

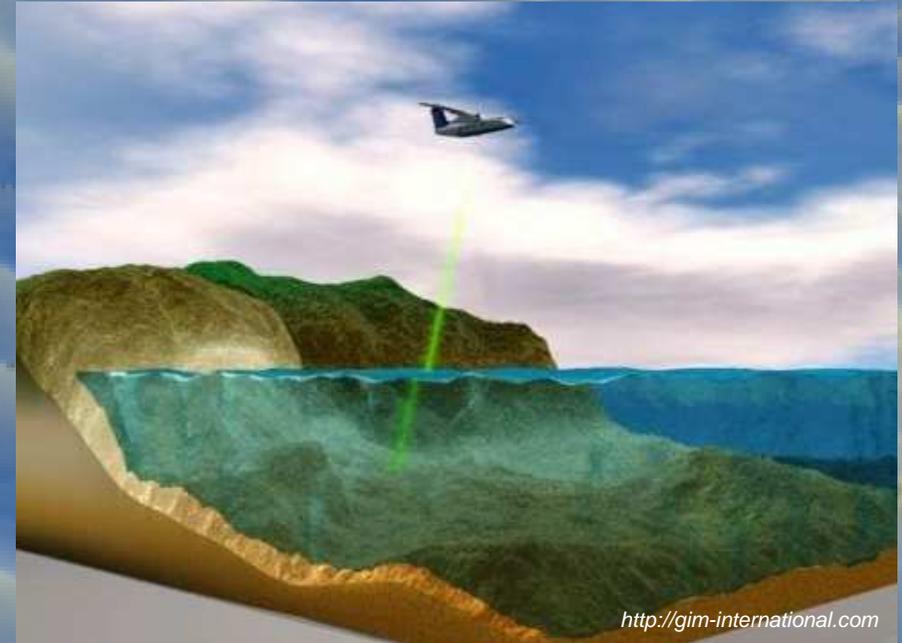
# Kalibrierung von Multisensorsystemen

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Brüggemann  
Dr.-Ing. Thomas Artz  
Dr.-Ing. Robert Weiß

Referat Geodäsie (M5)  
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

170. DVW-Seminar und 32. Hydrographentag  
12. bis 14. Juni 2018 in Lindau (Bodensee)

# Mögliche Geräteträger von Multisensorsystemen



# Kalibrierung von Multisensorsystemen am Beispiel eines Fächerlotsystems



GNSS-Antenne<sub>Pos2</sub>

„Hildegard von Bingen“

Länge 25,6m

Breite 7,6m

Tiefgang 1,0m

GNSS-Antennen<sub>Navigation/Heading</sub>



GNSS-Antenne<sub>Pos1</sub>



Inertiale Messeinheit  
(IMU)



StB-Transducer

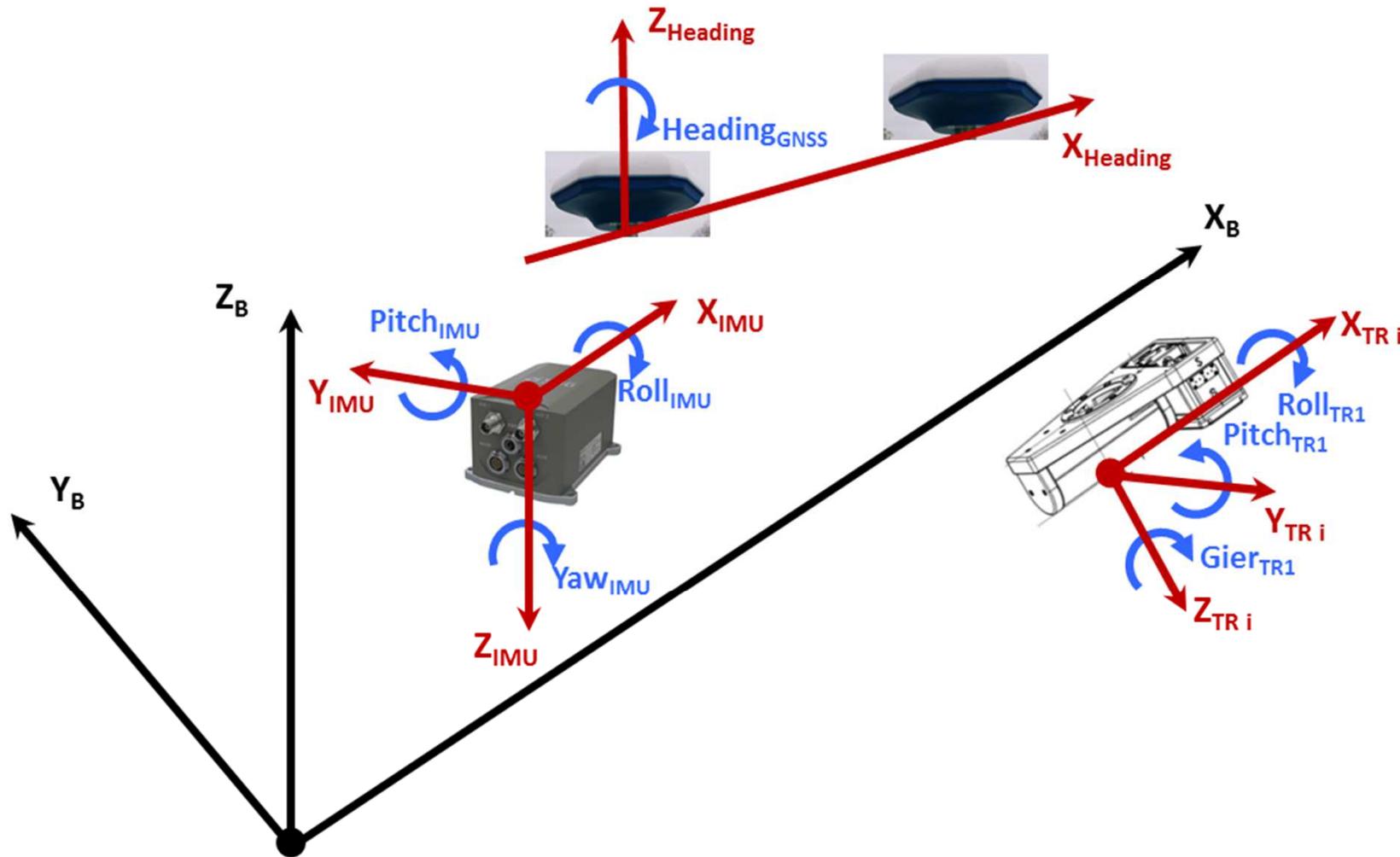


Mittel-Transducer



BB-Transducer

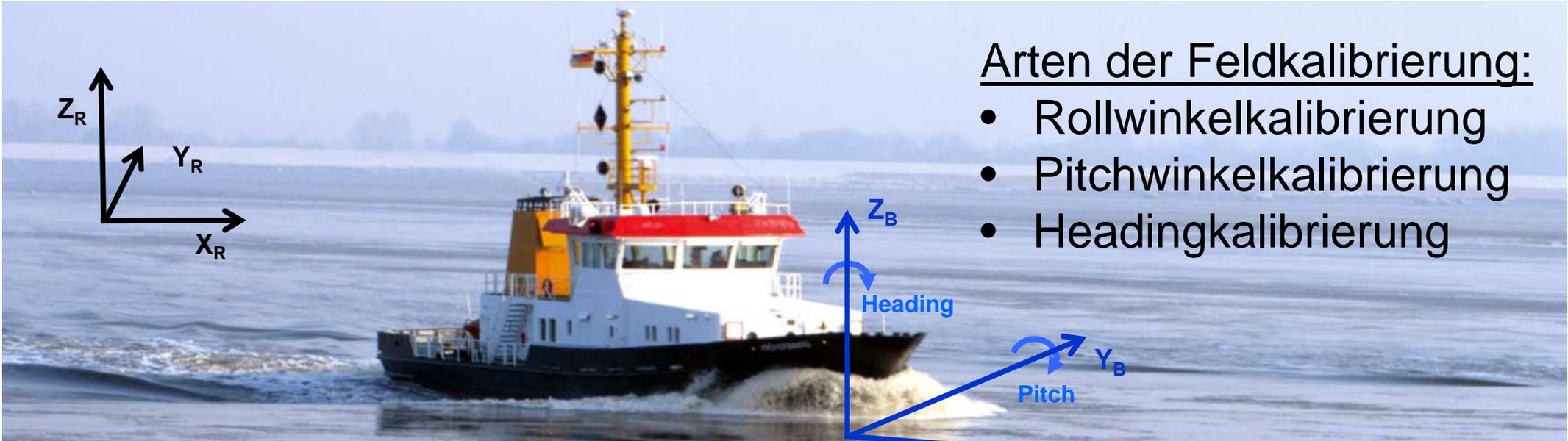
# Ziel der Kalibrierung



Ziel: bestmögliche Passung aller Messstreifen zueinander  
und bestmögliche Georeferenzierung!

