

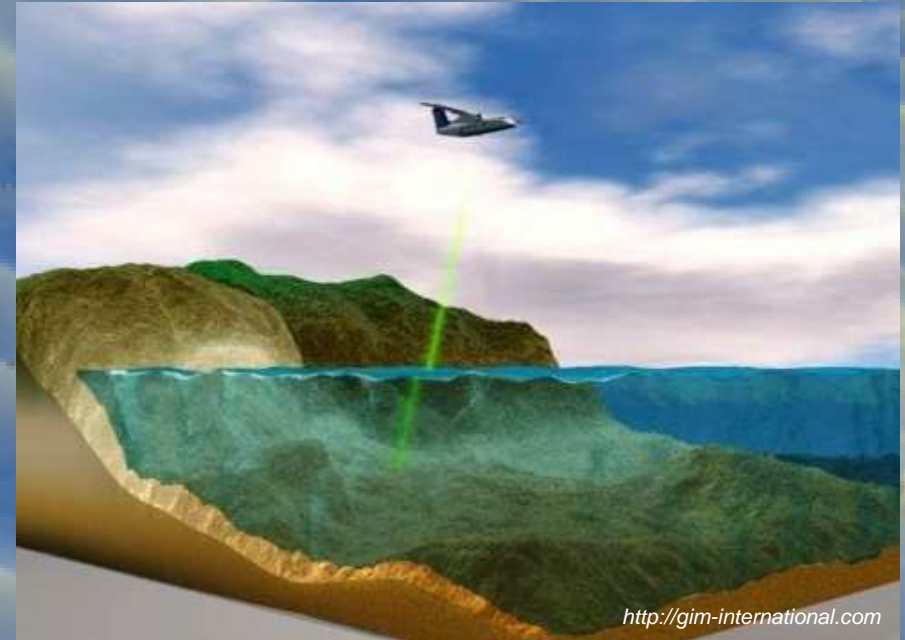
Kalibrierung von Multisensorsystemen

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_{Pos2}

„Hildegard von Bingen“

Länge 25,6m

Breite 7,6m

Tiefgang 1,0m

GNSS-Antennen_{Navigation/Heading}



GNSS-Antenne_{Pos1}



Inertiale Messeinheit
(IMU)



