

Integrierte Positionierungssysteme für hydrographische Anwendungen

Prof. Dipl.-Ing. Harry Wirth

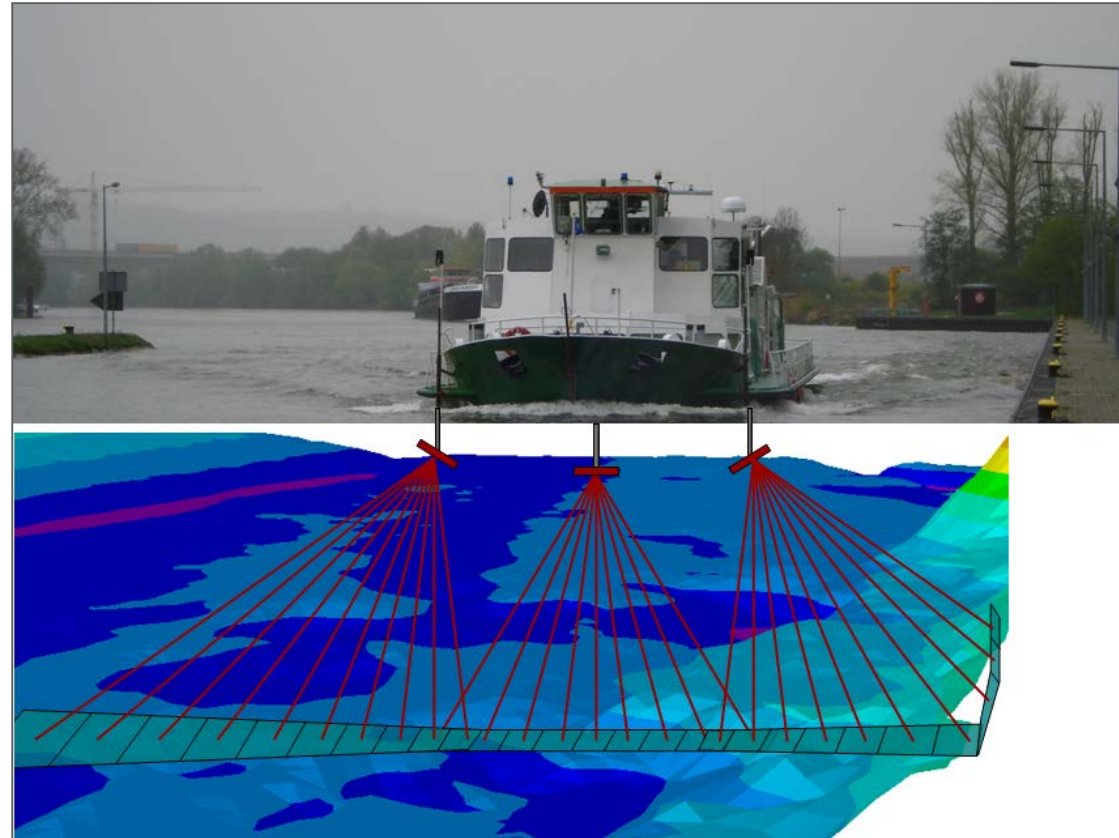
Oldenburg, 11.01.2018

1. **Bestandteile eines hydrographischen Vermessungssystems**
2. Sensorfusion
3. Systemkonzept hydrographisches Positionierungssystem
4. Verbesserung der Filterperformance
5. Fazit und Ausblick

Hydrographische Vermessungssysteme sind Multisensorsysteme

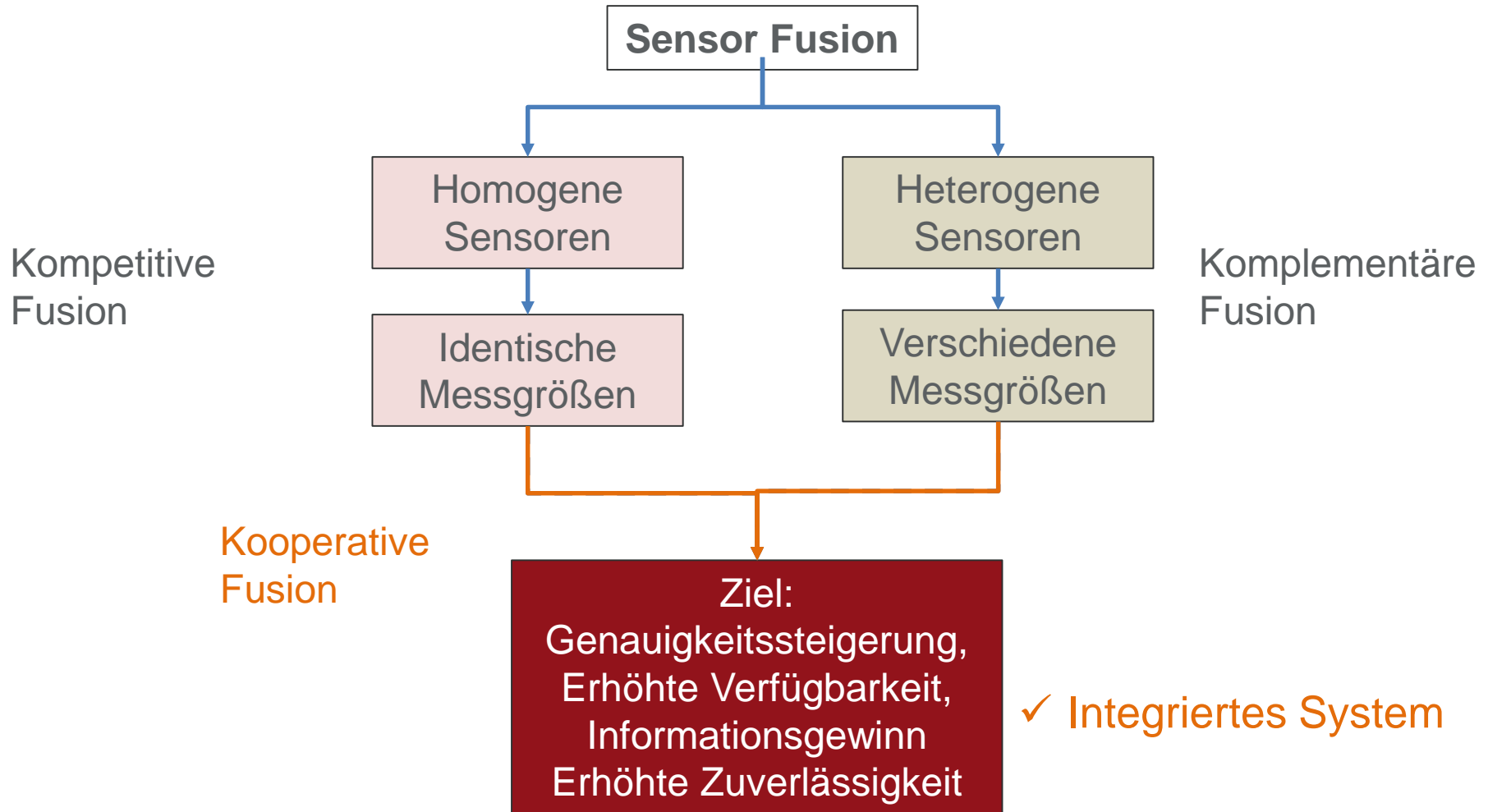
Aufbau eines Vermessungssystems:

- Positionierung/Lagemessung
- Tiefenmessung
- Prozessoreinheit zur Projektplanung, Datenerfassung und Navigationshilfe
- Ausgabeeinheiten (Plotter, etc.)