# Zielgrößen der Kalibrierungen

Systemkomponenten	Zielgrößen	Feld-Kalibrierung	Einmessung
Gesamtsystem (bestmögliche Messstreifenanpassung)	Roll	✓	
	Pitch	✓	
	Heading	✓	
Primärsensor 1 (z.B. Fächerlotsystem, Laserscanner, Kamera, ...)	Einbauwinkel <sub>Roll</sub>	X	✓
	Einbauwinkel <sub>Pitch</sub>	X	✓
	Einbauwinkel <sub>Gier</sub>	X	✓
Headingsystem 1	Heading_Offset	X	✓
IMU 1	Einbauwinkel <sub>Roll</sub>	X	✓
	Einbauwinkel <sub>Pitch</sub>	X	✓
	Einbauwinkel <sub>Yaw</sub>	X	✓
...	...	X	✓



## Arten der Feldkalibrierung:

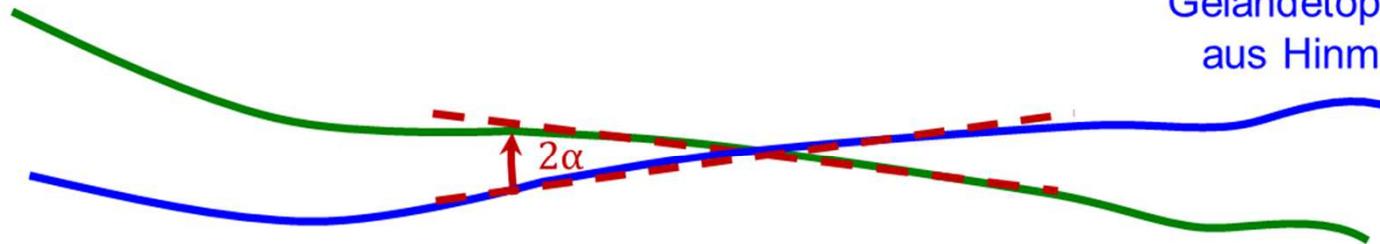
- Rollwinkelkalibrierung
- Pitchwinkelkalibrierung
- Headingkalibrierung

## Voraussetzungen:

- geeignete Geländestrukturen
  - Roll: ebene Geländeoberfläche
  - Pitch/Heading: stark strukturierte Oberfläche oder Objekte
- gute Rahmenbedingungen (Hydroakustik, Wasserschall, ...)
- Reihenfolge der Kalibrierung beachten, iterative Vorgehensweise
- ...

# Feldkalibrierung: Rollwinkel

## Berechnungsskizze:

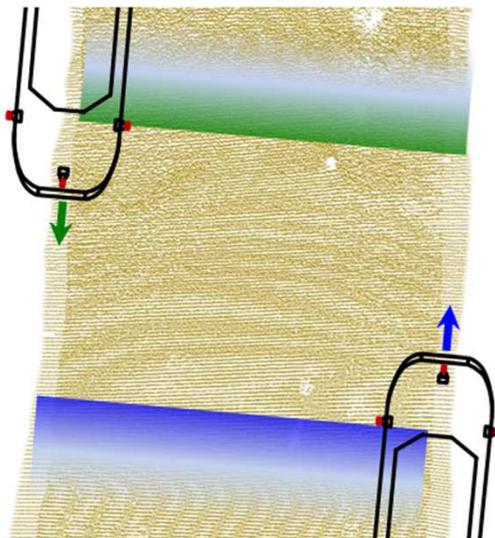


Profilschnitt durch  
Geländetopographie  
aus Hinmessung

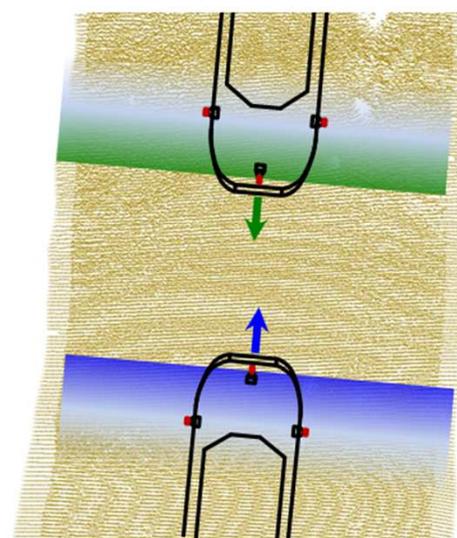
Profilschnitt durch  
Geländetopographie  
aus Rückmessung