StB-Transducer

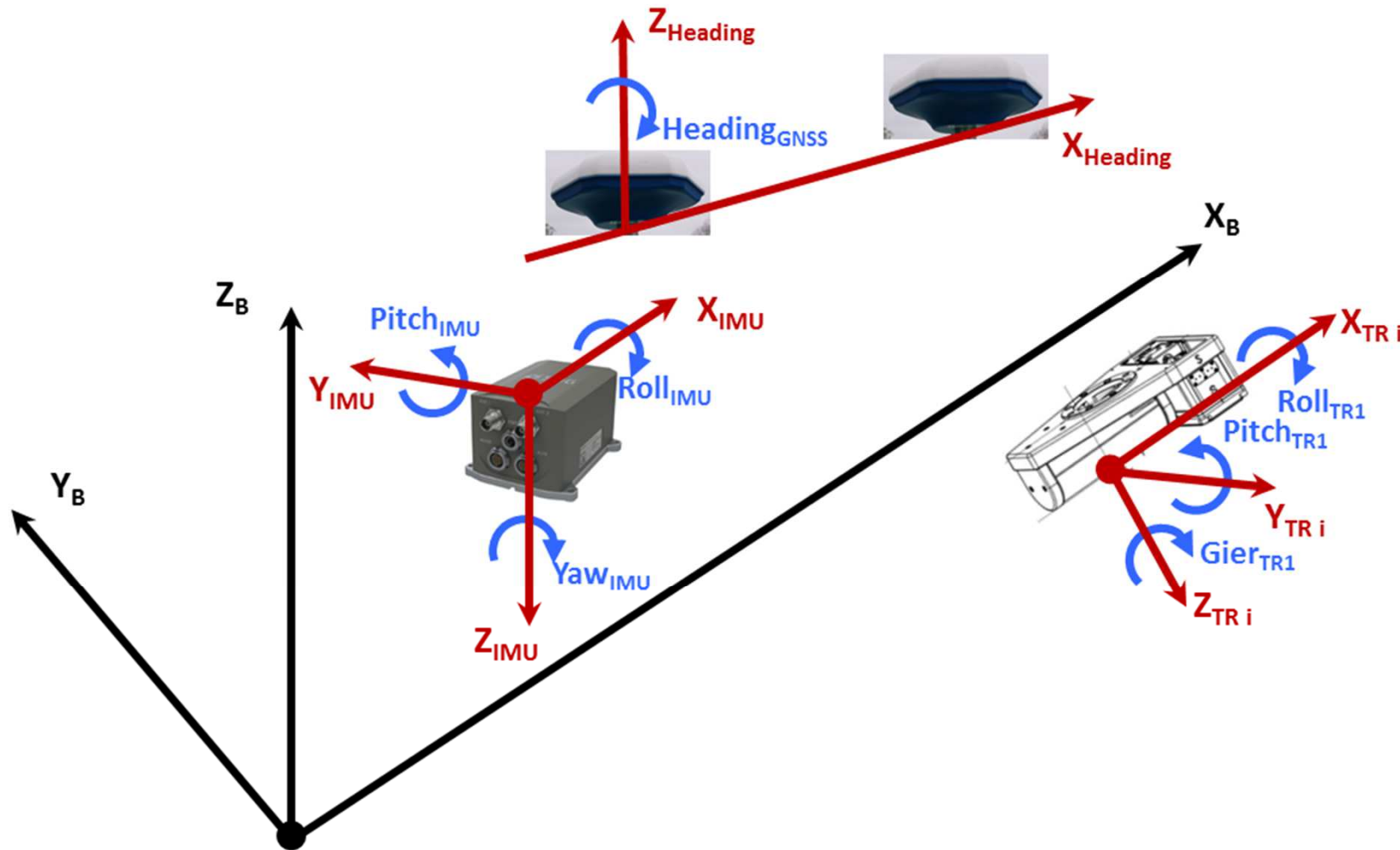


Mittel-Transducer



BB-Transducer

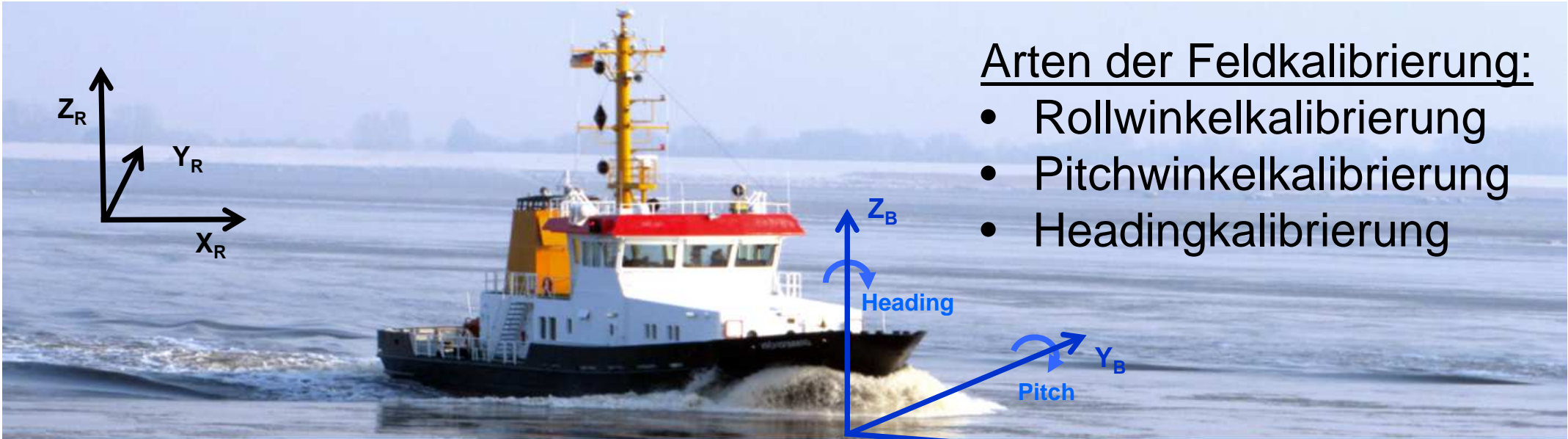
Ziel der Kalibrierung



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 _{Roll}	X	✓
	Einbauwinkel _{Pitch}	X	✓
	Einbauwinkel _{Gier}	X	✓
Headingsystem 1	Heading_Offset	X	✓
IMU 1	Einbauwinkel _{Roll}	X	✓
	Einbauwinkel _{Pitch}	X	✓
	Einbauwinkel _{Yaw}	X	✓
...	...	X	✓



Arten der Feldkalibrierung:

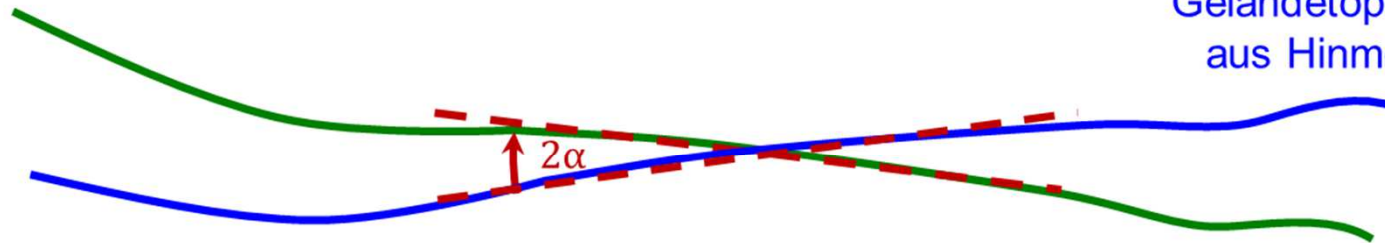
- Rollwinkelkalibrierung
- Pitchwinkelkalibrierung
- Headingkalibrierung

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:

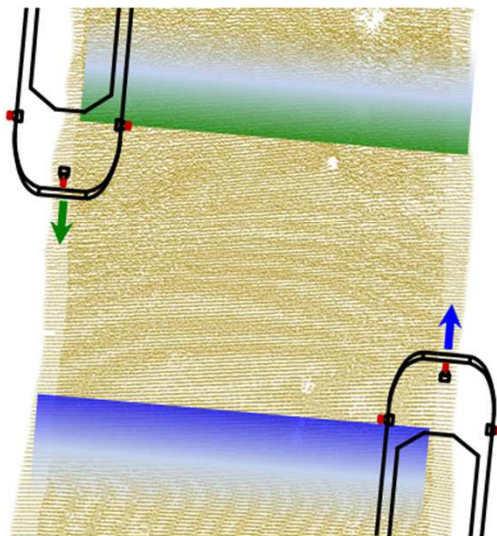


Profilschnitt durch
Geländetopographie
aus Hinmessung

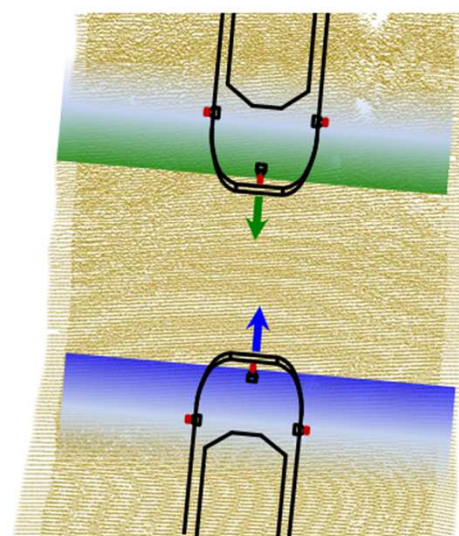
Profilschnitt durch
Geländetopographie
aus Rückmessung

Messanordnung:

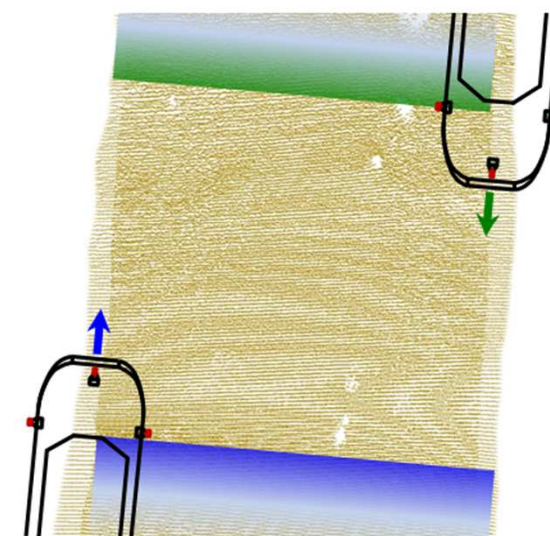
Transducer
backbordseitig



Transducer
zentrisch

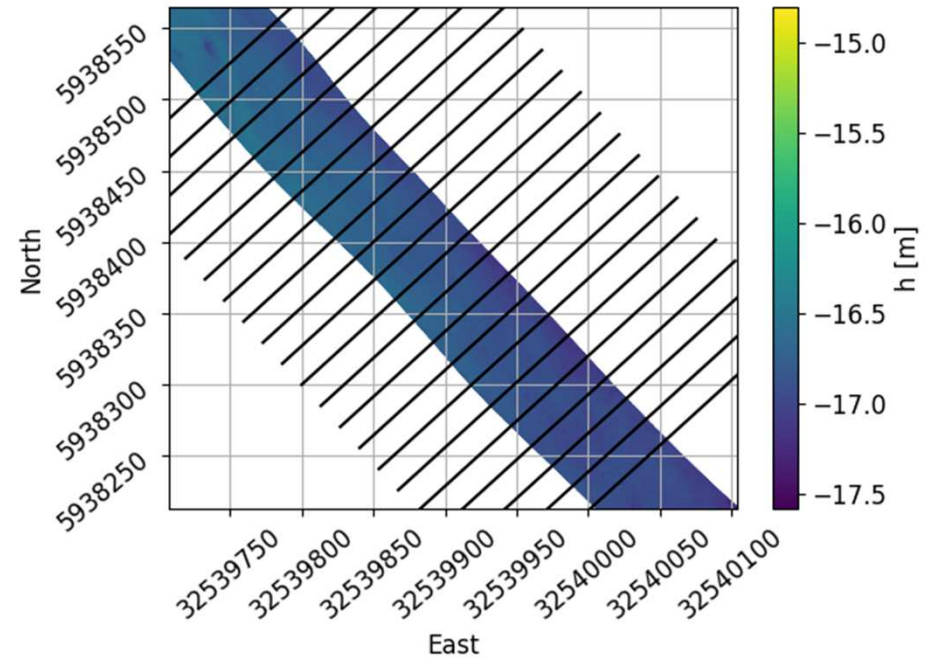


Transducer
steuerbordseitig



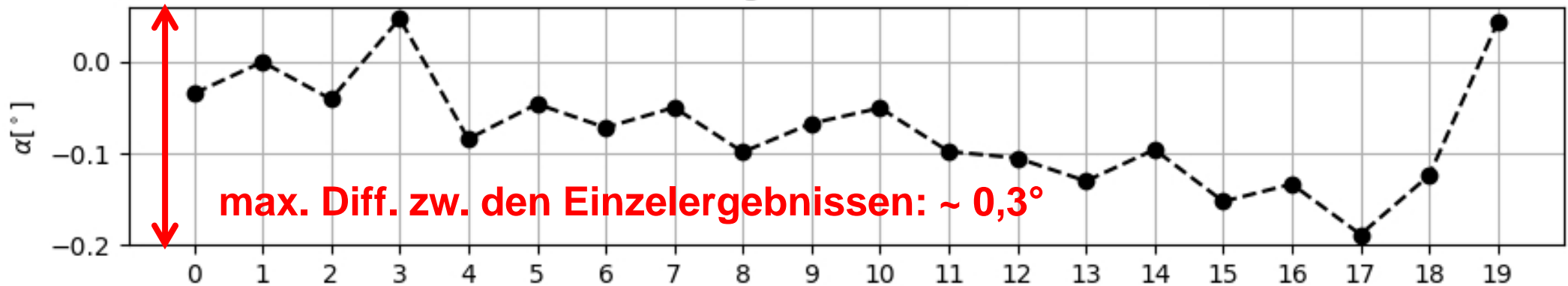
Feldkalibrierung: Rollwinkel

Beispiel zur Beurteilung der zu erreichenden Genauigkeit



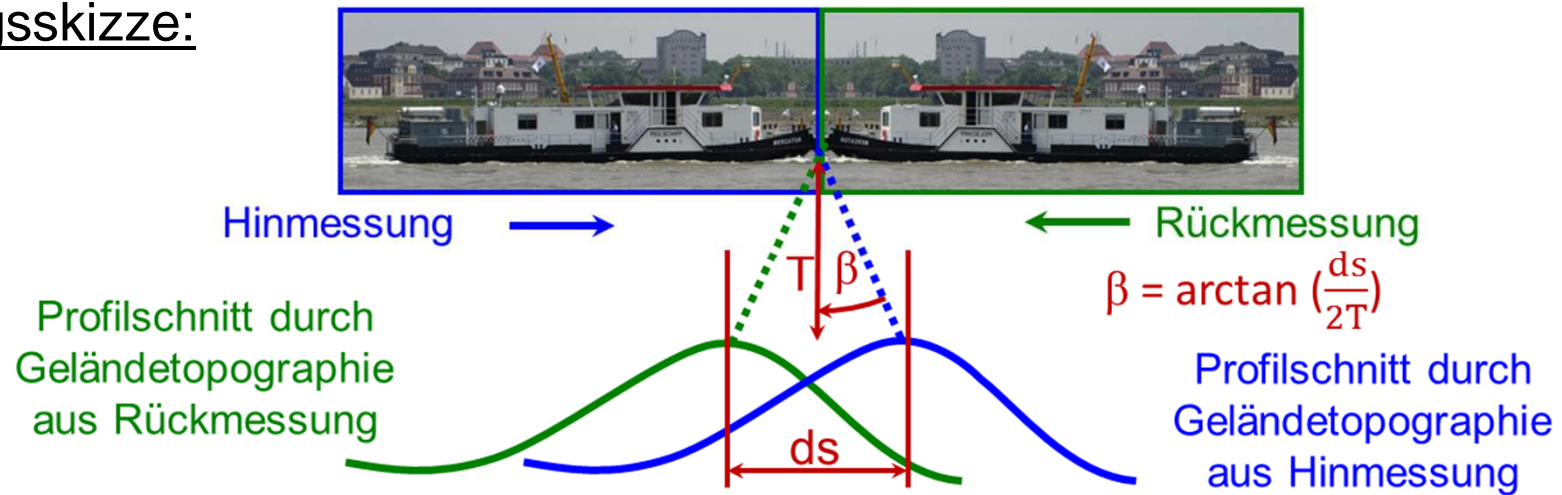
Genauigkeit aus einer Hin- und Rückmessung:

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

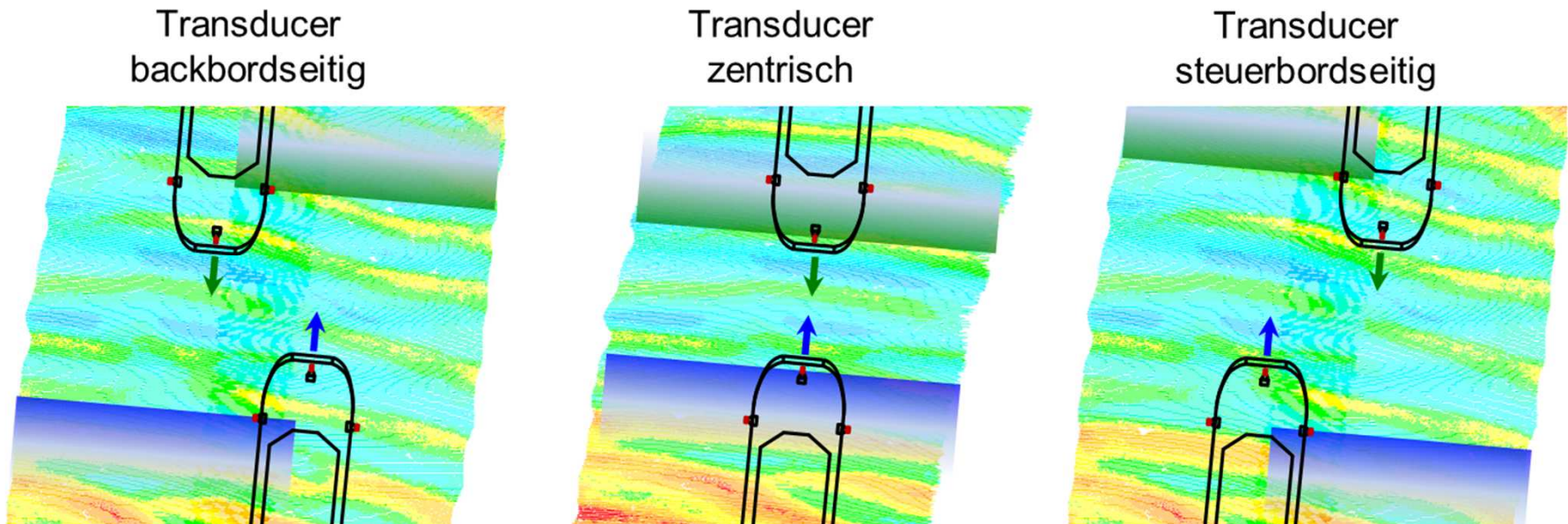


Feldkalibrierung: Pitchwinkel

Berechnungsskizze:



Messanordnung:

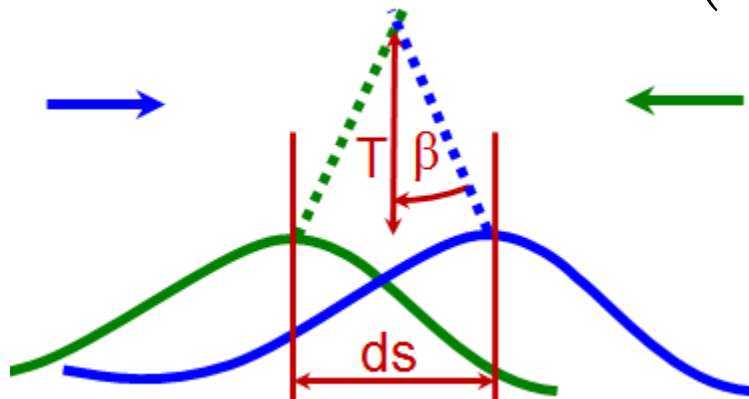


Feldkalibrierung: Pitchwinkel

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

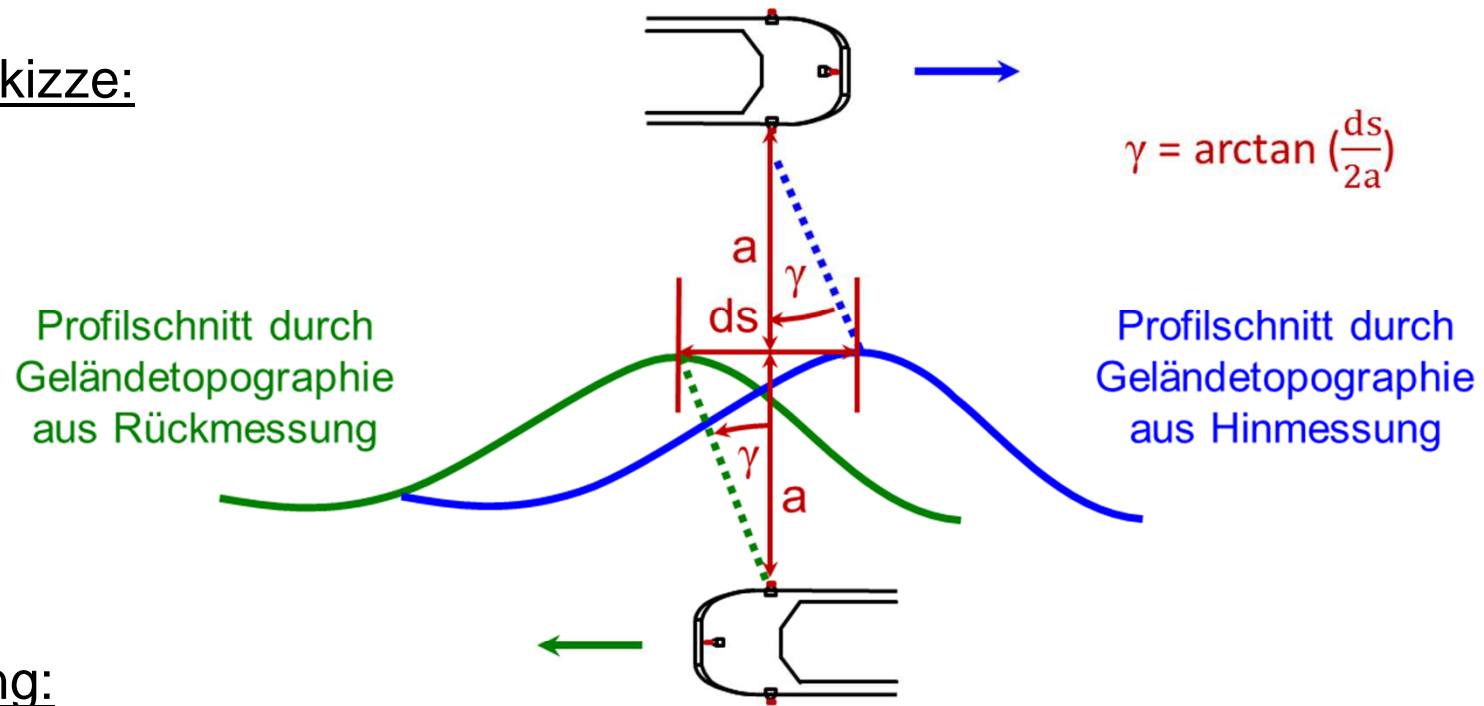
Standardmessunsicherheit Pitchwinkel (68%)

Beispiel für typische Reviere:

	Küste	Binnen
T	15,00m	4,00m
σ_T	0,09m	0,07m
$\sigma_{\text{Lage_along}}$	0,13m	0,04m
ds	0,52m	0,14m
σ_{ds}	0,18m	0,06m
β	1,0°	1,0°
σ_{β}	0,35°	0,41°

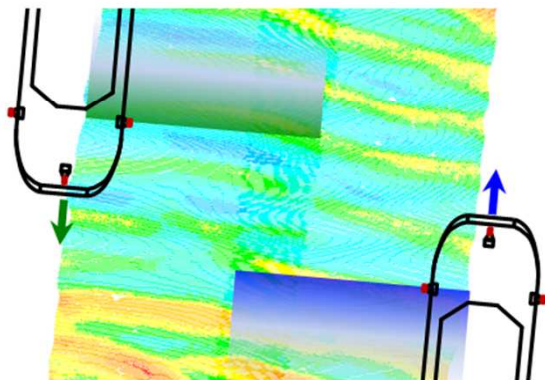
Feldkalibrierung: Headingwinkel

Berechnungsskizze:

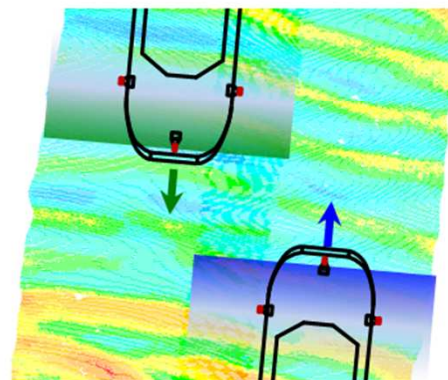


Messanordnung:

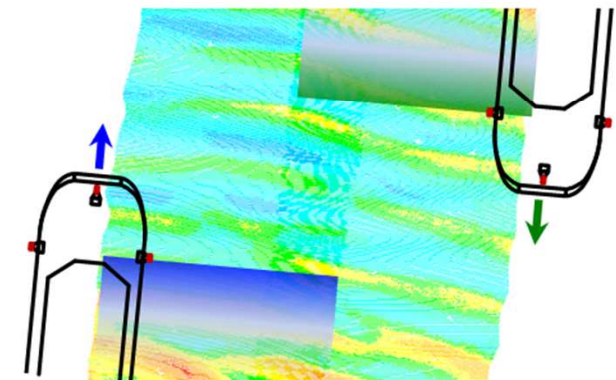
Transducer
backbordseitig



Transducer
zentrisch



Transducer
steuerbordseitig

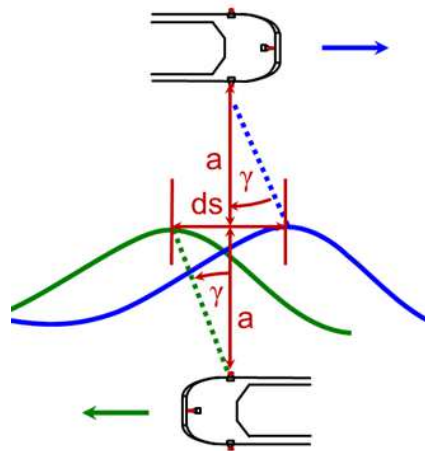


Feldkalibrierung: Headingwinkel

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
a	37,0m	8,0m
σ_a	1,0m	0,5m
$\sigma_{\text{Lage_along}}$	0,36m	0,09m
ds	1,29m	0,28m
σ_{ds}	0,51m	0,12m
γ	1,0°	1,0°
σ_γ	0,39°	0,43°