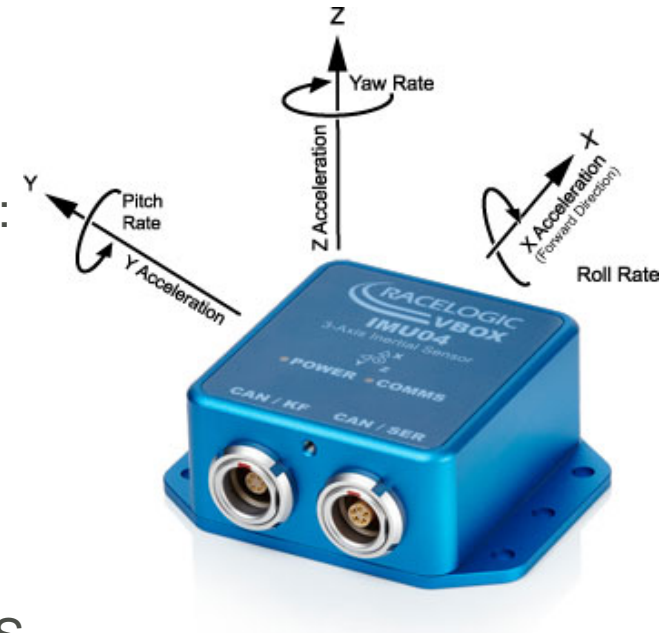


1. Bestandteile eines hydrographischen Vermessungssystems
2. **Sensorfusion**
 - Grundlagen, Fusionsmodelle
 - GNSS-INS Kopplungen, Möglichkeiten und Grenzen
3. Systemkonzept hydrographisches Positionierungssystem
4. Verbesserung der Filterperformance
5. Fazit und Ausblick

- **Sensor Fusion** bedeutet die intelligente Verknüpfung aller durch Sensoren erfassten Daten



- **IMU** (Inertial Measurement Unit) oder **INS** (Inertial Navigation System)
- Bestimmung von 6 kinematischen Freiheitsgraden:
 - 3 orthogonale Beschleunigungsmesser:
 - 2-fache Integration \Rightarrow **Translation/Position**
 - 3 orthogonale Drehratensensoren:
 - 1-fache Integration \Rightarrow **Orientierung/Lagewinkel**
- Integrationskonstanten durch Anfangs- bzw. Randwerte lösen: (CUPT und ZUPT) durch GNSS
- Weitere Bezeichnungen:
 - **AHRS** (Attitude and Heading Reference System) liefert Roll- und Nickwinkel, sowie Azimut gegen Nord
 - **HRPS** (Heave, Roll-, Pitch-Sensor): AHRS ergänzt um momentane Abweichung zur mittleren Höhe, kein Azimut



<https://www.vboxautomotive.co.uk> aufgesucht am 03.01.2018

- Wie erhält man Roll- (φ) und Pitchwinkel (θ) aus Beschleunigungsmessungen?
- In Ruhe gilt (Anfangswerte):

$$- \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}^B = R_{LL}^B \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}^{LL} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \cdot g \\ -\sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot g \\ \cos \varphi \cdot \cos \theta \cdot g \end{pmatrix}$$

$$- \text{Rollwinkel } \varphi = \sin^{-1} \left(\frac{a_x}{g} \right)$$

$$- \text{Nickwinkel (pitch) } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right)$$

- Autonomes Fahren Kfz

Stufe 0 Selber Fahren

Stufe 1 Fahren mit Assistenzsystemen
Das System übernimmt entweder die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs. **Der Fahrer** führt dauerhaft die jeweils andere Aktivität aus.

Stufe 2 Teilautomatisiertes Fahren und Parken
In bestimmten Anwendungsfällen übernimmt das System, **der Fahrer** überwacht das Fahrzeug und den Verkehr.

Stufe 3 Hochautomatisiertes Fahren
Das System fährt, erkennt seine Leistungsgrenzen und fordert **den Fahrer** aktiv auf, innerhalb einer gewissen Zeit das Steuer zu übernehmen.

Stufe 4 Vollautomatisiertes Fahren
Das System übernimmt in definierten Anwendungsfällen dauerhaft und zuverlässig das Steuer.

Stufe 5 Autonomes Fahren
Das System fährt vollkommen selbstständig. Das Fahrzeug wird zum Chauffeur.

- Autonomes Fahren Kfz

Positionierung in der Hydrographie

Stufe 0 Selber Fahren

Schätzortung (visuelle Positionierung im Flusslauf oder durch Peilung relativ zu Seezeichen)

Stufe 1 Fahren mit Assistenzsystemen
Das System übernimmt entweder die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs. **Der Fahrer** führt dauerhaft die jeweils andere Aktivität aus.

Positionierungssystem (z.B. GNSS) und Lagemessung (z.B. AHRS)

Stufe 2 Teilautomatisiertes Fahren und Parken
In bestimmten Anwendungsfällen übernimmt das System, **der Fahrer** überwacht das Fahrzeug und den Verkehr.

Positionierungssystem (mehrere Positionierungssysteme + AHRS) Umschalten zwischen Sensoren bei Ausfällen

Stufe 3 Hochautomatisiertes Fahren
Das System fährt, erkennt seine Leistungsgrenzen und fordert **den Fahrer** aktiv auf, innerhalb einer gewissen Zeit das Steuer zu übernehmen.

Integriertes Positionierungssystem (GNSS + IMU) Stützung bei kurzzeitigem GNSS-Ausfall

Stufe 4 Vollautomatisiertes Fahren
Das System übernimmt in definierten Anwendungsfällen dauerhaft und zuverlässig das Steuer.

Integriertes Multisensorsystem (mehrere GNSS + IMU + weitere Sensoren + externe Information) Stützung bei Ausfall und hohe Zuverlässigkeit

Stufe 5 Autonomes Fahren
Das System fährt vollkommen selbstständig.

Integriertes autonomes Multisensorsystem (siehe Stufe 4 + autonome Bahnführung), ASV und AUV

Performance Grade	Bias Stability	Gyro	
Consumer	30 - 1000°/hr	MEMS	2 - 10€
Industrial	1 - 30°/hr	MEMS	
Tactical	0.1 - 30°/hr	MEMS	4.000 - 10.000€
High-End Tactical	0.1 - 1°/hr	Fibre-Optic Gyro (FOG), Ring Laser Gyro (RLG), Mechanical Gyroscope (MG)	
Navigation	0.01 - 0.1°/hr	FOG, RLG, MG	80.000 - 140.000€
Strategic	0.0001 - 0.01°/hr	ITAR- (International Traffic in Arms Regulations) controlled	