## Messanordnung:

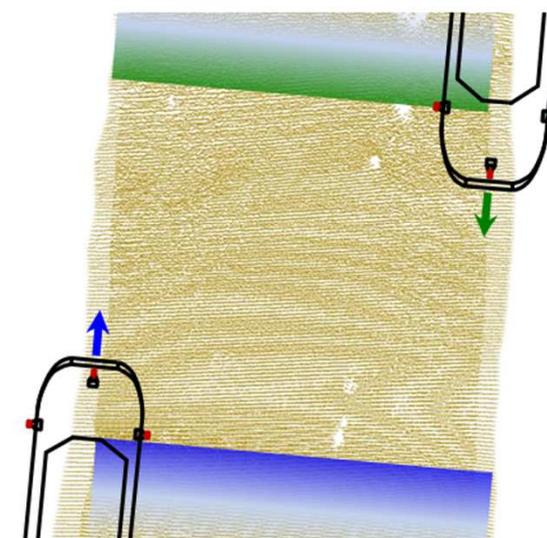
Transducer  
backbordseitig



Transducer  
zentrisch

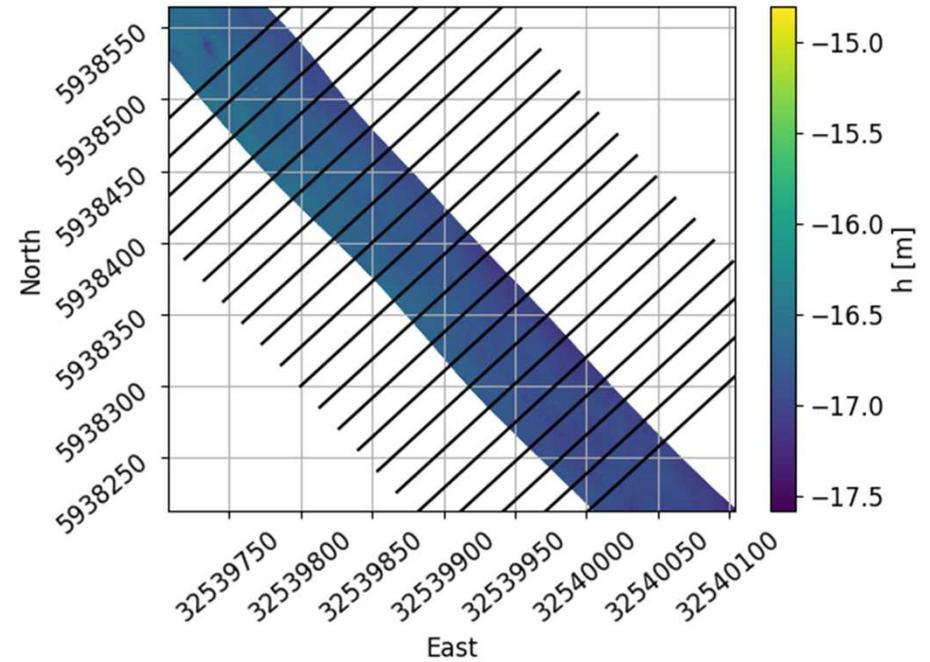


Transducer  
steuerbordseitig



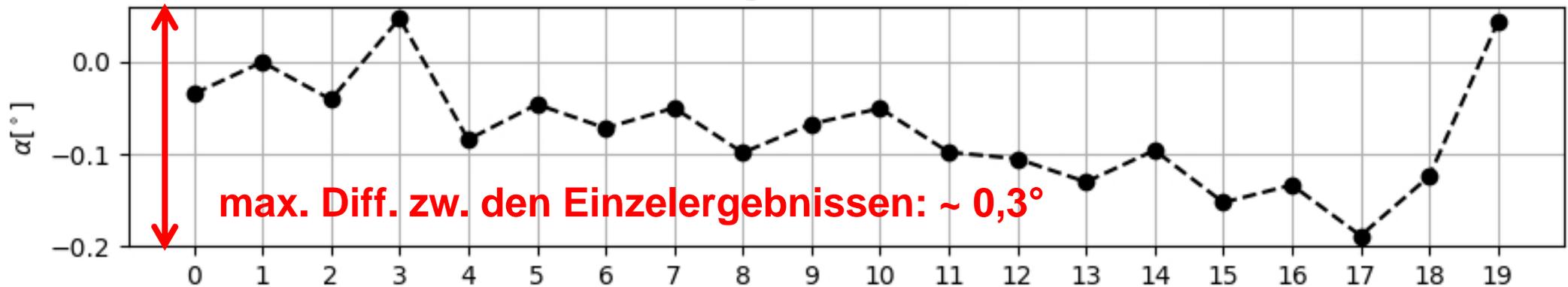
# Feldkalibrierung: Rollwinkel

Beispiel zur Beurteilung der zu erreichenden Genauigkeit



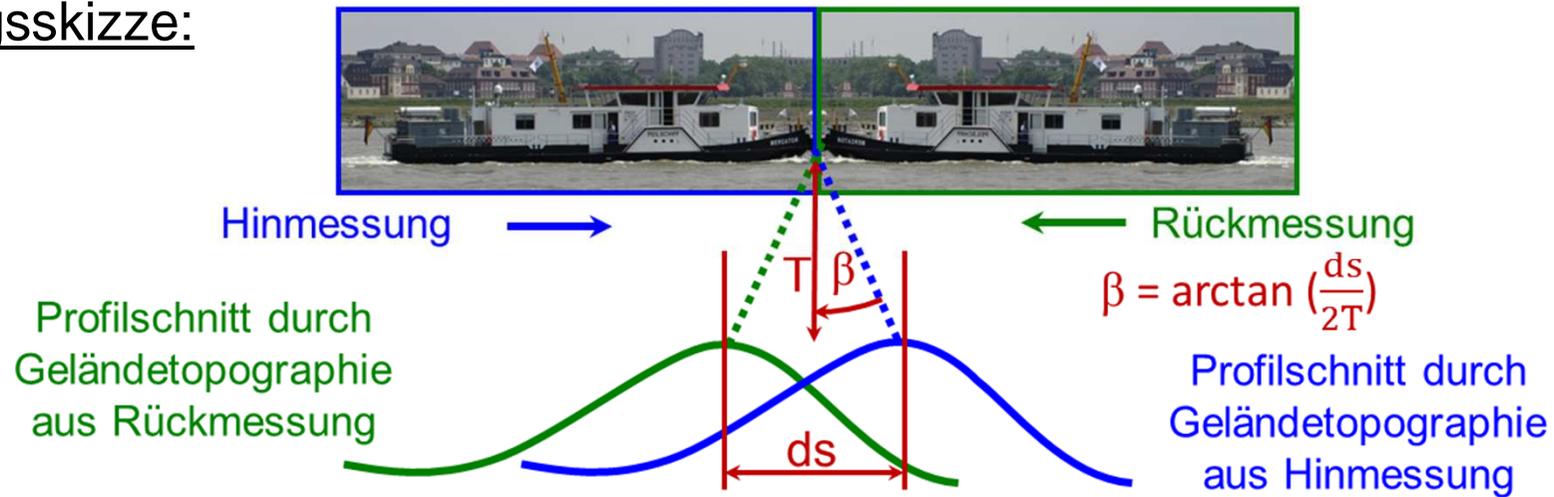
Genauigkeit aus einer Hin- und Rückmessung:

Rollkalibrierung:  $\bar{\alpha} = -0.074^\circ$   $\sigma_{\bar{\alpha}} \sim 0,013^\circ$

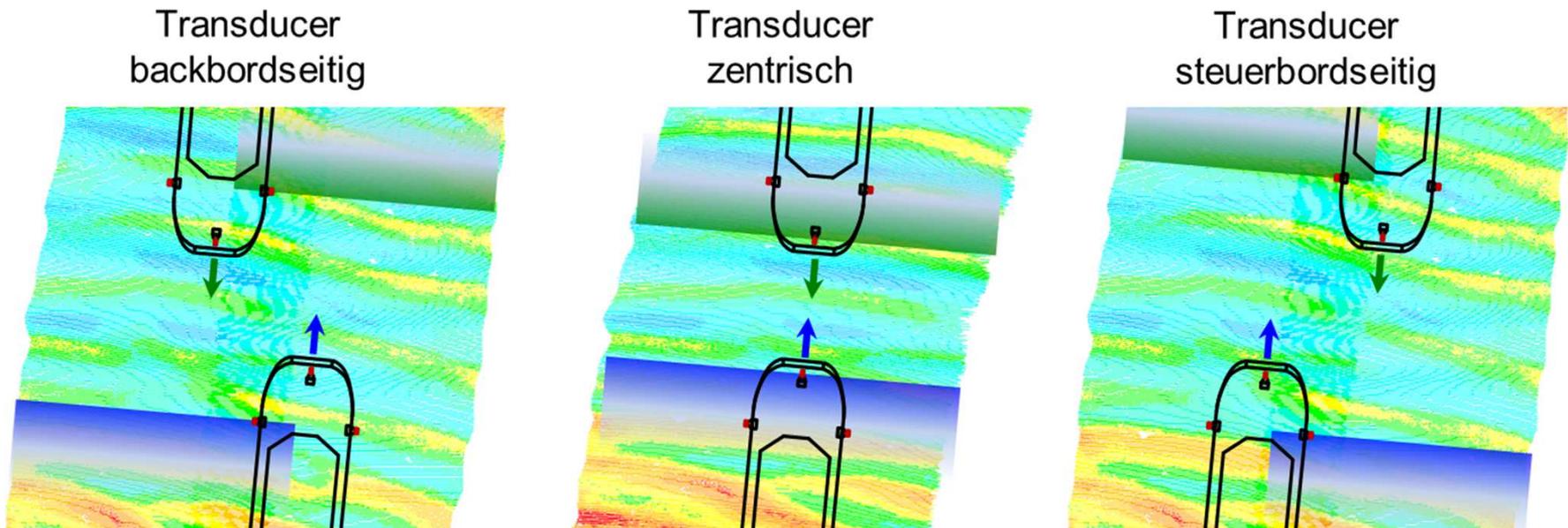


# Feldkalibrierung: Pitchwinkel

## Berechnungsskizze:



## Messanordnung:

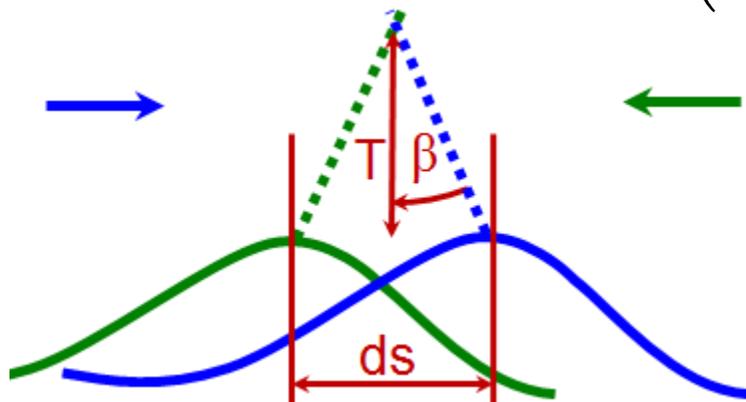


# Feldkalibrierung: Pitchwinkel

## Beispiele zur Beurteilung der zu erreichenden Genauigkeit

Berechnung:  $\beta = \arctan\left(\frac{ds}{2T}\right)$

$$\sigma_{\beta} = \sqrt{\left(\left(\frac{2 \cdot T}{4 \cdot T^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_{ds}^2 + \left(\frac{-2 \cdot ds}{4 \cdot T^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_T^2\right)} \cdot \frac{180}{\pi}$$