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>



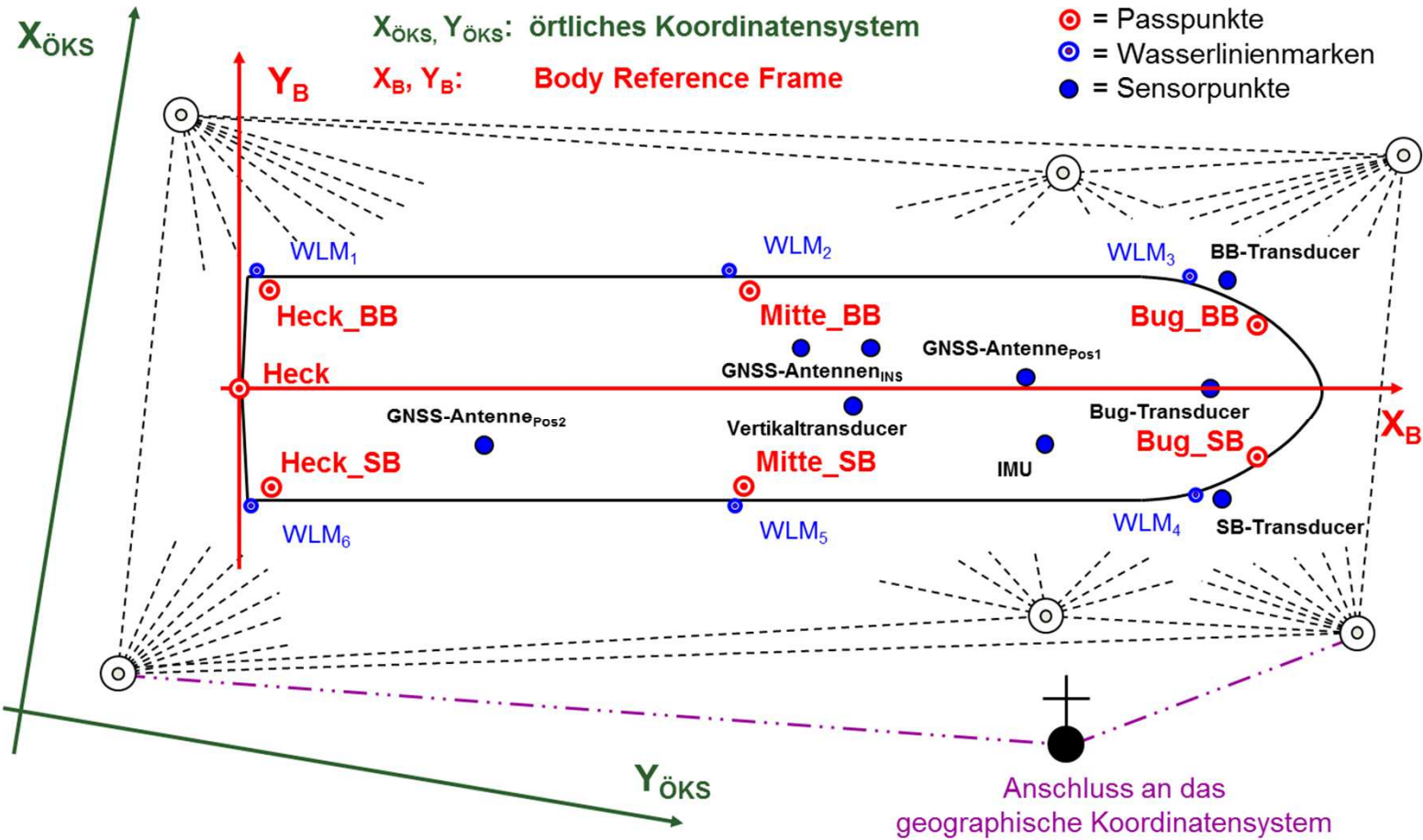
<https://vermessungstechnik.de/>

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



<http://www.hexagonmi.com>

Einbauwinkelbestimmung durch eine Einmessung



erforderliche Koordinatenmessunsicherheit
zur Einbauwinkelbestimmung:
< 0,5mm

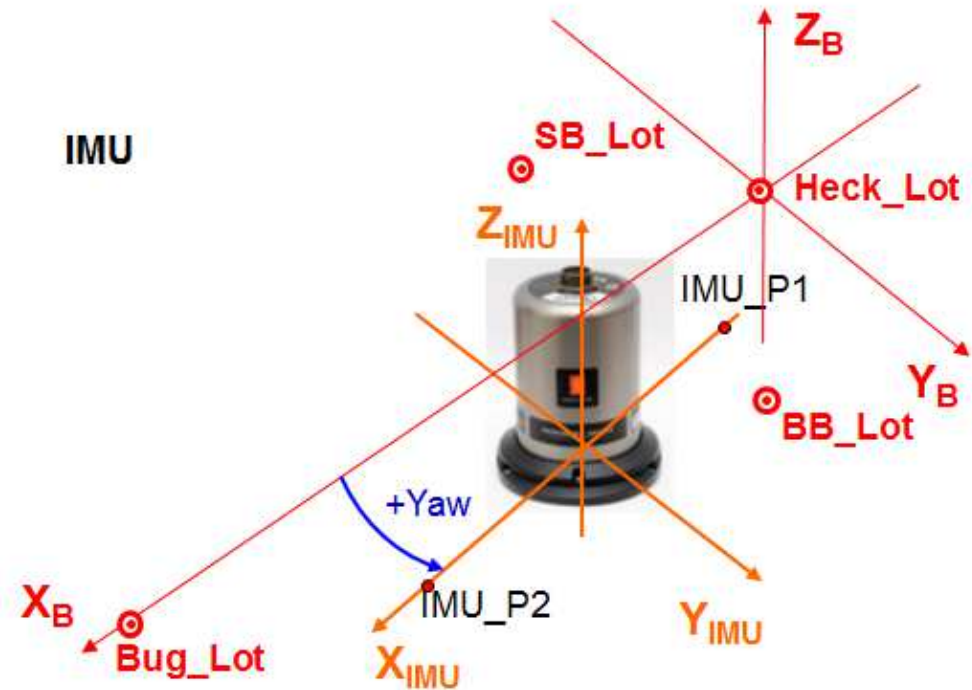
Einmessung IMU

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

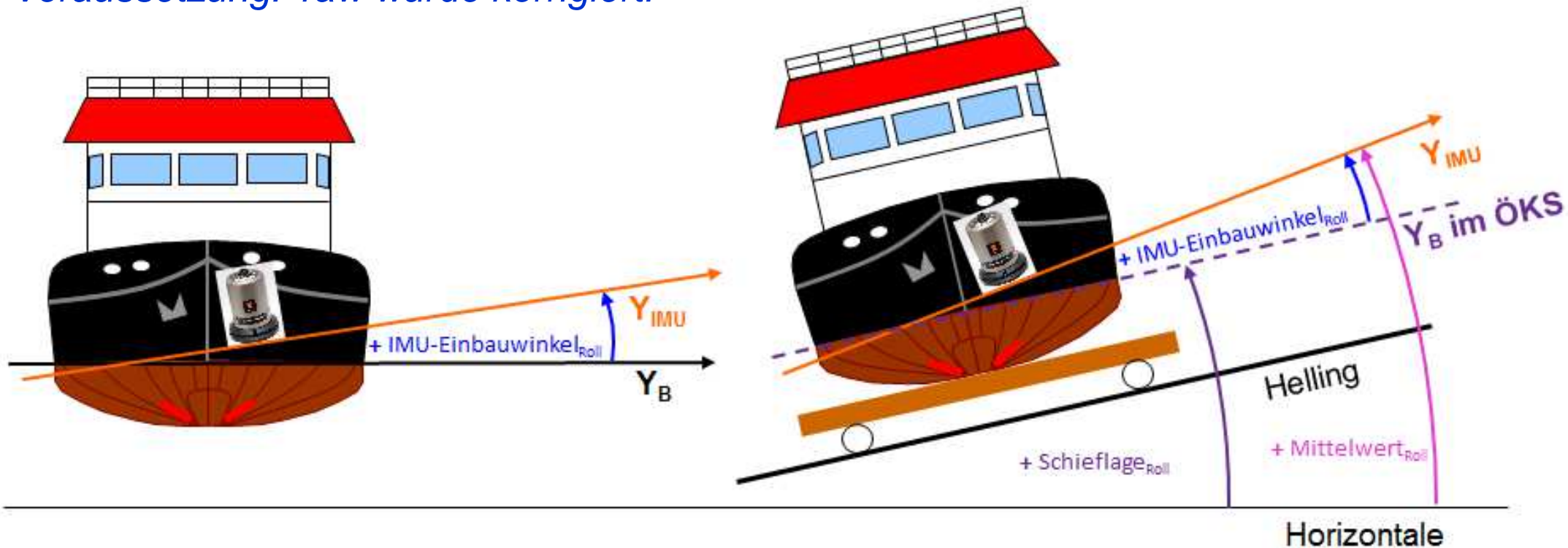
Berechnung: $Einbauwinkel_{Roll} = Mittelwert_{Roll} - Schiefelage_{Roll}$

$\sigma_{Roll} = \dots$

