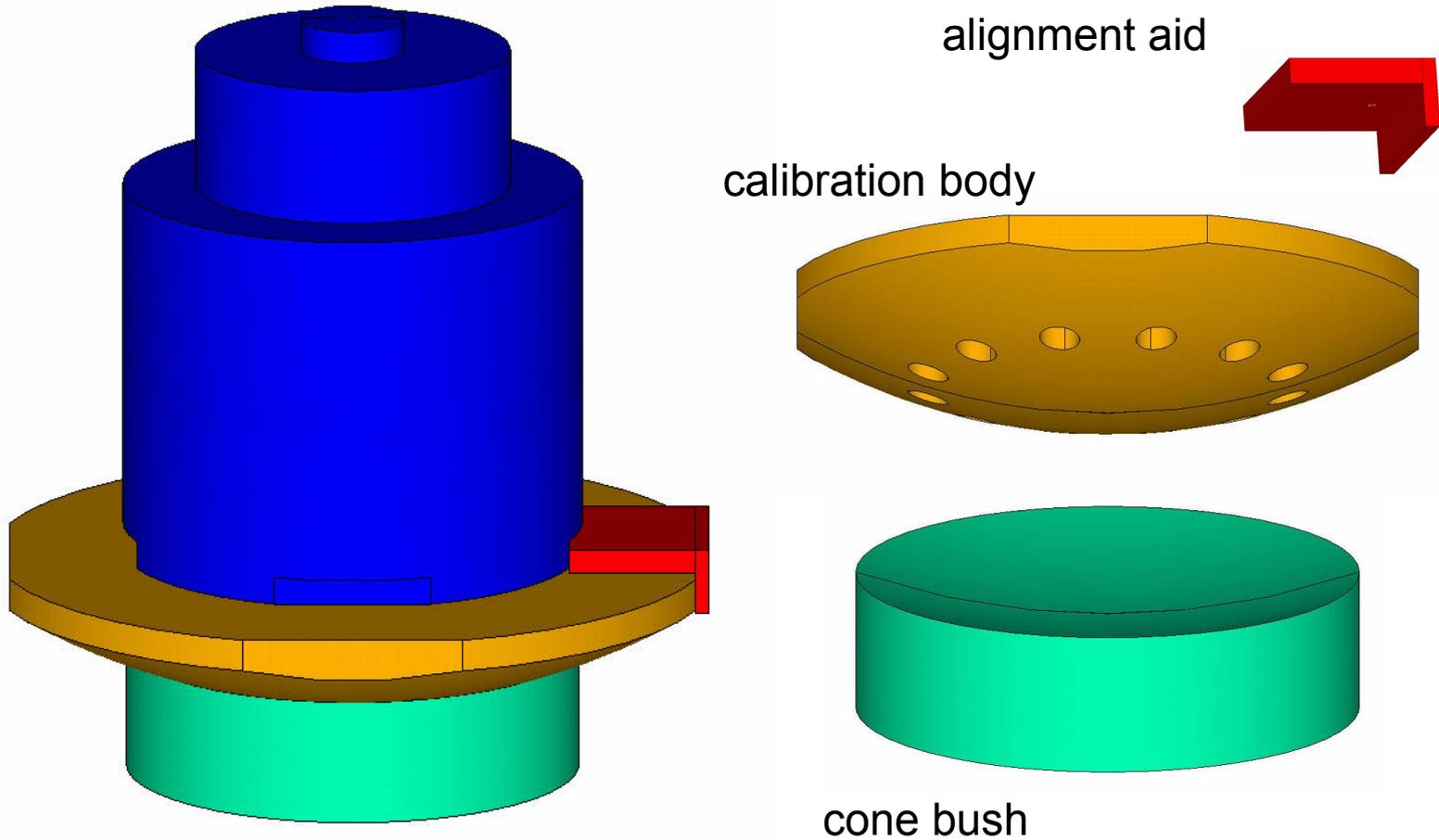


## b) spherical calibration body

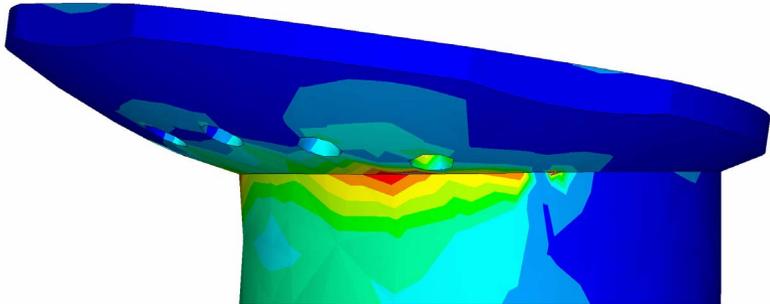
- Only one centering for measurement in different rotational positions
- Arbitrary angles
- Centre of the sensor is not moved by turning



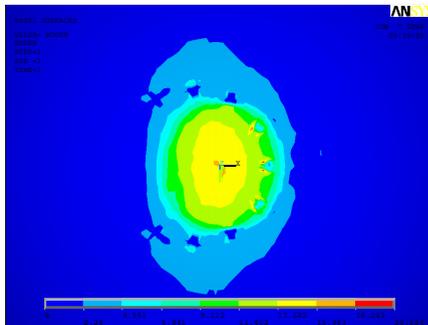
## b) spherical calibration body - optimisations