Tiefe

Standardmessunsicherheit der Tiefe

Standardmessunsicherheit der Lage in Längsrichtung

Lageversatz

Standardmessunsicherheit des Lageversatzes

Pitchwinkel

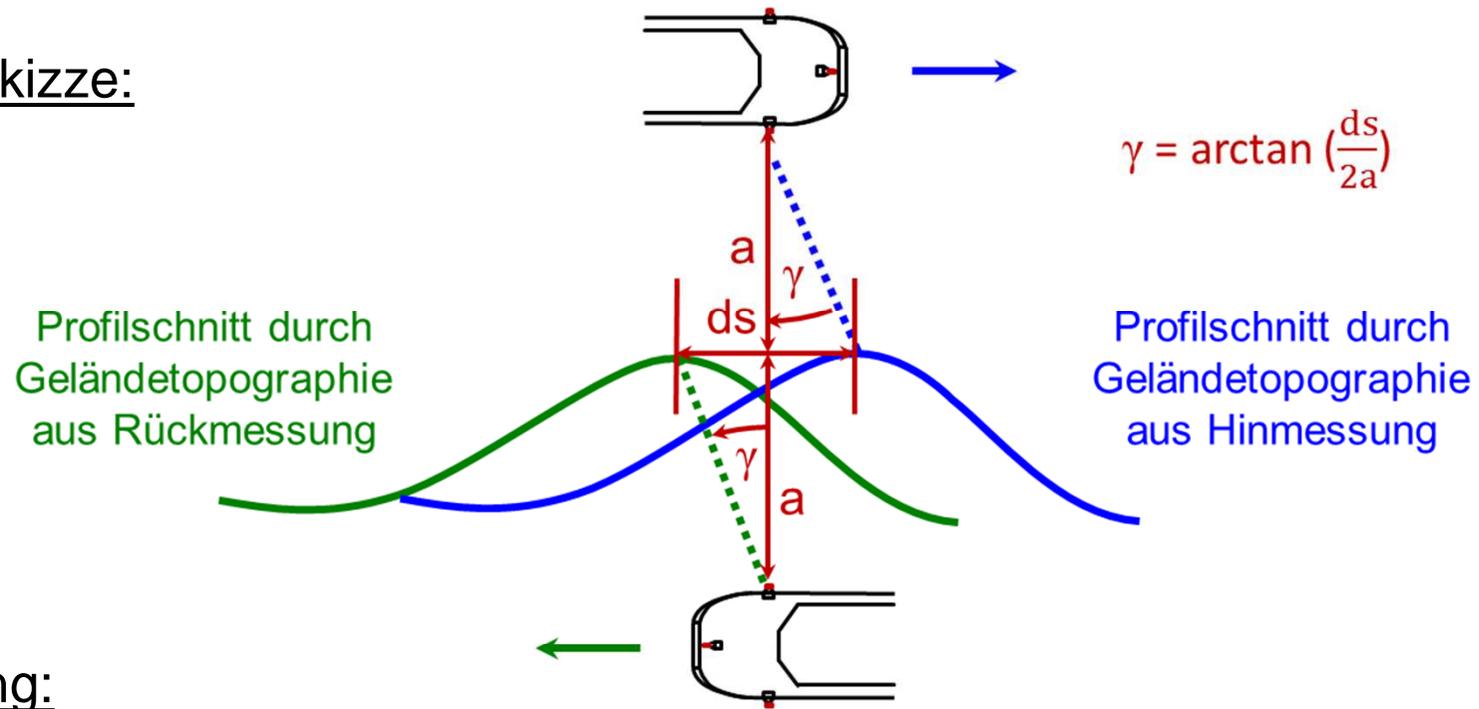
**Standardmessunsicherheit Pitchwinkel (68%)**

### Beispiel für typische Reviere:

	Küste	Binnen
T	15,00m	4,00m
$\sigma_T$	0,09m	0,07m
$\sigma_{\text{Lage\_along}}$	0,13m	0,04m
ds	0,52m	0,14m
$\sigma_{ds}$	0,18m	0,06m
$\beta$	1,0°	1,0°
$\sigma_{\beta}$	<b>0,35°</b>	<b>0,41°</b>

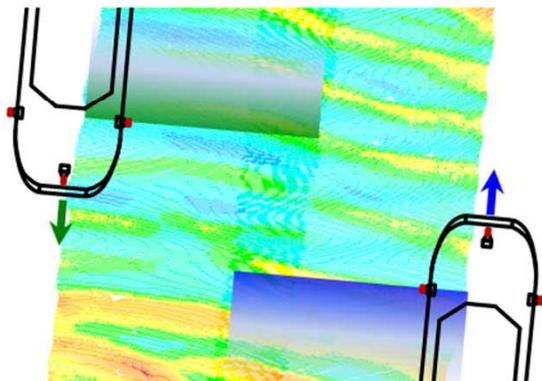
# Feldkalibrierung: Headingwinkel

## Berechnungsskizze:

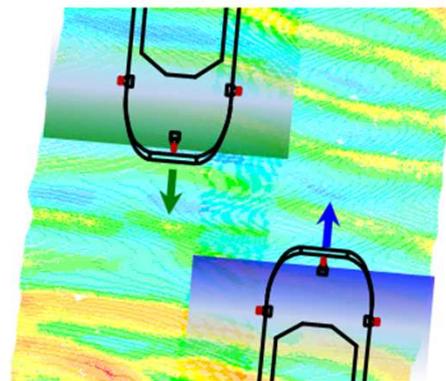


## Messanordnung:

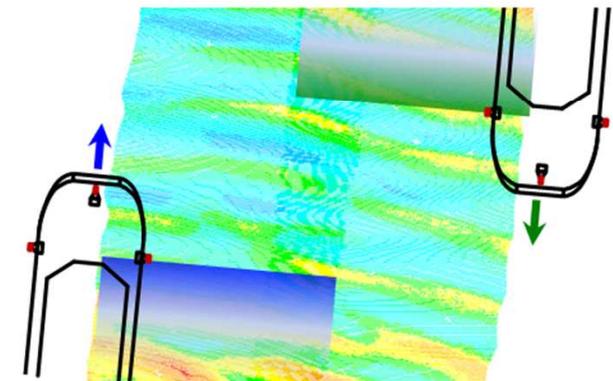
Transducer  
backbordseitig



Transducer  
zentrisch



Transducer  
steuerbordseitig

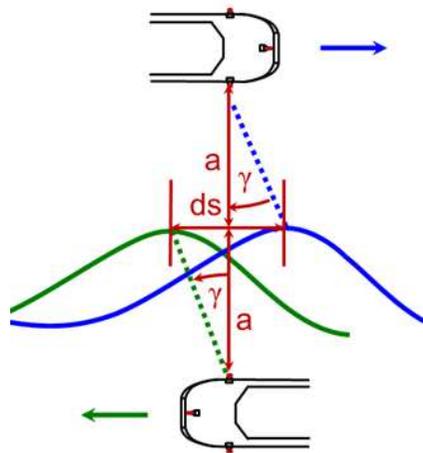


# Feldkalibrierung: Headingwinkel

## Beispiele zur Beurteilung der zu erreichenden Genauigkeit

Berechnung:  $\gamma = \arctan\left(\frac{ds}{2a}\right)$

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\left(\left(\frac{2 \cdot a}{4 \cdot a^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_{ds}^2 + \left(\frac{-2 \cdot ds}{4 \cdot a^2 + ds^2}\right)^2 \cdot \sigma_a^2\right)} \cdot \frac{180}{\pi}$$



Abstand

Standardmessunsicherheit des Abstands

Standardmessunsicherheit der Lage in Längsrichtung

Lageversatz

Standardmessunsicherheit des Lageversatzes

Headingwinkel

**Standardmessunsicherheit Headingwinkel (68%)**

### Beispiel für typische Reviere:

	Küste	Binnen
<b>a</b>	37,0m	8,0m
<b><math>\sigma_a</math></b>	1,0m	0,5m
<b><math>\sigma_{\text{Lage\_along}}</math></b>	0,36m	0,09m
<b>ds</b>	1,29m	0,28m
<b><math>\sigma_{ds}</math></b>	0,51m	0,12m
<b><math>\gamma</math></b>	1,0°	1,0°
<b><math>\sigma_\gamma</math></b>	<b>0,39°</b>	<b>0,43°</b>

# Einbauwinkelbestimmung durch eine Einmessung

## Vorteile der Einmessung:

- getrennte Bestimmung der Einbauwinkel aller Sensoren
- unabhängig von anderen Einflussgrößen (Geländestruktur, Wasserschallproblematik, Bodenerkennung, ...)

• ...

## Voraussetzungen:

- Einmessung auf der Helling
- geeignetes Vermessungsequipment
- qualifiziertes Vermessungspersonal

• ...