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

$\sigma_{Pitch} = \dots$

Voraussetzung: Yaw wurde korrigiert!



Einmessung Headingsystem

Bestimmung des Einbauwinkels des Headingsystems gegenüber dem S_B

Berechnung:

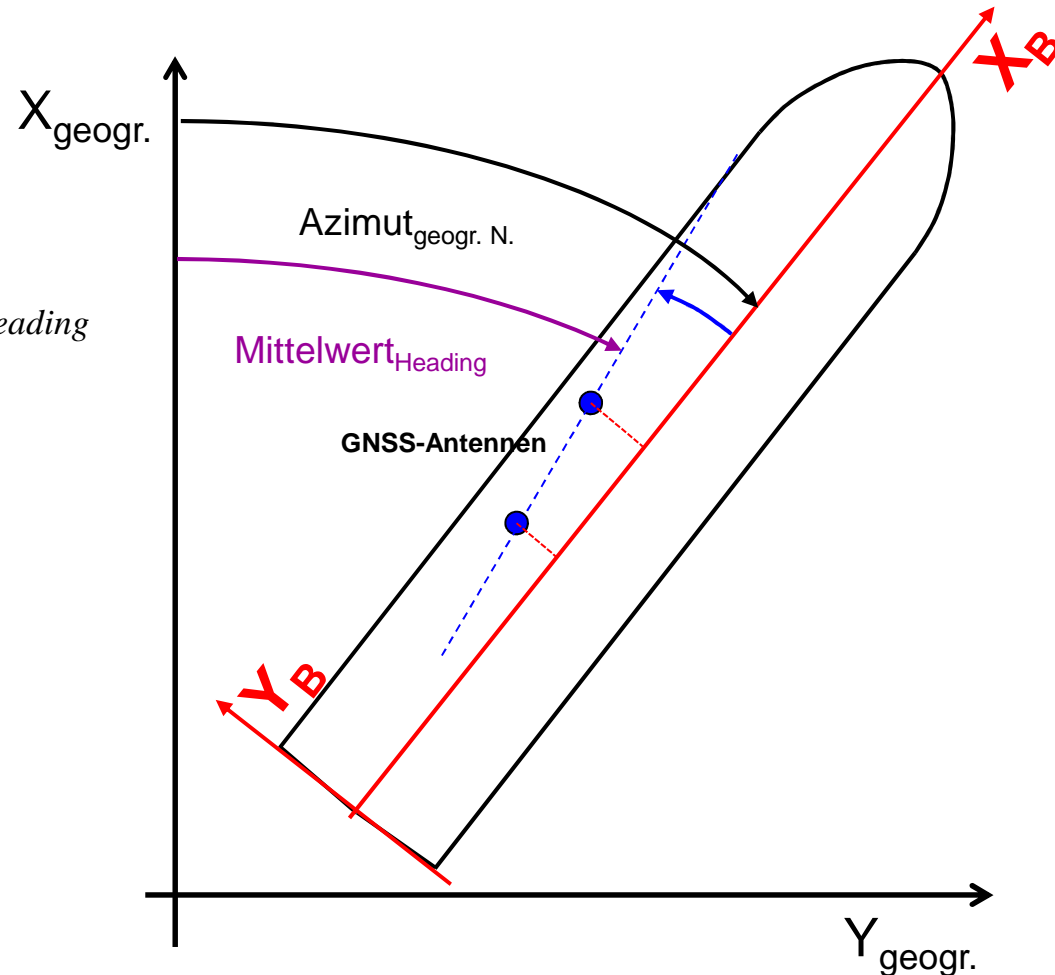
Variante 1:

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

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

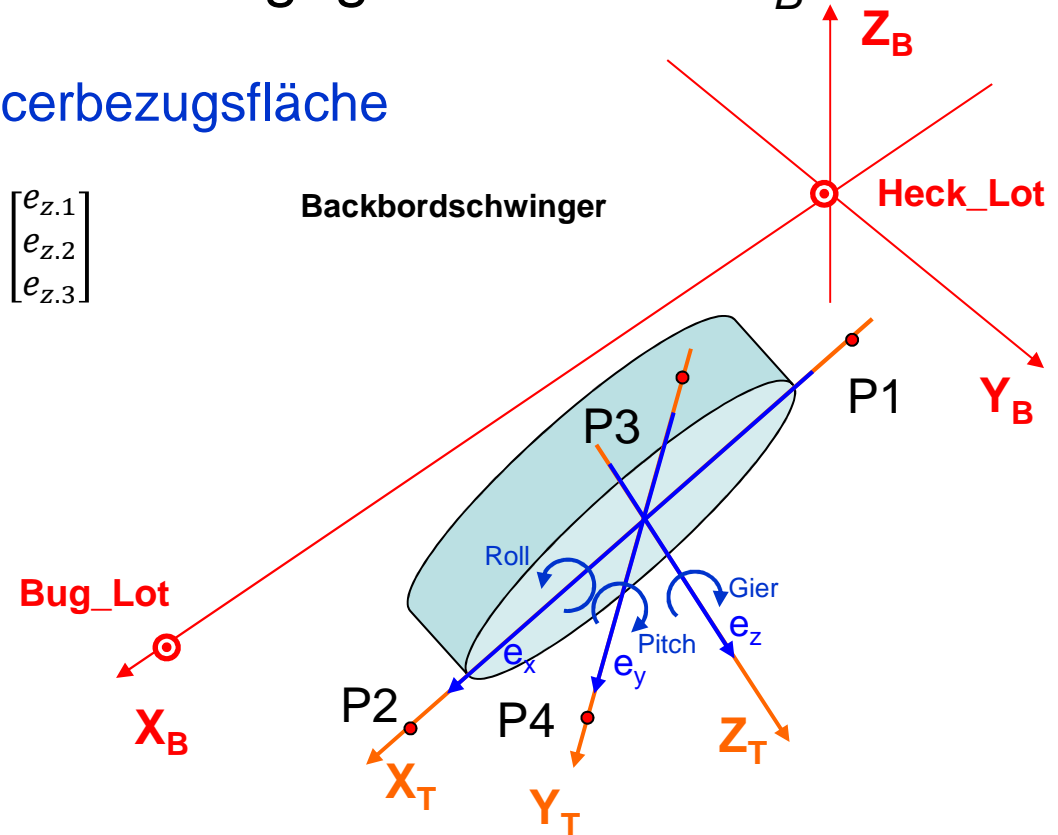
$$e_x = \begin{bmatrix} e_{x.1} \\ e_{x.2} \\ e_{x.3} \end{bmatrix}; e_y = \begin{bmatrix} e_{y.1} \\ e_{y.2} \\ e_{y.3} \end{bmatrix}; e_z = \begin{bmatrix} e_{z.1} \\ e_{z.2} \\ e_{z.3} \end{bmatrix}$$