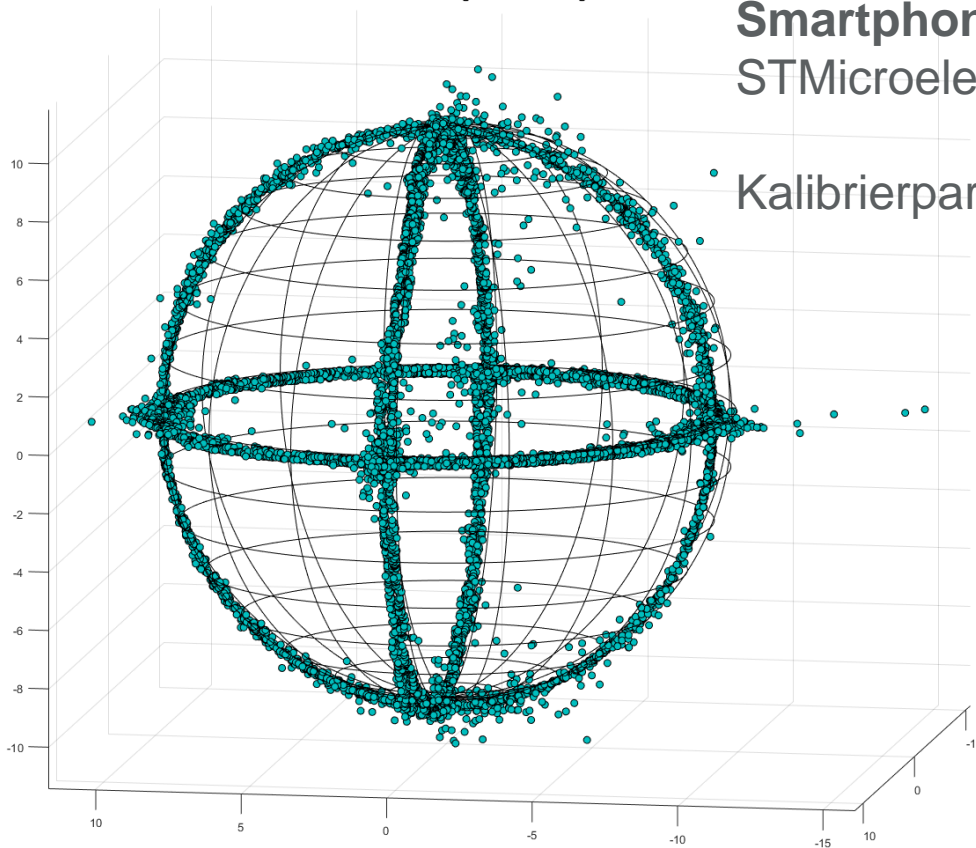
Beispiel High-End Navigation: iMAR iNAT-RQT-4002

- Bias Stability: Gyro < 0.001°/hr , Accel. < 12 μ g
- Attitude: < 0.025° (< 0.01° mit GNSS, < 0.0025° mit RTK)
- Position: < 1nm/hr (< 1.6m GNSS, < 0.1m RTK)

Die Fusion einer IMU mit GNSS steigert die Genauigkeit der IMU!

Zufällige und systematische Abweichungen	Gyroscope	Accelerometer	Correction / Improvement
Noise (Messrauschen)	Angle Random walk	Velocity Random walk	Filtering
Bias Vibration and shock sensitivity rectification	Filter divergence	Filter divergence	Adaptive Filtering, and /or good location, outlier detection
Bias offset (g-independant)	Linear angle error growth	Quadratic Position error growth	Calibration
Bias offset (g-dependant)	„	„	Calibration
Bias Instability (constant Temp)	„	„	modelling as Random walk or Realtime Calibration
Bias Variation with temp.	„	„	Calibration
Scalefactor Non-linearity	„	„	Calibration
Scalefactor Non-linearity with Temp.	„	„	Calibration
Non-Orthogonality of Sensors	„	„	Calibration
Sensor alignment to body frame	„	„	Calibration