<http://www.directindustry.de>



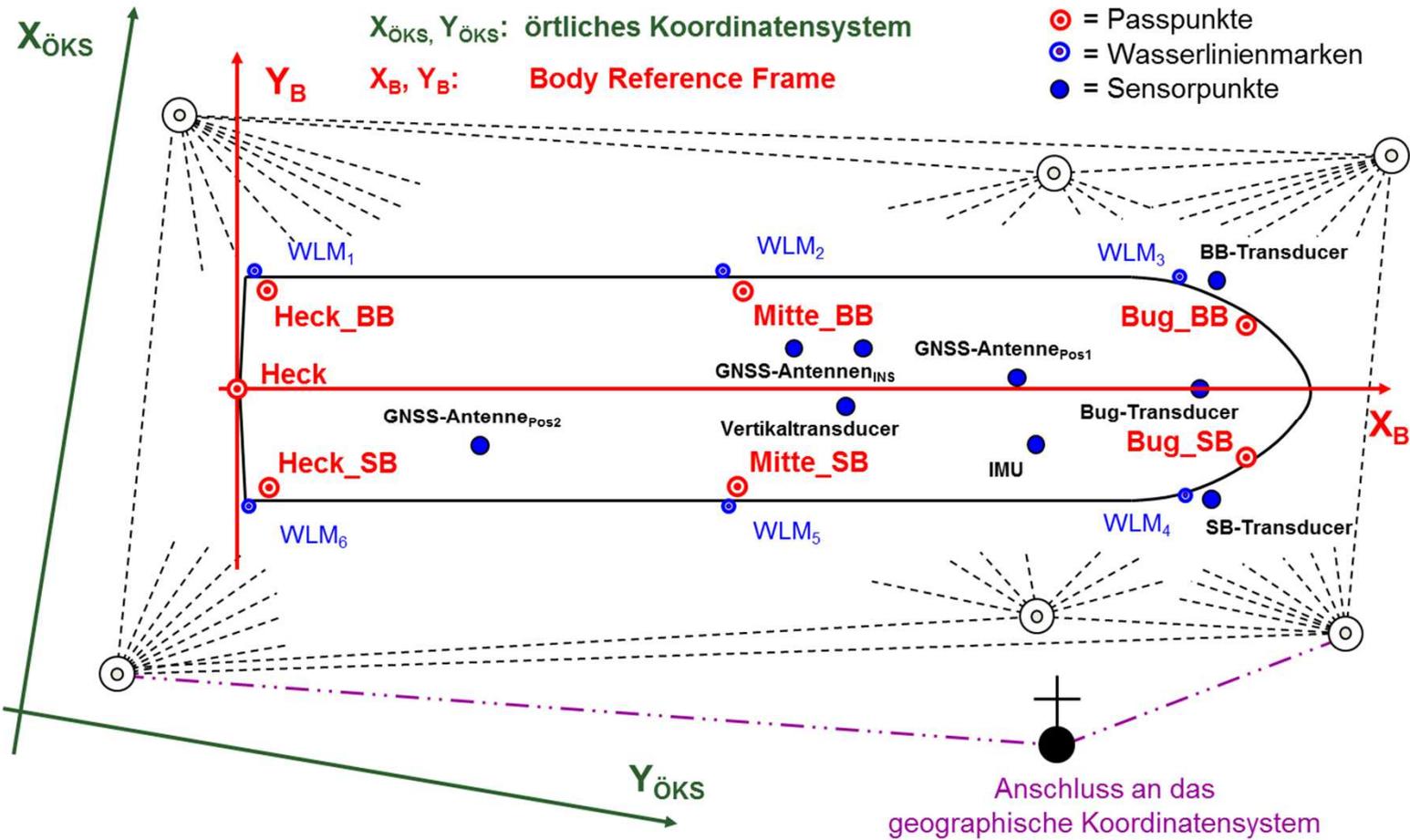
<https://vermessungstechnik.de/>

<http://metrology.leica-geosystems.com>



<http://www.hexagonmi.com>

# Einbauwinkelbestimmung durch eine Einmessung



erforderliche Koordinatenmessunsicherheit  
zur Einbauwinkelbestimmung:  
< 0,5mm

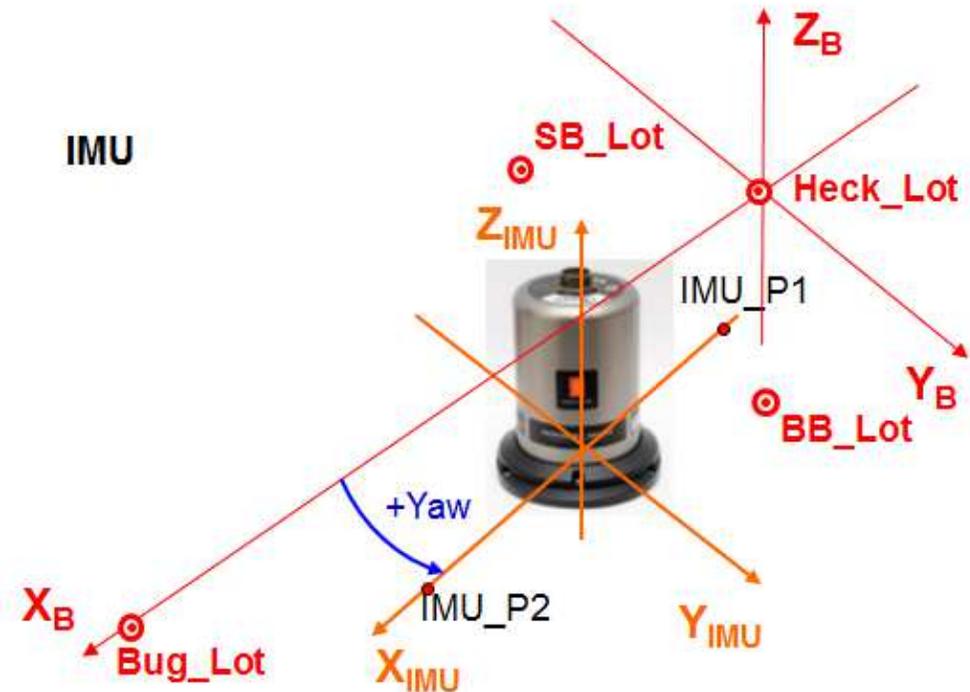
## Einmessung IMU

Yaw-Ausrichtung der IMU gegenüber der X-Achse des Schiffskoordinatensystem  $S_B$

Berechnung:

$$yaw = \arctan\left(\frac{y_{P2} - y_{P1}}{x_{P2} - x_{P1}}\right)$$

$$\sigma_{yaw} = \dots$$



# Einmessung IMU

Bestimmung der Einbauwinkel der IMU gegenüber dem  $S_B$

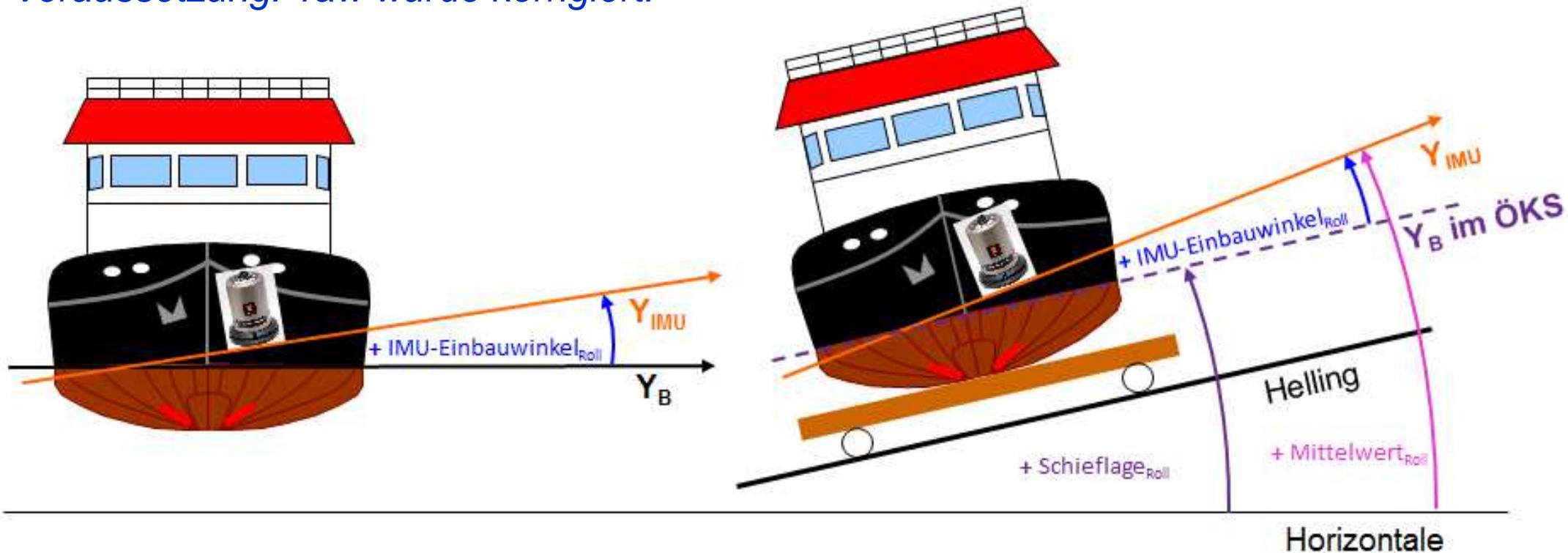
Berechnung:  $Einbauwinkel_{Roll} = Mittelwert_{Roll} - Schiefelage_{Roll}$

$\sigma_{Roll} = \dots$

$Einbauwinkel_{Pitch} = Mittelwert_{Pitch} - Schiefelage_{Pitch}$

$\sigma_{Pitch} = \dots$

Voraussetzung: Yaw wurde korrigiert!