## b) spherical calibration body - optimisations



Numerical simulation to analyse maximum stress at the maximum gear angle and to analyse the influence of the mounting boreholes



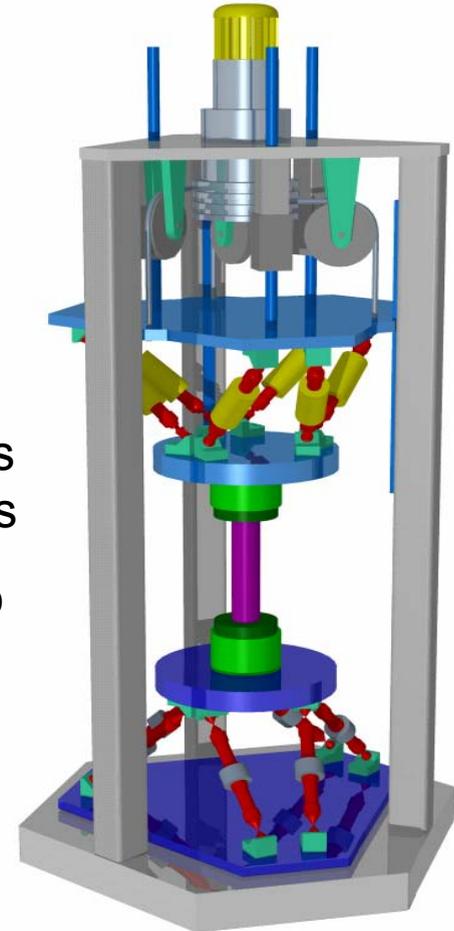
## c) multi-component calibration device



Realization of all directions of forces and moments and their arbitrary combination