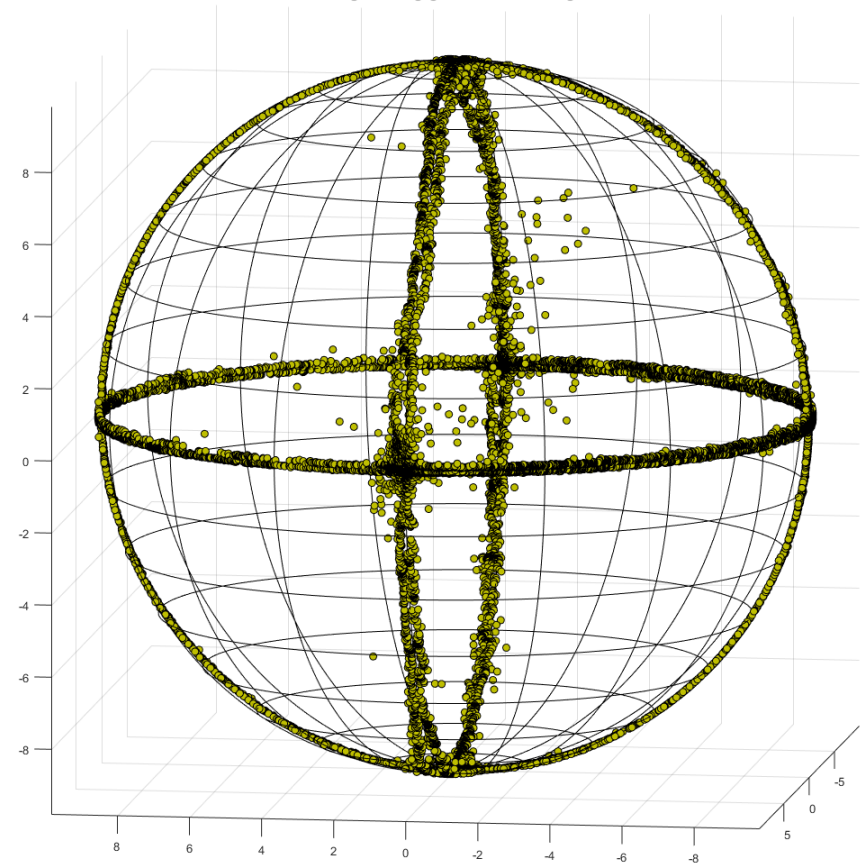
unkorrigierte Beobachtungen



Smartphone Samsung S4: STMicroelectronics K330 Beschleunigungsmesser

Kalibrierparameter: Bias, Scale, Non-Orthogonality

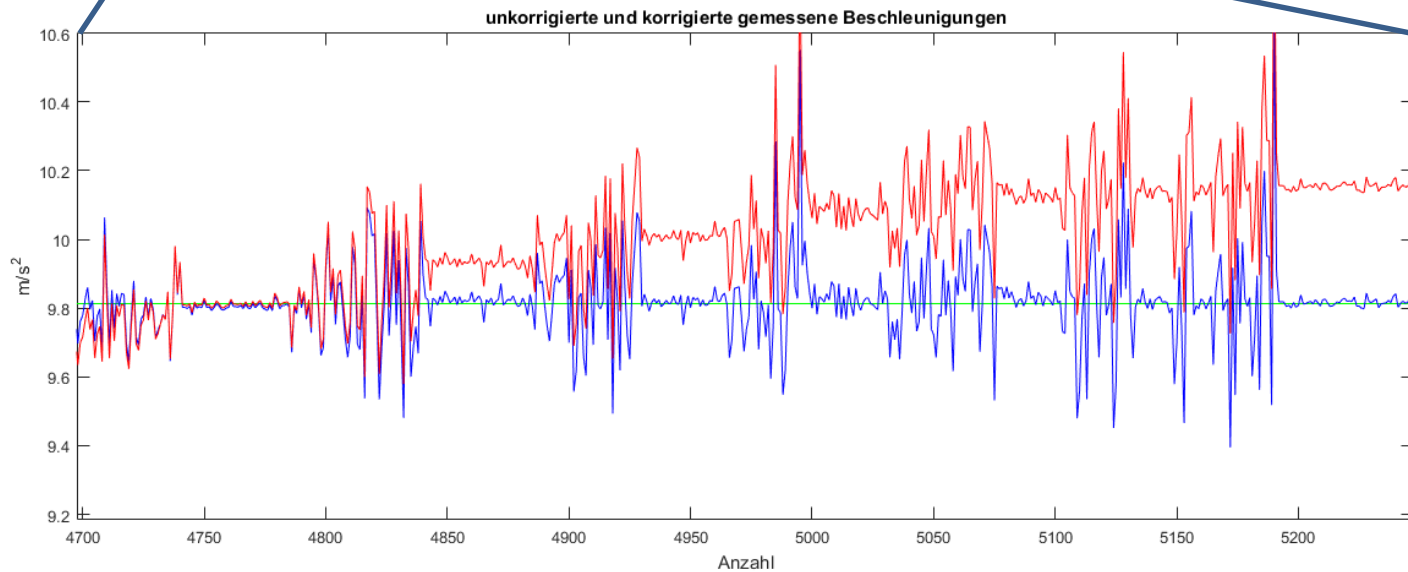
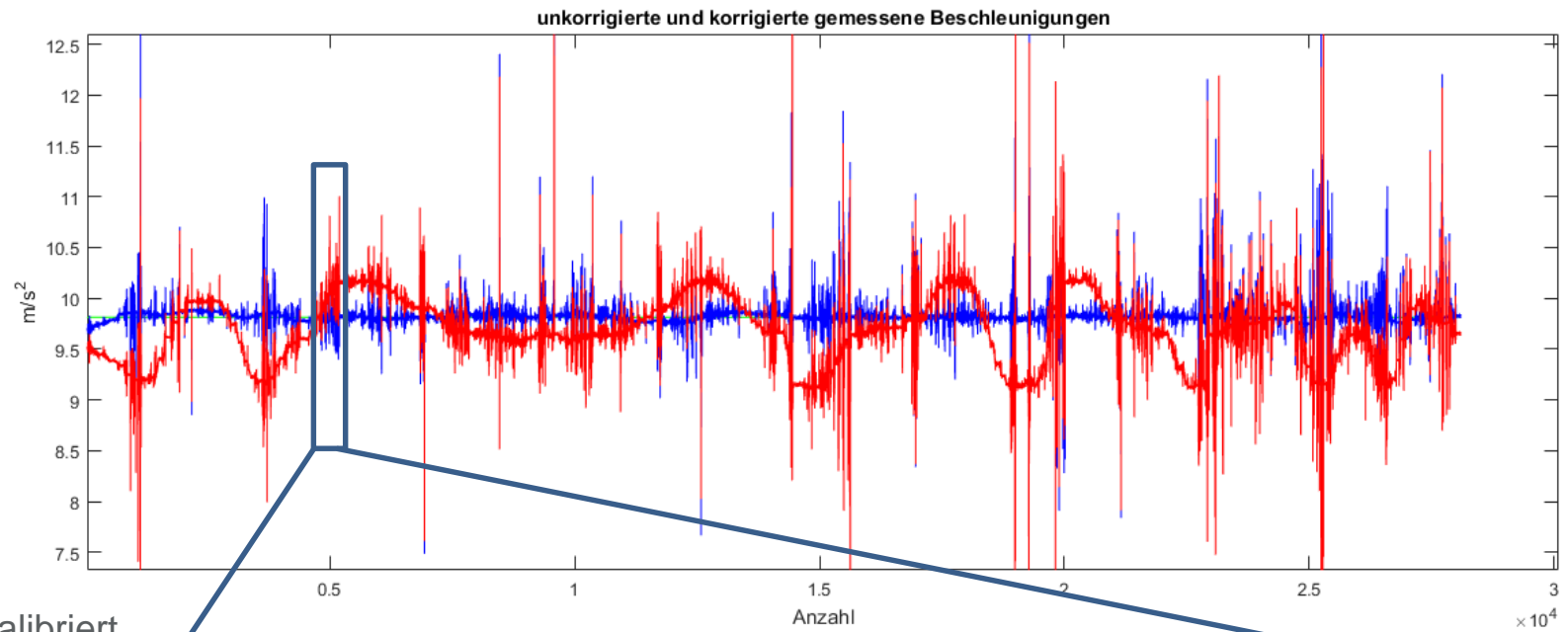
korrigierte ausgeglichene Beobachtungen



Grundidee:

Ein kalibriertes Accelerometer zeigt in Ruhe den Betrag der Schwerebeschleunigung an

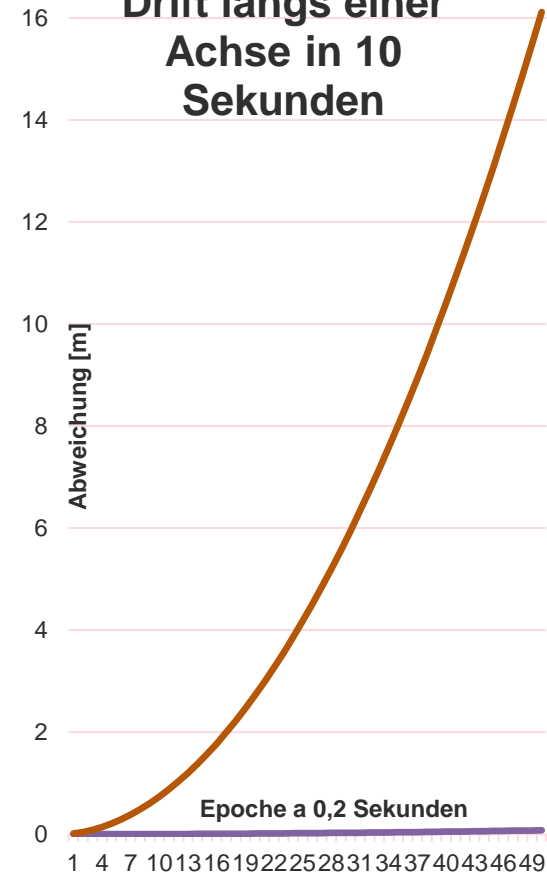
SMARTPHONE IMU CALIBRATION



Kalibrierung Smartphone Samsung S4 STMicroelectronics K330 Beschleunigungsmesser

	Parameter [no dim m/s ²]	Sigma [no dim m/s ²]	Konfidenz 95% [no dim / m/s ²]
1	1.03640	0.00016	0.00032
2	1.00498	0.00014	0.00027
3	0.99231	0.00015	0.00029
4	0.31215	0.00133	0.00260
5	-0.13698	0.00127	0.00249
6	-0.25814	0.00134	0.00262
7	-0.00200	0.00046	0.00090
8	0.00177	0.00047	0.00091
9	-0.00187	0.00046	0.00089