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

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



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

$\sigma_\beta = \dots$

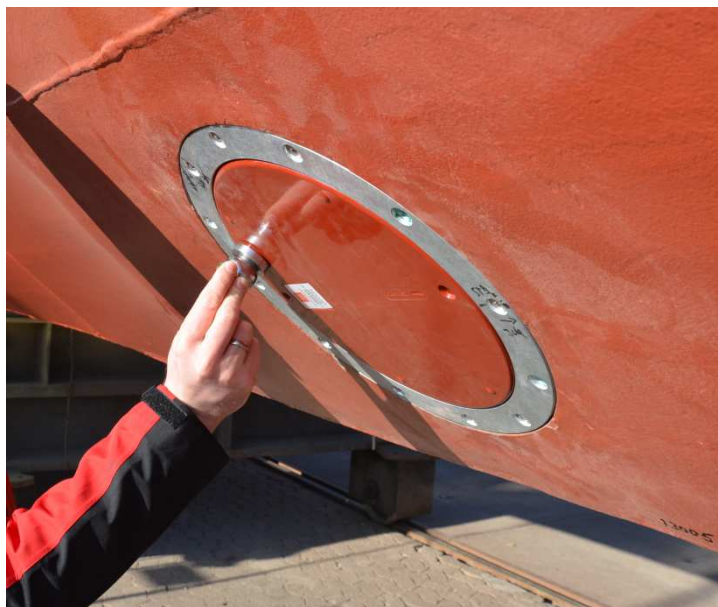
$\sigma_\gamma = \dots$

Einmessung Fächerlot-Transducer

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

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

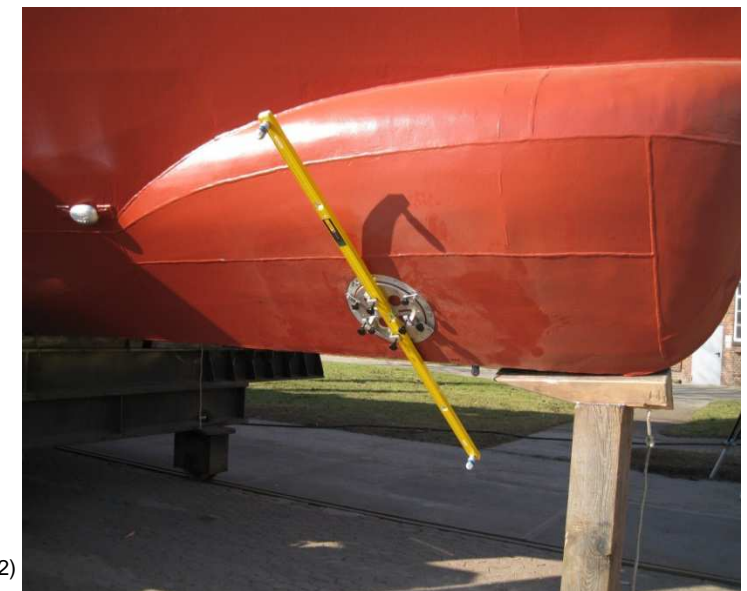
*³⁾ abhängig von Messgeräten, Netzgeometrie, ...



Lasertracker*¹⁾



Tachymeter*²⁾



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

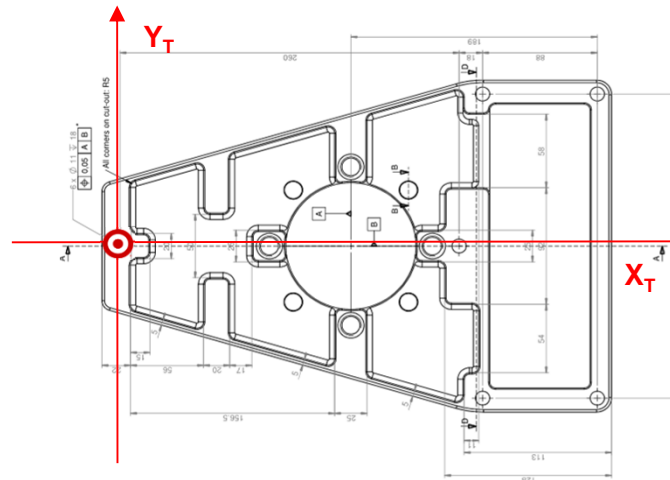
*²⁾ Winkelmessunsicherheit: 0,3 mgon (0,005mm/m)
 Streckenmessunsicherheit: 1 mm + 2ppm

Einmessung Fächerlot-Transducer

eingebauter Fächerlot-Transducer



Definition des Transducer-Koordinatensystems



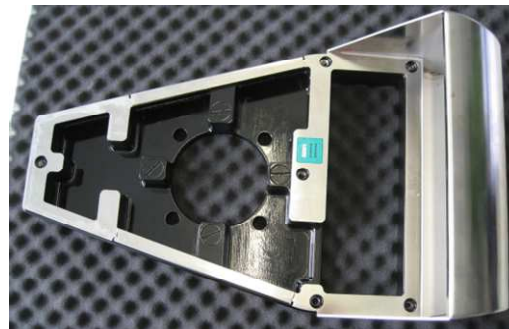
örtliche Einmessung des Frames ins Schiffskoordinatensystem



Frame



Schutzblech



Sonar (Sender)