# Einmessung Headingsystem

Bestimmung des Einbauwinkels des Headingsystems gegenüber dem  $S_B$

Berechnung:

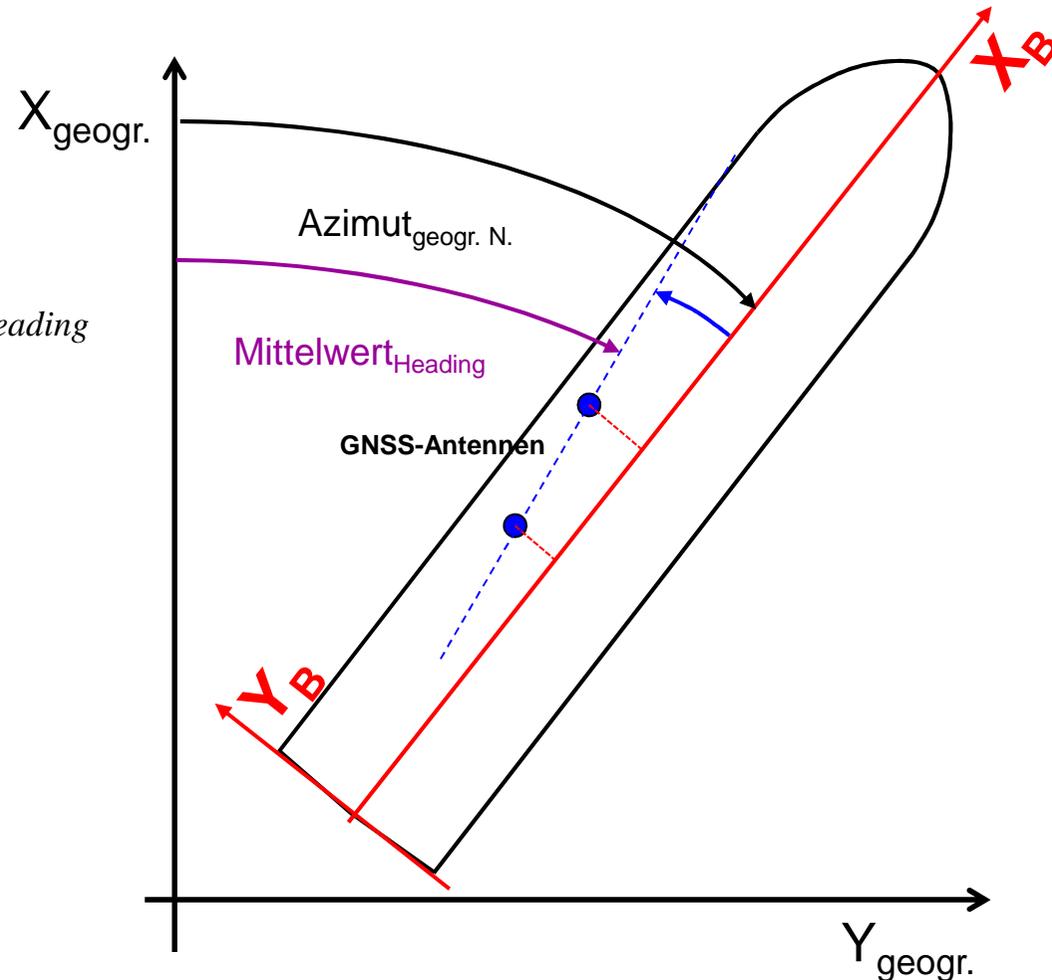
Variante 1:

$$Heading_{Einbauwinkel} = Azimut_{geogr.Nord} - Mittelwert_{Heading}$$

Variante 2:

aus  $S_B$  - Koordinaten der beiden Antennen

$$\sigma_{Heading} = \dots$$



# Einmessung Fächerlot-Transducer (Grundprinzip)

## Bestimmung der Einbauwinkel der Transducer gegenüber dem $S_B$

- Einmessung von Punkten auf der Transducerbezugsfläche
- Berechnung der Einheitsvektoren
- Aufstellen der Rotationsmatrix
- Berechnung der Einbauwinkel

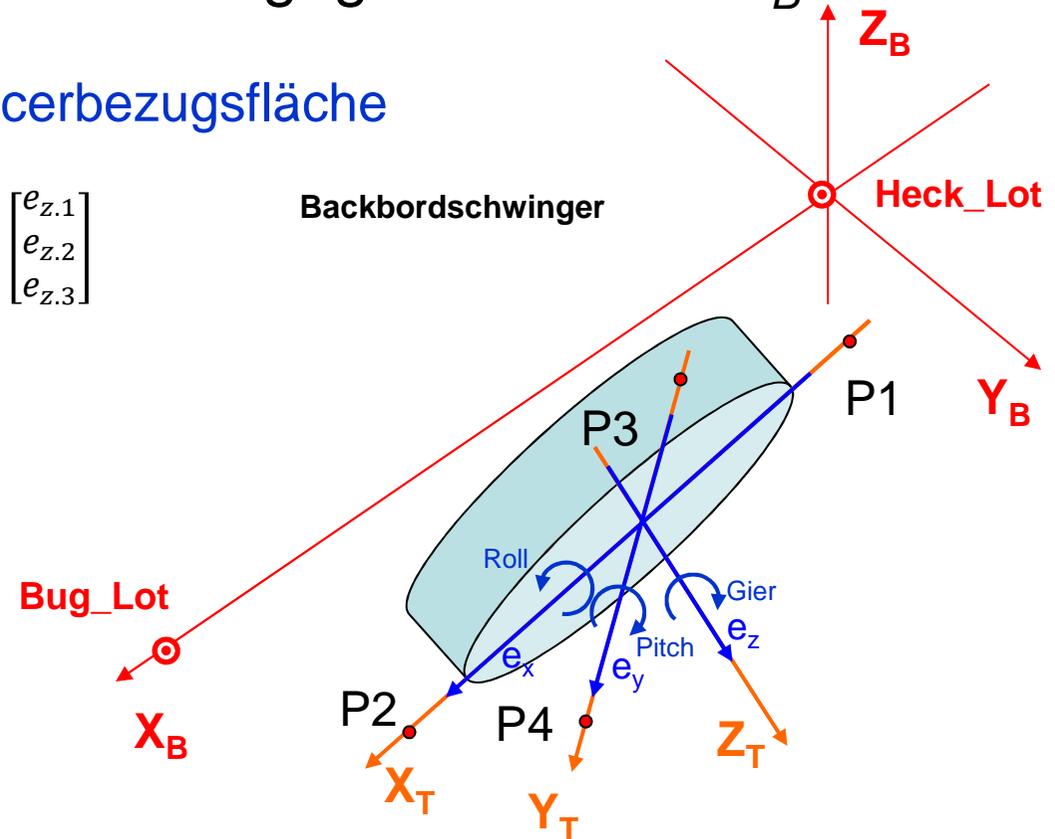
$$e_x = \begin{bmatrix} e_{x.1} \\ e_{x.2} \\ e_{x.3} \end{bmatrix}; e_y = \begin{bmatrix} e_{y.1} \\ e_{y.2} \\ e_{y.3} \end{bmatrix}; e_z = \begin{bmatrix} e_{z.1} \\ e_{z.2} \\ e_{z.3} \end{bmatrix}$$

$$R_{(\gamma, \beta, \alpha)}^B = \begin{bmatrix} e_{x.1} & e_{y.1} & e_{z.1} \\ e_{x.2} & e_{y.2} & e_{z.2} \\ e_{x.3} & e_{y.3} & e_{z.3} \end{bmatrix}$$

Roll:  $\alpha = \arctan\left(\frac{e_{y.3}}{e_{z.3}}\right)$

Pitch:  $\beta = \arctan\left(\frac{e_{x.3}}{\sqrt{e_{y.3}^2 + e_{z.3}^2}}\right)$