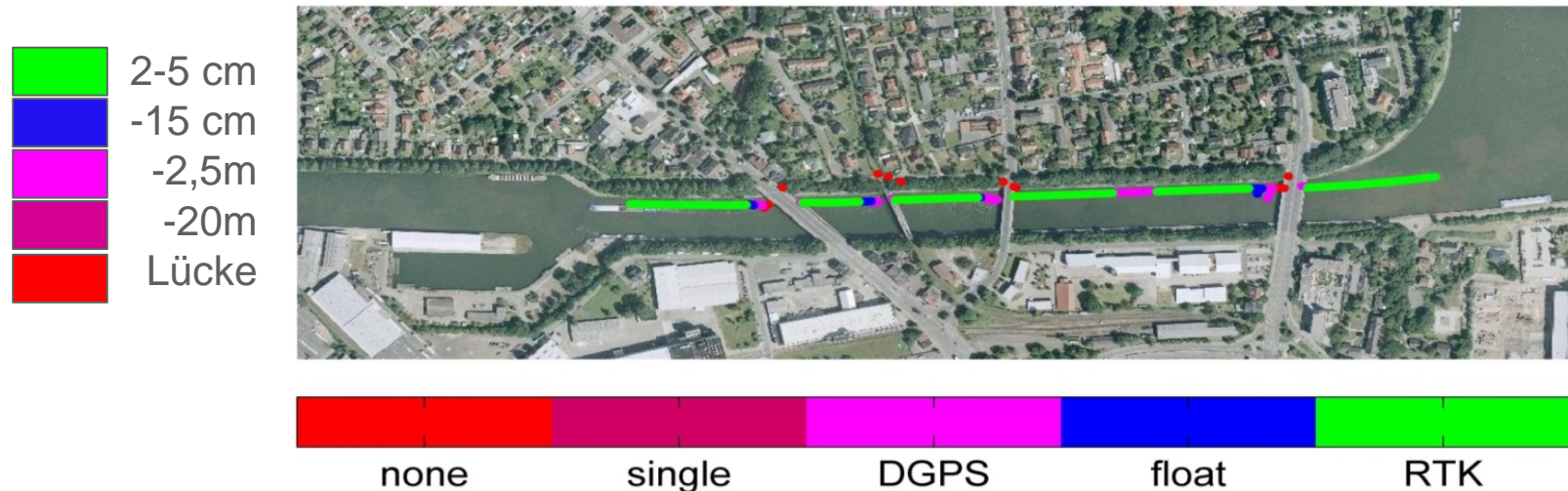
Drift längs einer Achse in 10 Sekunden



Eigenschaft	Vor der Kalibrierung	Nach der Kalibrierung
Bias	~312 mg	~ 1,4 mg
Genauigkeit Lage	~ 1.8°	< 0.07°
Positionsfehler	> 16m / 10 Sec	~ 0,07m / 10 Sec

Verfügbarkeit und Genauigkeit:

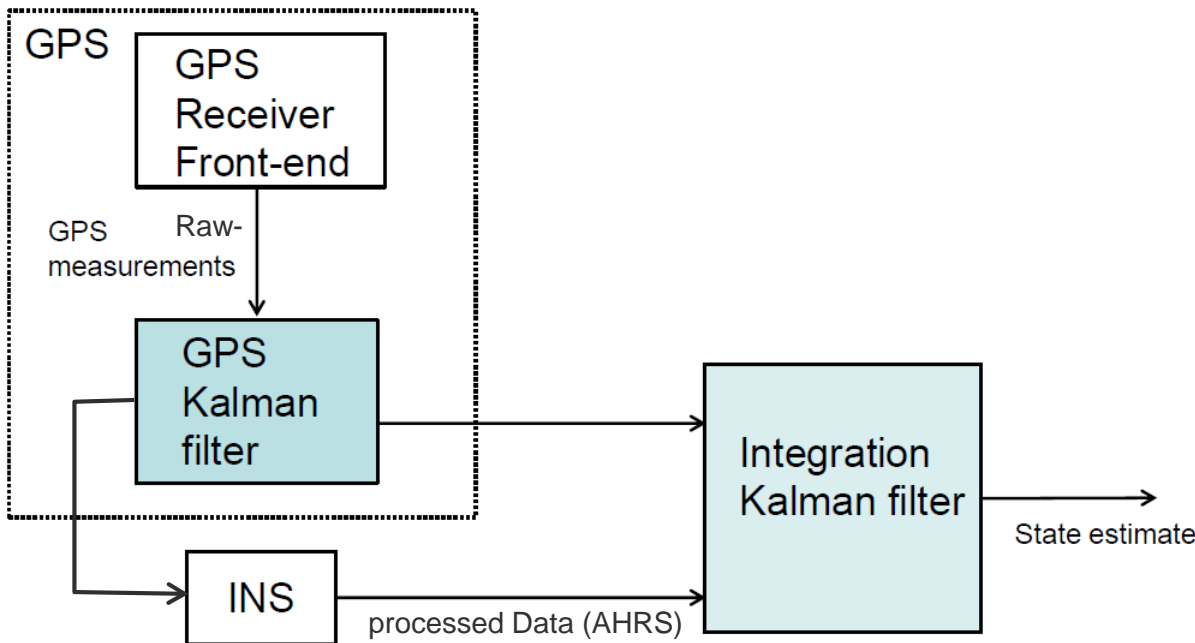
- Lücken oder Qualitätsmängel zwischen 2% und 12%
- Ursachen: Abschattungen, Korrekturdatenverlust
- Qualitätsindikatoren fehlerhaft



Ziele:

erhöhte Genauigkeit, Verfügbarkeit, Systemintegrität, geringerer Auswerteaufwand

- Loosely coupled (or decentralized) System (marktüblich)



Vorteile:

Einfacher Ansatz

Geringe Rechenlast bei prozessierten IMU-Daten

Nachteil:

Sensorfilter sind „Black-Box“ Systeme

Mind. 4, besser 6 SV's erforderlich

States:

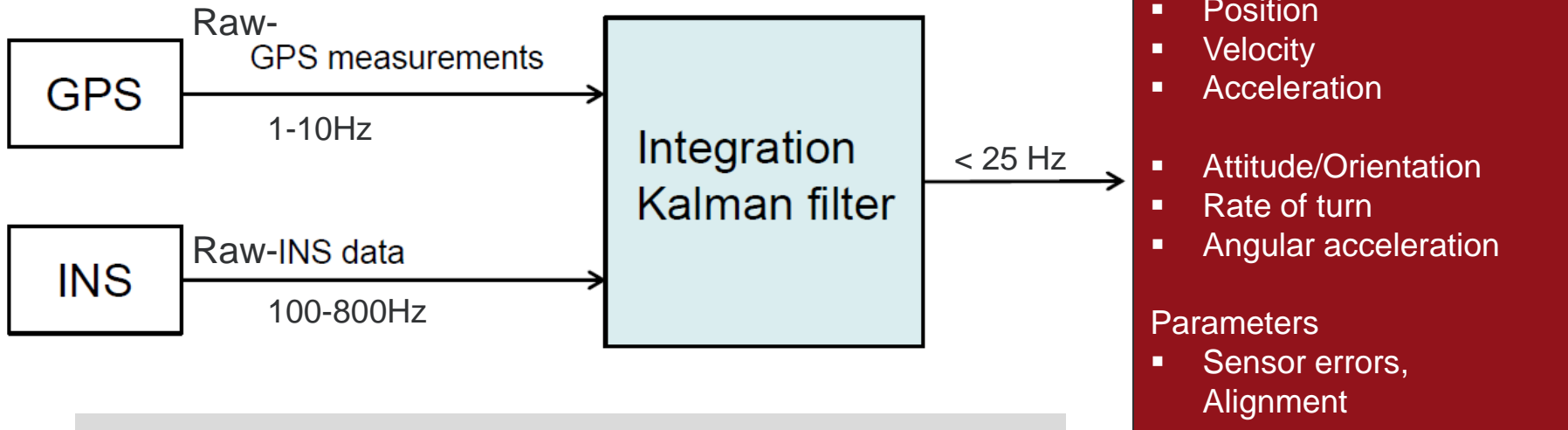
- Position
- Velocity
- Acceleration

- Attitude/Orientation
- Rate of turn
- Angular acceleration

Parameters

- Sensor errors, Alignment

- Tightly coupled (or centralized) System



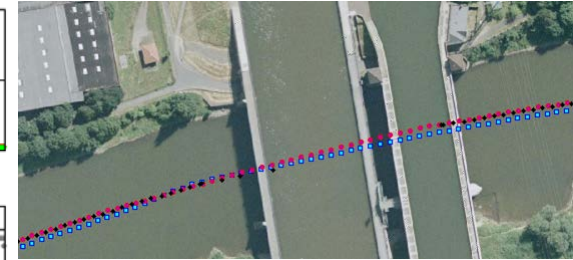
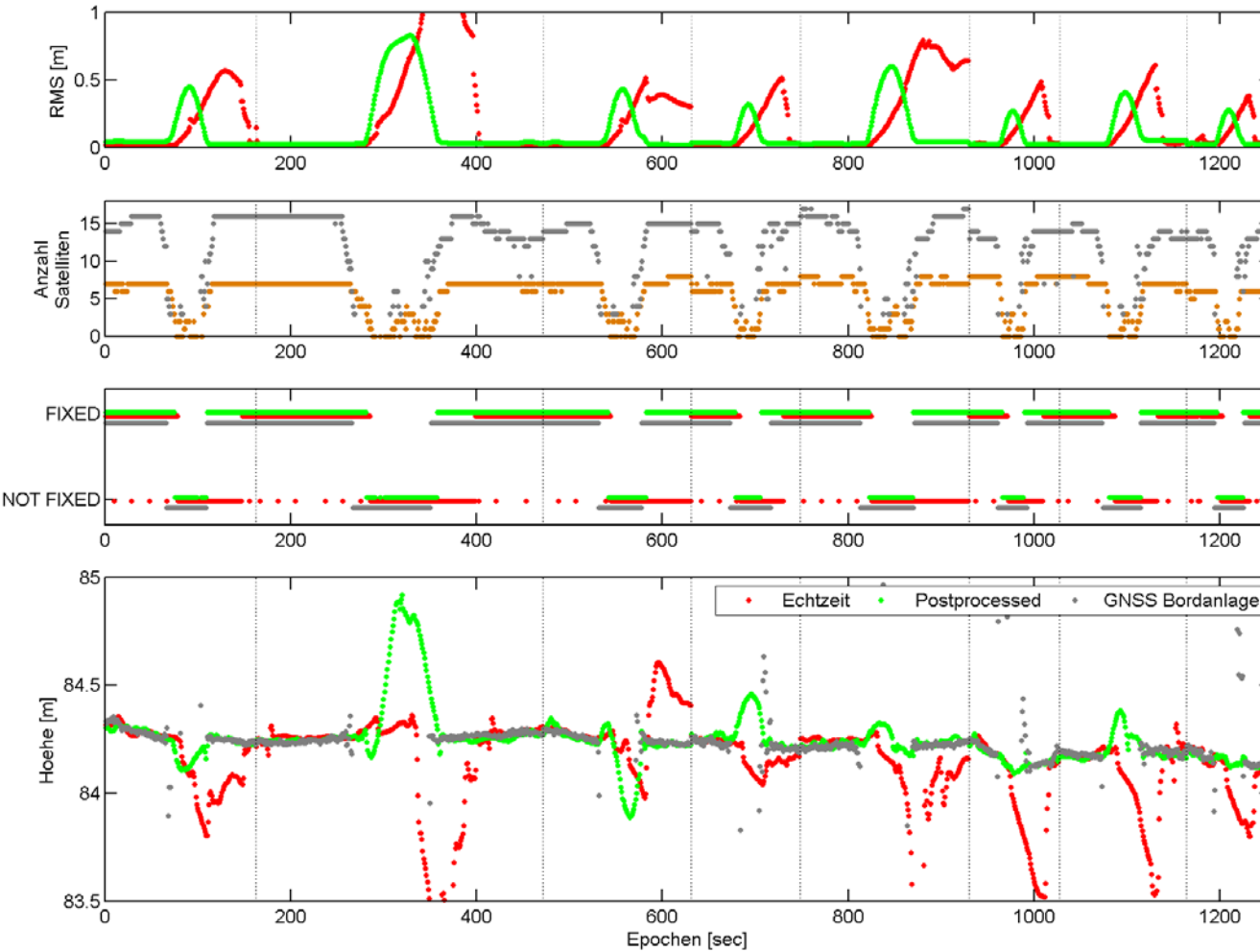
Vorteile:

Theoretisch optimal
GNSS-Beobachtungen sind auch nutzbar, wenn weniger als 4 SV's vorhanden

Nachteil:

Beobachtungsfrequenz ist stark unterschiedlich
Hohe Rechenlast

STATUS QUO MIT GPS-INS KOPPLUNGEN



**Applanix Pos MV
tightly coupled
No GLONASS**

RMS, Satellitenanzahl, Lösungsstatus und Höhenverlauf unter einer Brücke (8x)

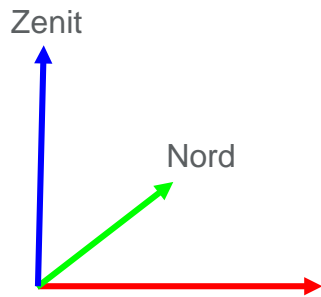
1. Bestandteile eines hydrographischen Vermessungssystems
2. Sensorfusion
3. **Systemkonzept hydrographisches Positionierungssystem**
 - Koordinatensysteme, Sensoren
 - Systemgleichungen und EKF
4. Verbesserung der Filterperformance
5. Fazit und Ausblick

- Integriertes System durch Kombination verschiedenster Messsysteme und Modelle
- Beschreibung der Schiffsbewegung in Raum und Zeit durch ein dynamisches Modell
- **Bei 60 Sekunden GNSS-Signalverlust:**
 - Unsicherheit der Höhe von 1 dm (Grad des Vertrauens 95%)
 - Unsicherheit der Lage von 3 dm (Grad des Vertrauens 95%)

Sekundärziele:

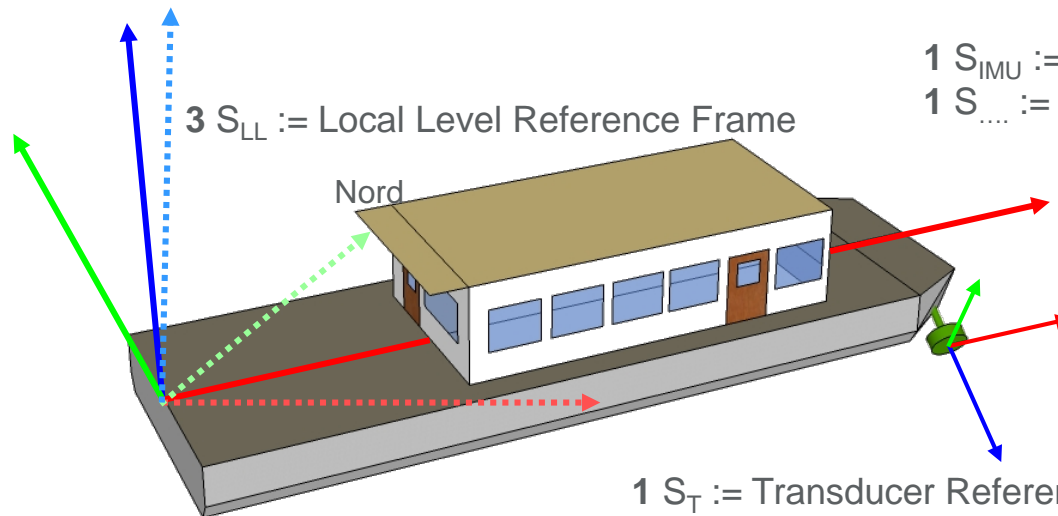
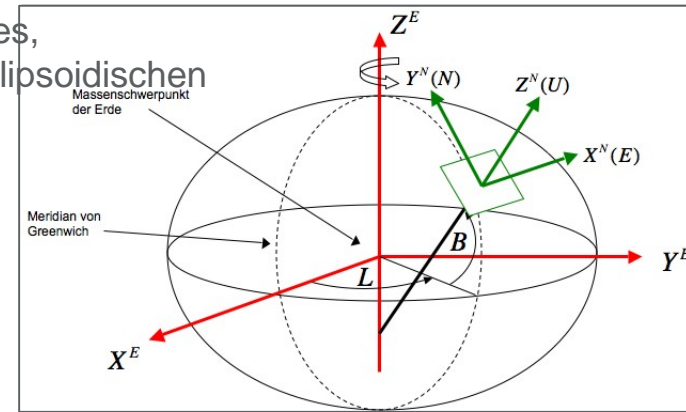
- Wasserspiegellagen messen
- Lagewinkel verbessern