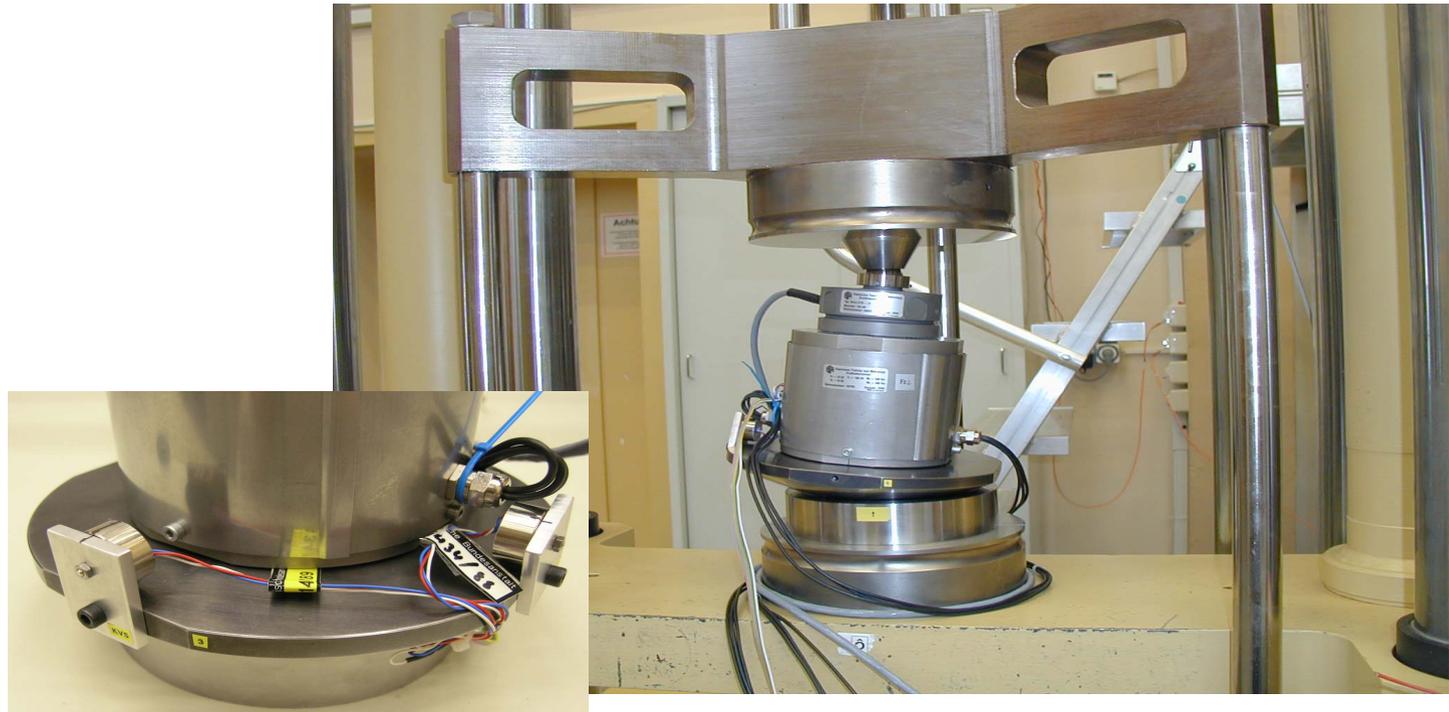
But:

- Dead weight machines have lower uncertainties
- No direct tractability to the standards



## Selection of the calibration method

**For calibration of the force vector sensor the spherical calibration artefact method was chosen because of the low uncertainty achievable by using dead weight force standard machines.**



$$f_i = \sum_{j=x}^z a_{ij} F_j$$

$$i = x; y; z$$

$$(a_{ij}) = A$$

$$A = \begin{pmatrix} 0,34 & 5,2 \cdot 10^{-3} & 1,0 \cdot 10^{-4} \\ 3,7 \cdot 10^{-3} & -0,34 & -1,2 \cdot 10^{-4} \\ -2,4 \cdot 10^{-5} & -2,1 \cdot 10^{-5} & 2,0 \cdot 10^{-2} \end{pmatrix}$$