Gier:  $\gamma = \arctan\left(\frac{e_{x.2}}{e_{x.1}}\right)$



$$\sigma_\alpha = \sqrt{\left( \left( \frac{1}{\left( \frac{e_{y.3}^2}{e_{z.3}^2} + 1 \right)} \cdot e_{z.3} \right)^2 \cdot \sigma_{e_{y.3}}^2 + \left( \frac{-e_{y.3}}{\left( \frac{e_{y.3}^2}{e_{z.3}^2} + 1 \right)} \cdot e_{z.3} \right)^2 \cdot \sigma_{e_{z.3}}^2 \right) \cdot \frac{180}{\pi}}$$

$\sigma_\beta = \dots$

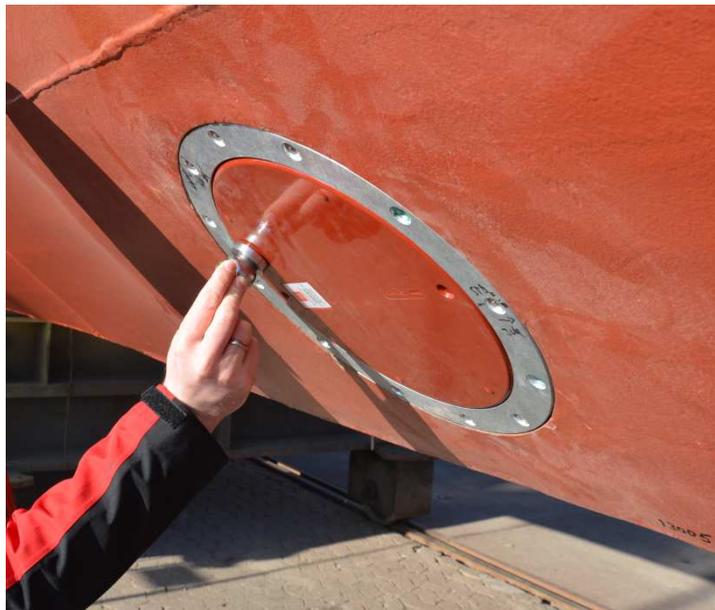
$\sigma_\gamma = \dots$

# Einmessung Fächerlot-Transducer

**Anforderung:  $\sigma_{\alpha,\beta,\gamma} < 0,1^\circ$**

	Lasertracker* <sup>1)</sup>	Tachymeter* <sup>2)</sup>
$u_{x,y,z}$ * <sup>3)</sup>	~ 0,4mm	~ 1,2mm
Abstand P2 – P1	≥ 0,3m	≥ 1,0m
Abstand P4 – P3		

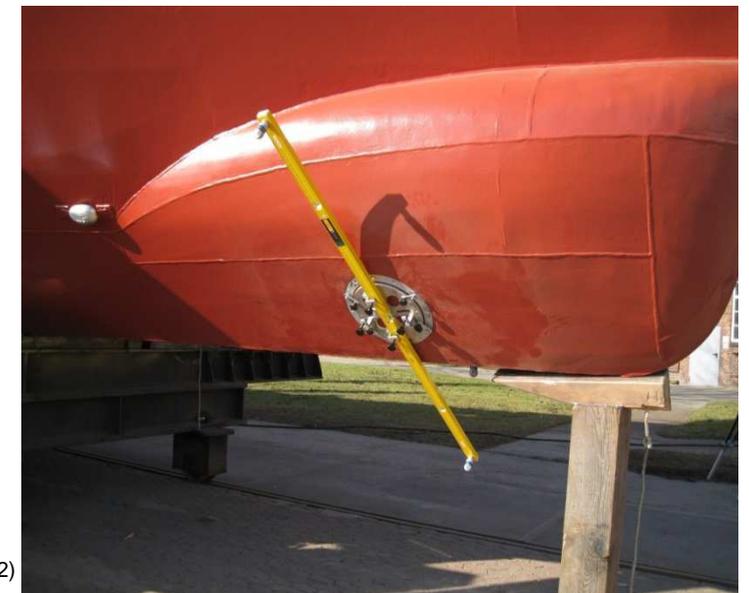
\*<sup>3)</sup> abhängig von Messgeräten, Netzgeometrie, ...



Lasertracker\*<sup>1)</sup>



Tachymeter\*<sup>2)</sup>



\*<sup>1)</sup> Winkelmessunsicherheit: 0,0035mm/m (0,23mgon)  
 Streckenmessunsicherheit: ±0,025mm oder 0,0015mm/m

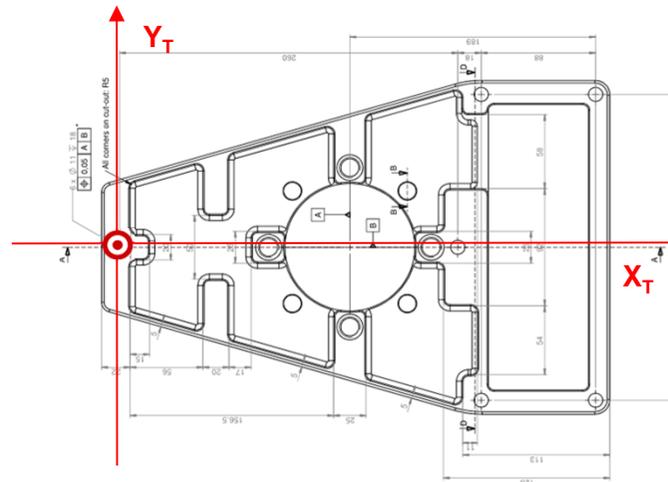
\*<sup>2)</sup> Winkelmessunsicherheit: 0,3 mgon (0,005mm/m)  
 Streckenmessunsicherheit: 1 mm + 2ppm

# Einmessung Fächerlot-Transducer

eingebauter Fächerlot-Transducer



Definition des Transducer-Koordinatensystems



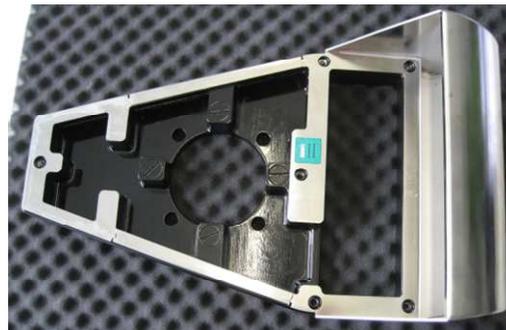
örtliche Einmessung des Frames ins Schiffskoordinatensystem



Frame



Schutzblech



Sonar (Sender)

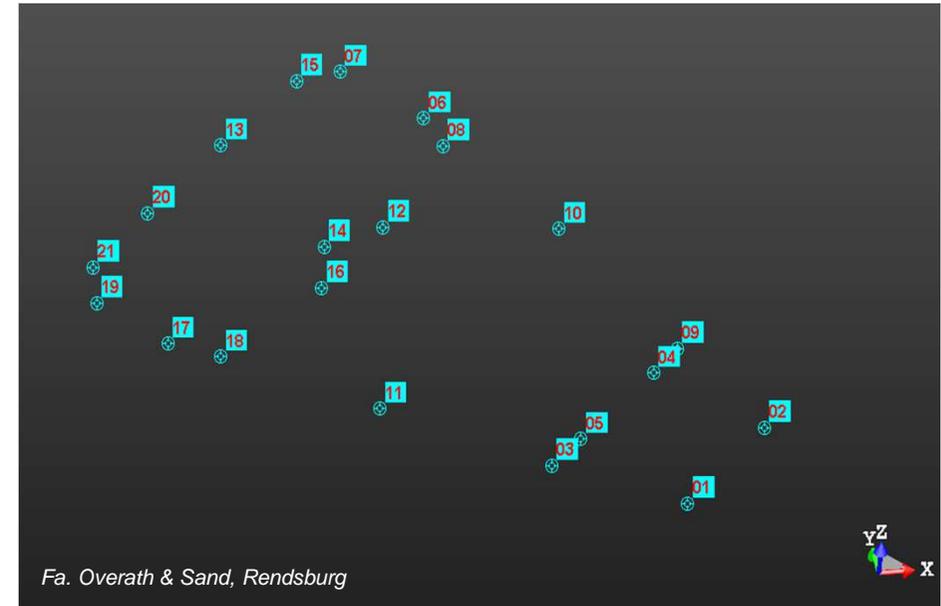


Receiver (Empfänger)



Maßhaltigkeit und Ebenheit des Frames ?  
Parallelität der Sensorbezugsflächen gegenüber dem Frame ?  
Montagegenauigkeit („Wiederholeinbaugenauigkeit“) ?