4 S_U := User Reference Frame,
z.B. UTM/ETRS89

5 S_R := Global Reference Frame, erdfestes,
geozentrisches Bezugssystem mit z.B. ellipsoidischen
Koordinaten (L, B, h) für GNSS



3 S_{LL} := Local Level Reference Frame

1 S_{IMU} := IMU Reference Frame

1 $S_{...}$:= ... Sensor Reference Frame

1 S_T := Transducer Reference Frame

2 S_B := Body Reference Frame

$$x_{i.Sohle}^R = x_{i.Antenne(\lambda, \varphi, H_{Ellip.})}^R + x_{i.Beschickung}^R + M_{ij.LL}^R \cdot \left[x_{j.Latency}^{LL} + R^{LL}(\alpha_H, P, R)_{jk.B} \cdot \left(x_{k.Transducer}^B - x_{k.Antenne}^B + R^B(\gamma, \beta, \alpha)_{kl.T} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -r \sin \theta \\ r \cos \theta \end{bmatrix}_T \right) \right]$$

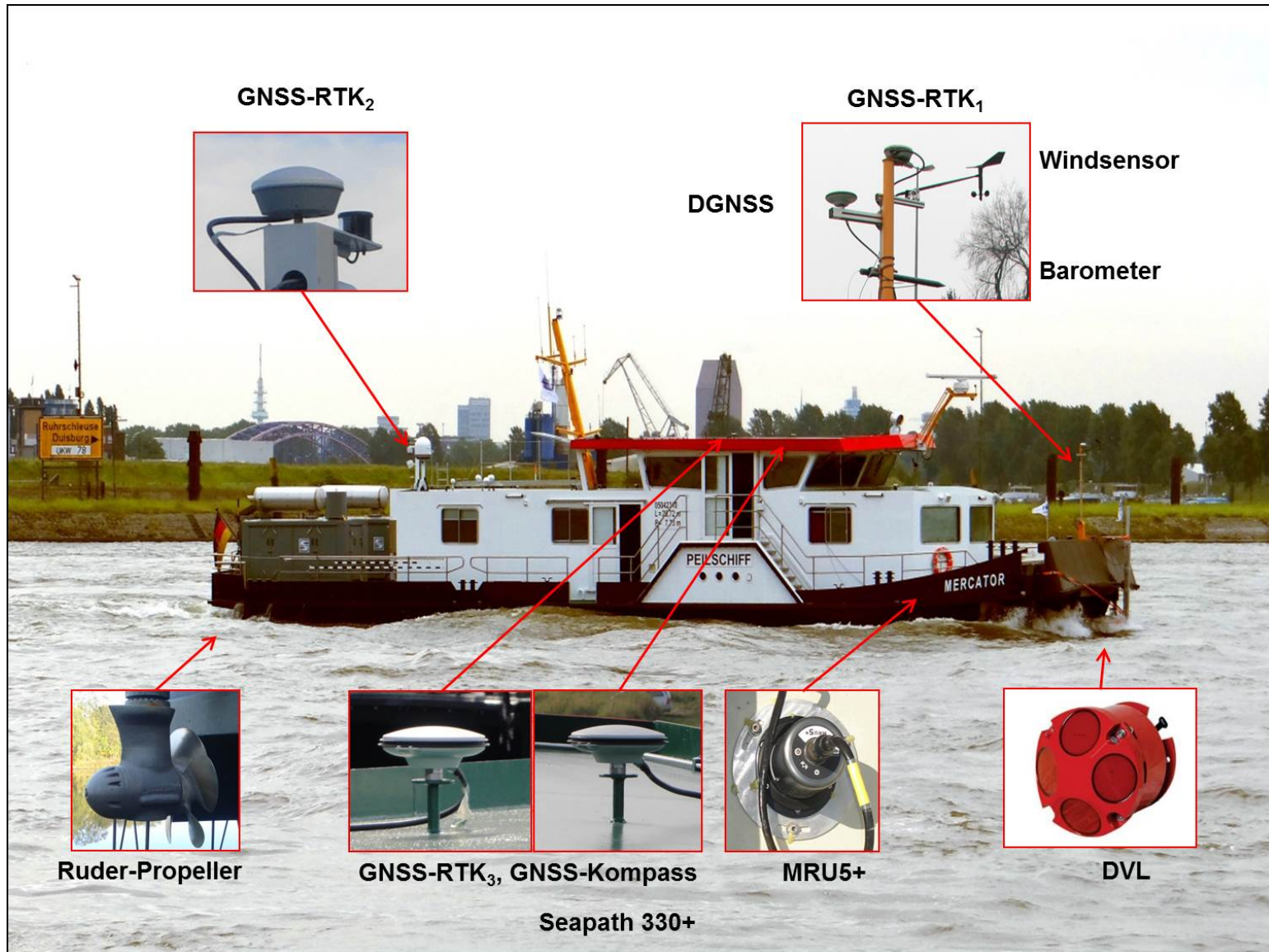


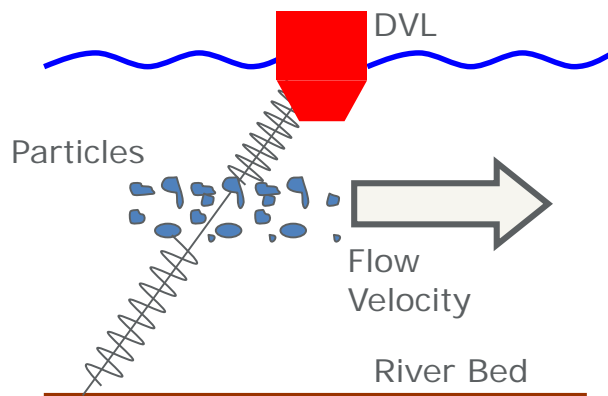
Foto: BfG

DOPPLER VELOCITY LOG (DVL)

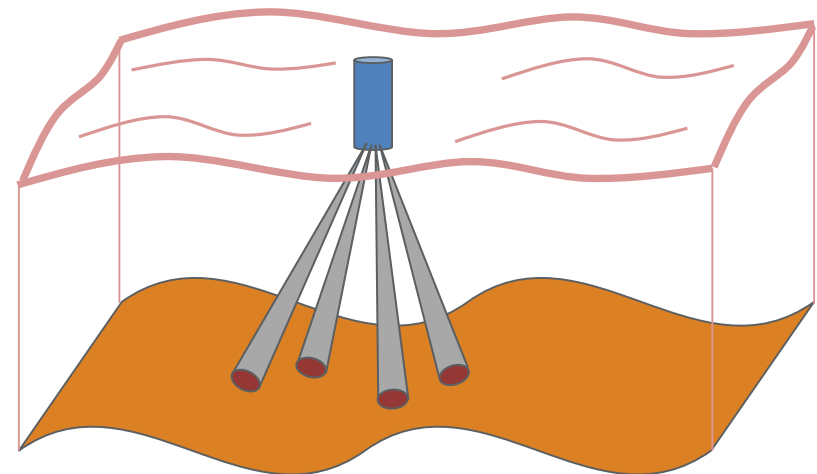
- Aktivsonar
- Bestimmt relative Geschwindigkeit mittels Doppler-Effekt (Frequenzverschiebung)
- Geschwindigkeit über Grund
Genauigkeit: $\pm 0,5\text{cm/s}$ (Stdabw. bei 5m/s)
 $\pm 0,2\% \pm 0,1\text{cm/s}$
- Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser
Genauigkeit: $\pm 0,2\% \pm 0,1\text{cm/s}$