$$F_i = \sum_{j=x}^z b_{ij} f_j$$

$$i = x; y; z$$

$$A^{-1} = (b_{ij})$$

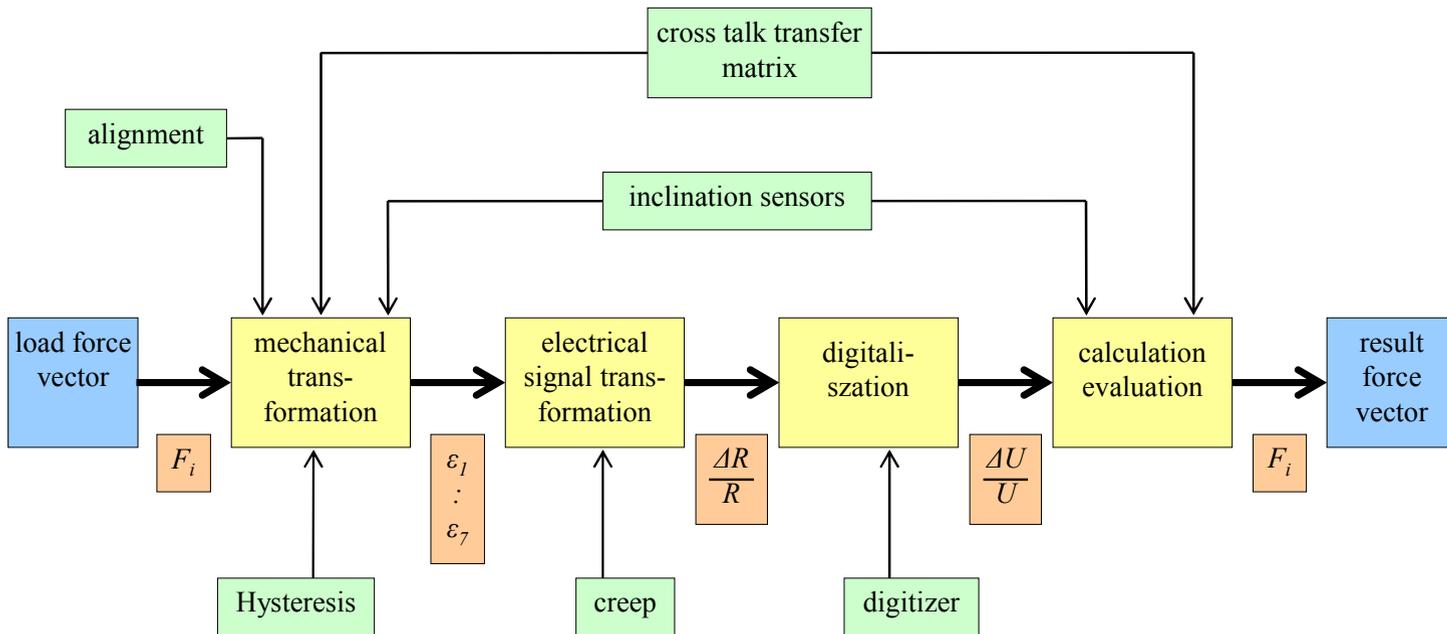
$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 3,0 & 4,6 \cdot 10^{-2} & -1,5 \cdot 10^{-2} \\ 3,2 \cdot 10^{-2} & -3,0 & -1,8 \cdot 10^{-2} \\ 3,5 \cdot 10^{-3} & -3,0 \cdot 10^{-3} & 49,9 \end{pmatrix}$$

# Components of Uncertainty, regarding side forces $F_x$ and $F_y$ and axial force $F_z$



component	$u_i \rightarrow (F_x, F_y)$	$u_i \rightarrow (F_z)$
alignment	$7 \cdot 10^{-4} \text{ mV/V}$	$4 \cdot 10^{-4} \text{ mV/V}$
digitizer	$5,2 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$	
hysteresis	$6 \cdot 10^{-3} \text{ mV/V}$	$5 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$
creep	$4 \cdot 10^{-5} \text{ mV/V}$	
inclination sensor	$4 \cdot 10^{-2}^\circ$	
response matrix	$8 \cdot 10^{-4} \text{ mV/V}$	$4 \cdot 10^{-8} \text{ mV/V}$

# Uncertainty Model of the force vector sensor calibration



# Uncertainty Result

component	$\rightarrow (F_x, F_y)$	$\rightarrow (F_z)$
alignment	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
digitizer	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
hysteresis	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
creep	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
inclination sensor	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-6}$
response matrix	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-7}$
combined uncertainty	<b><math>7,4 \cdot 10^{-3}</math> kN</b>	<b><math>1,1 \cdot 10^{-4}</math> kN</b>

**The results of investigation show that the new force vector sensor achieves lower uncertainties in multi-component force measurement. This will allow to use the sensor in precision measurements for instance as transfer standard for calibrating multi-component force measuring stands and for investigating parasitic effects in high precision force standard machines. As the sensor is also capable of measuring moments analogue methods for calibration will be developed so all six components of a force and moment vector can be measured with lower uncertainty.**