# Laboruntersuchung Fächerlot-Transducer



Fa. Overath & Sand, Rendsburg



Messarm\*

<http://www.hexagonmi.com>

\* Abtastpunkt-Reproduzierbarkeit: 0,042mm

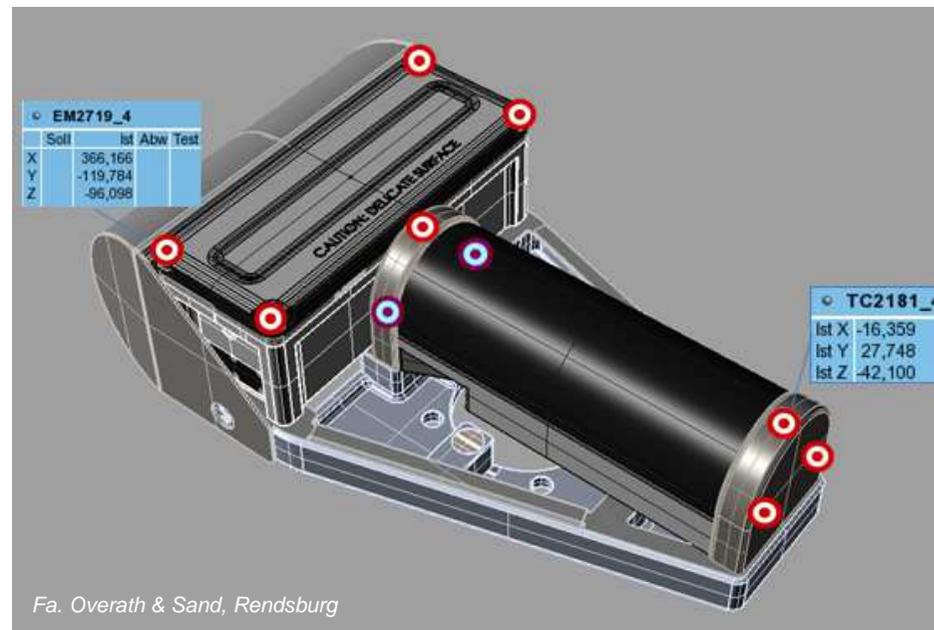
Prüfung der Maßhaltigkeit und  
Ebenheit  
des Frames im Labor

**< 0,05mm**

Prüfung der Parallelität der Sensorbezugsflächen gegenüber dem Frame und der Montagegenauigkeit („Wiederholeinbaugenauigkeit“) im Labor



<http://www.hexagonmi.com>



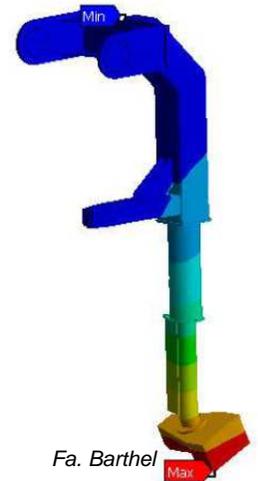
**< 0,1mm  
nach Modifikation der Befestigungen !!!**

# Stabilitätsmessungen der Transducerhalterungen

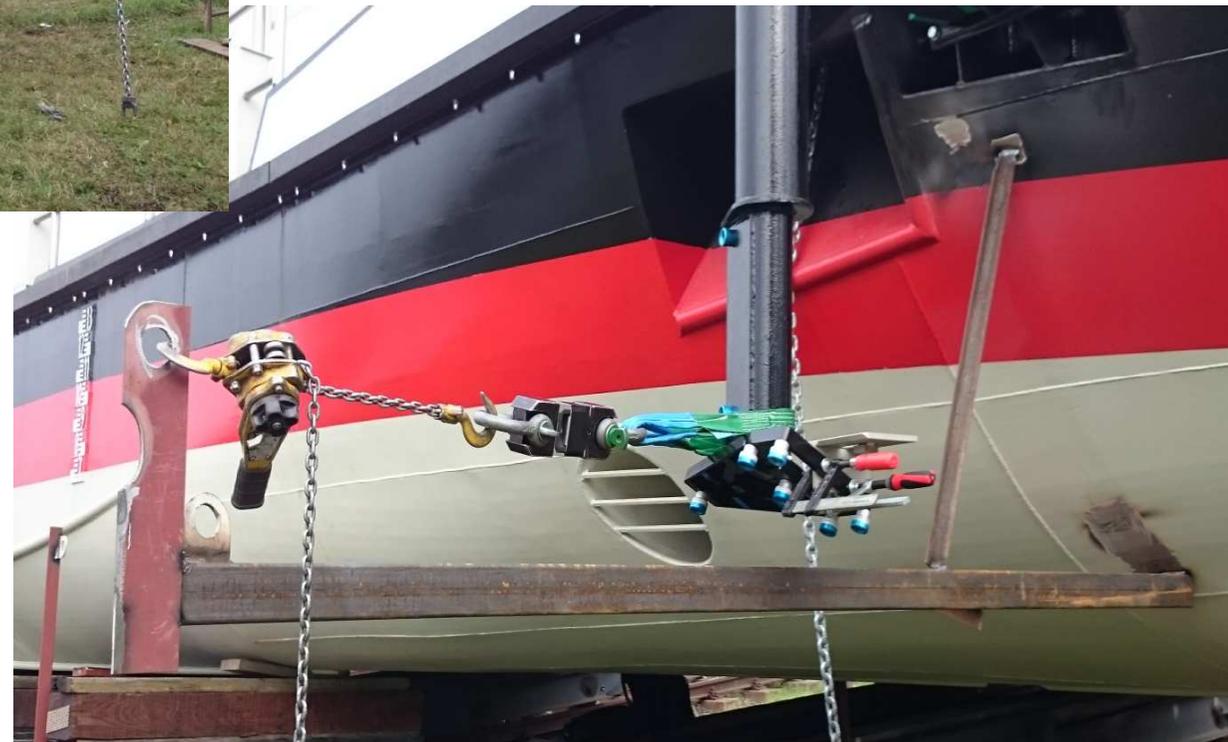


Prüfung der Vorgaben  
aus der Bauvorschrift

**Anforderung:**  
 $\sigma_{\alpha,\beta} < 0,1^\circ$



Last	$\Delta\text{Roll}$	$\Delta\text{Pitch}$
1500 Nm nach Achtern	$\leq 0,00^\circ$	$\leq 0,08^\circ$
600Nm nach StB / BB	$\leq 0,05^\circ$	$\leq 0,01^\circ$



# Fazit / Zusammenfassung

Systemkomponenten	Zielgrößen der Kalibrierung	Anforderung	Unsicherheit Feldkalibrierung	Unsicherheit Einmessung
Gesamtsystem (bestmögliche Messstreifenanpassung)	Roll	$< 0,1^\circ$	$\sim 0,02^\circ$	
	Pitch	$< 0,1^\circ$	$\sim 0,4^\circ$	
	Heading	$< 0,1^\circ$	$\sim 0,4^\circ$	
Fächerlotsystem	Einbauwinkel <sub>Roll</sub>	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,06^\circ$
	Einbauwinkel <sub>Pitch</sub>	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,06^\circ$
	Einbauwinkel <sub>Gier</sub>	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,06^\circ$
Headingsystem	Heading_Offset	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,04^\circ$
IMU	Einbauwinkel <sub>Roll</sub>	$< 0,02^\circ$	-	$\sim 0,02^\circ$
	Einbauwinkel <sub>Pitch</sub>	$< 0,02^\circ$	-	$\sim 0,02^\circ$
	Einbauwinkel <sub>Yaw</sub>	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,10^\circ$

- mit **Feldkalibrierungen** werden die Messstreifen bestmöglich angepasst
- Bestimmung aller Einbauwinkel getrennt voneinander nicht möglich
- sehr guter Indikator für Systemveränderungen
- mit **Einmessung** können alle Winkel getrennt voneinander bestimmt werden
- hohe Genauigkeitsanforderungen können erreicht werden
- bei großen Exzentrizitäten zur richtigen Georeferenzierung zwingend erforderlich

Vielen Dank  
für Ihre  
Aufmerksamkeit

BALTIC

EL EL

18  
16  
14  
12

**Thomas Brüggemann**

Aufgabenbereich Gewässervermessung

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1

56068 Koblenz

Germany

Tel.: +49 261 1306-5228

Fax: +49 261 1306-5302

E-Mail: [brueggemann@bafg.de](mailto:brueggemann@bafg.de)

[www.bafg.de](http://www.bafg.de)