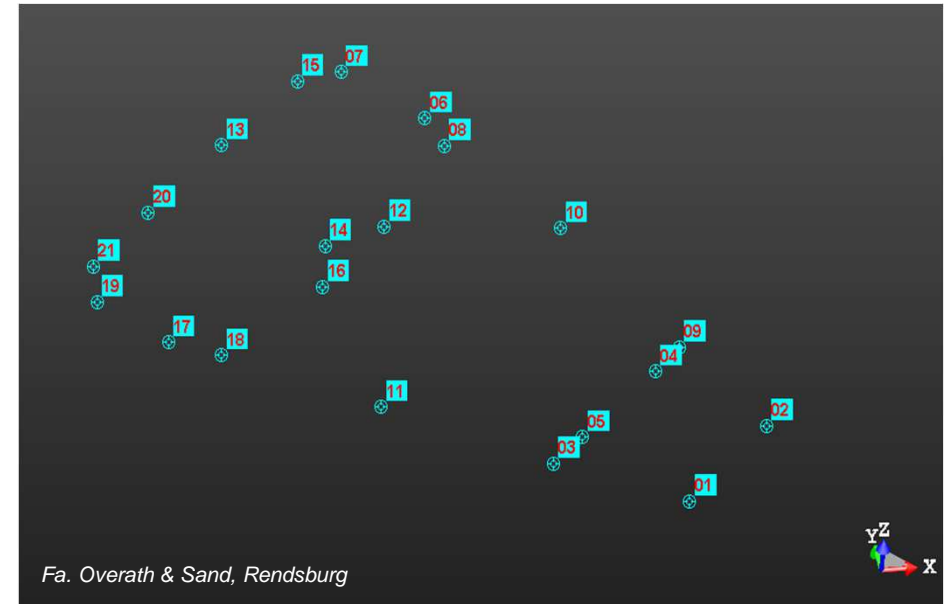


Receiver (Empfänger)



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

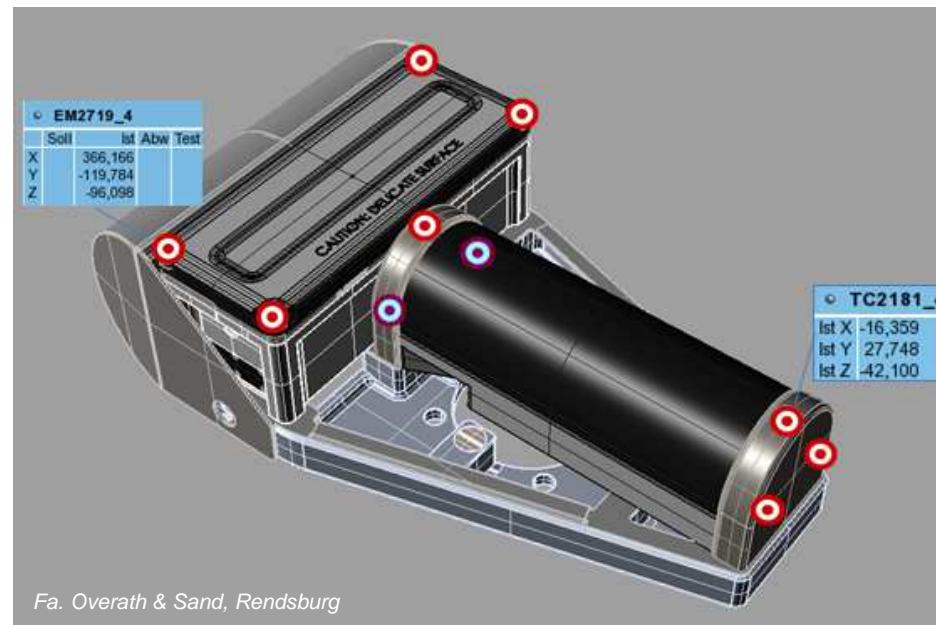
Prüfung der Maßhaltigkeit und
Ebenheit
des Frames im Labor

< 0,05mm

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



<http://www.hexagonmi.com>



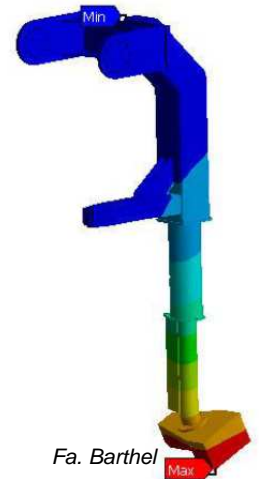
**< 0,1mm
nach Modifikation der Befestigungen !!!**

Stabilitätsmessungen der Transducerhalterungen

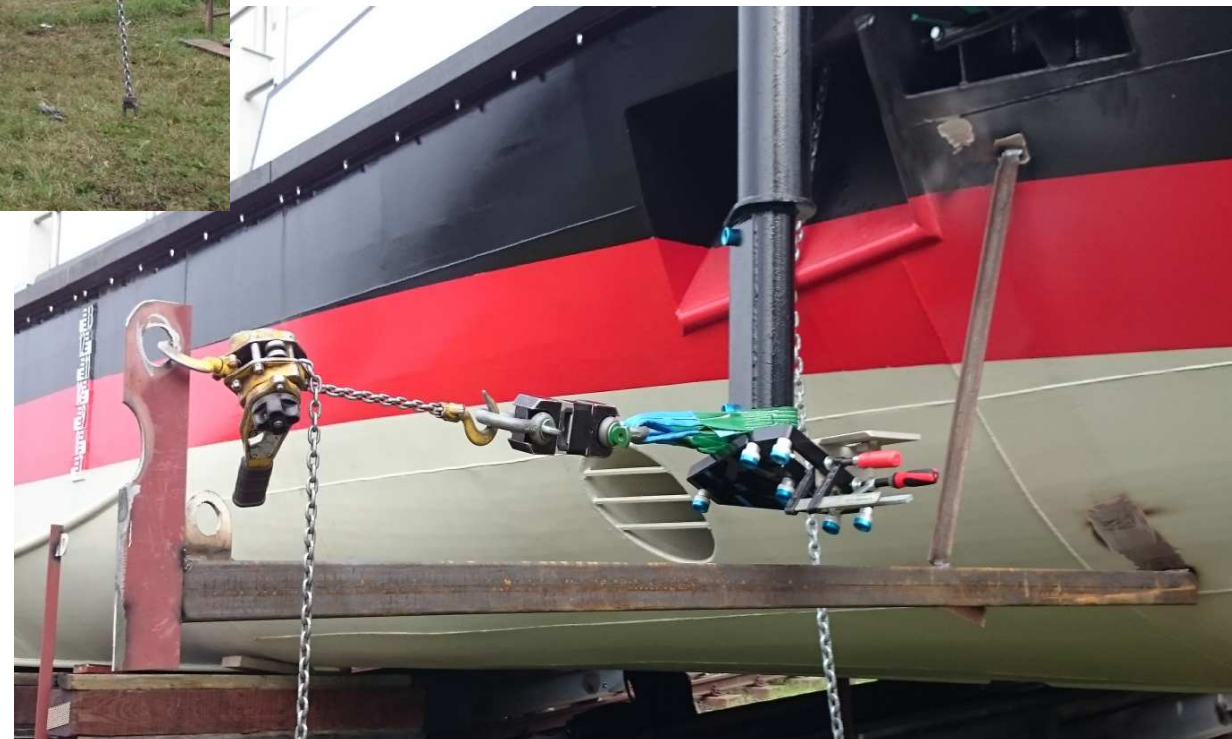


Prüfung der Vorgaben
aus der Bauvorschrift

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



Last	ΔRoll	ΔPitch
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 _{Roll}	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,06^\circ$
	Einbauwinkel _{Pitch}	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,06^\circ$
	Einbauwinkel _{Gier}	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,06^\circ$
Headingsystem	Heading_Offset	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,04^\circ$
IMU	Einbauwinkel _{Roll}	$< 0,02^\circ$	-	$\sim 0,02^\circ$
	Einbauwinkel _{Pitch}	$< 0,02^\circ$	-	$\sim 0,02^\circ$
	Einbauwinkel _{Yaw}	$< 0,1^\circ$	-	$\sim 0,10^\circ$

- 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

www.bafg.de