www.rdinstruments.com

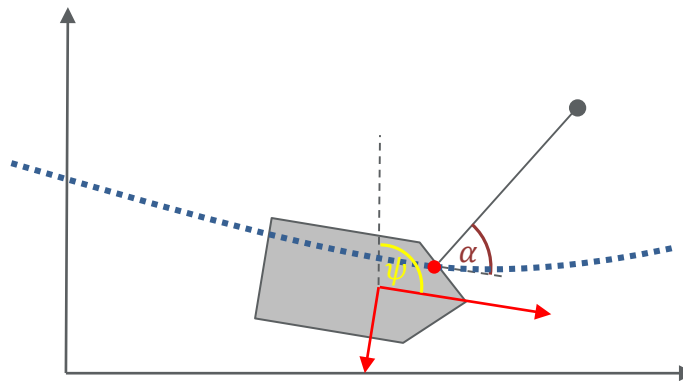


According to Fiedler (2008)



- **Tachymeter**

- Messung auf ein feststehendes Zielzeichen
- Transformation ins erdfeste Koordinatensystem



- **Laserscanner**

- Standpunktbestimmung durch SLAM-Algorithmen
- zusätzlich: Aufnahme des Uferbereichs

- **Kamera**

- Standpunktbestimmung durch SLAM-Algorithmen
- zusätzlich: Aufnahme des Uferbereichs

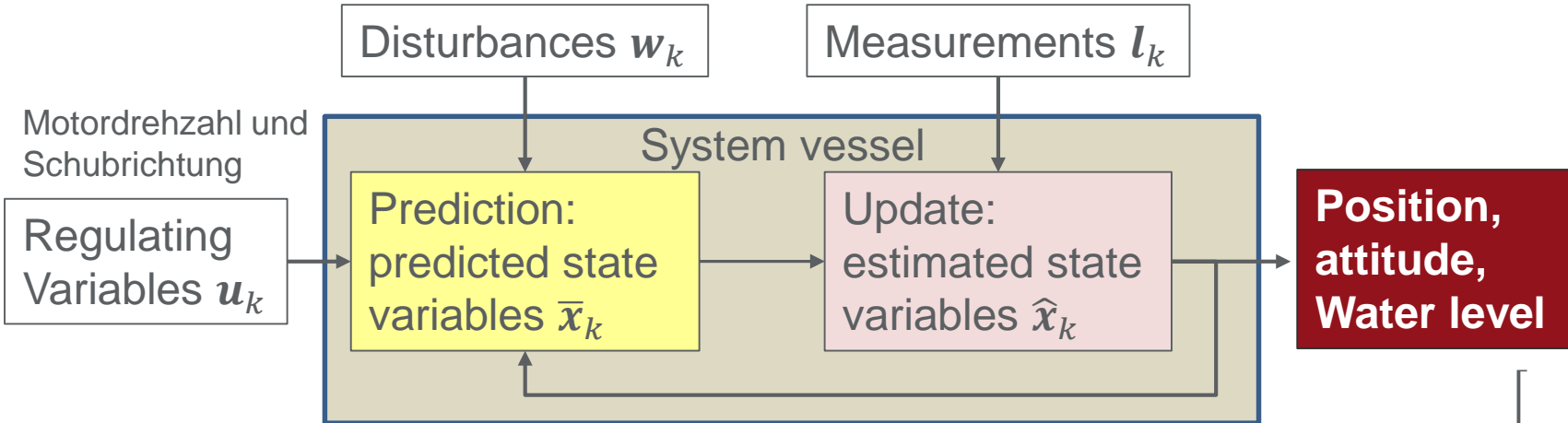


Foto: BfG



Foto: IIGS

EXTENDED KALMAN FILTER (EKF)



$$\mathbf{x}_k = \mathbf{T}_{k,k-1} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_{k,k-1} \cdot \mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{C}_{k,k-1} \cdot \mathbf{w}_{k-1}$$

$$\mathbf{l}_k = \mathbf{a}_k(\mathbf{x}_{k-1}) + \boldsymbol{\varepsilon}_k$$

Mit $E(\mathbf{w}_k) = 0$, $Var \mathbf{w}_k = \Sigma_{ww}$ und $E(\boldsymbol{\varepsilon}_k) = 0$, $Var \boldsymbol{\varepsilon}_k = \Sigma_{ll}$

sowie $Var \mathbf{u}_k = \Sigma_{uu}$

Prädiktion

$$\bar{\mathbf{x}}_k = f_{k,k-1}(t_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), b_{k,k-1}(u_{k-1}))$$

$$\Sigma_{\bar{x}\bar{x},k} = \mathbf{T}_{k,k-1} \cdot \Sigma_{\hat{x}\hat{x},k-1} \cdot \mathbf{T}_{k,k-1}^T + \mathbf{B}_{k,k-1} \cdot \Sigma_{uu,k} \cdot \mathbf{B}_{k,k-1}^T + \mathbf{C}_{k,k-1} \cdot \Sigma_{ww,k-1} \cdot \mathbf{C}_{k,k-1}^T$$

Update

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k \cdot (\mathbf{l}_k - \mathbf{a}_k(\bar{\mathbf{x}}_k))$$

$$\Sigma_{\hat{x}\hat{x},k} = \Sigma_{\bar{x}\bar{x},k} - \mathbf{K}_k \cdot \Sigma_{dd,k} \cdot \mathbf{K}_k^T$$

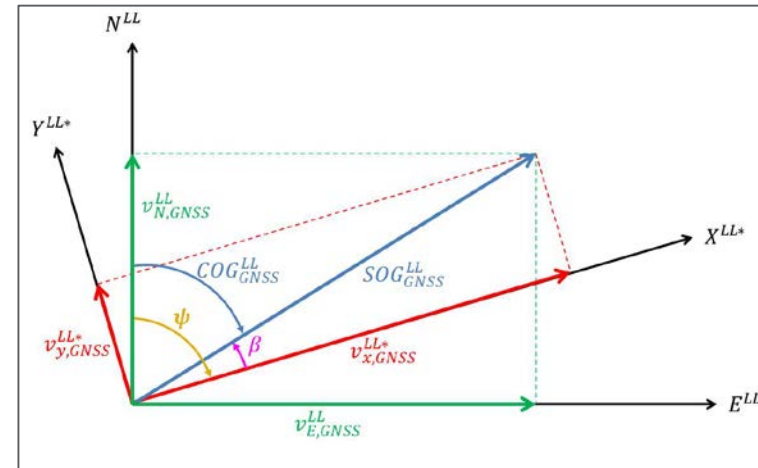
State vector: $\mathbf{x}_k =$

$$\begin{bmatrix} \omega_{x,k}^{B,LL} \\ \omega_{y,k}^{B,LL} \\ \omega_{z,k}^{B,LL} \\ v_{x,k}^B \\ v_{y,k}^B \\ v_{z,k}^B \\ \varphi_k^{B,LL} \\ \theta_k^{B,LL} \\ \psi_k^{B,LL} \\ E_k^{UTM} \\ N_k^{UTM} \\ U_k^{UTM} \\ \Delta H_{WL,Modell} \end{bmatrix}$$

- Wieso wird eine IMU durch Fusion mit GNSS genauer?
- Messgleichungen allgemein im EKF:
- $\mathbf{l}_k = \mathbf{a}_k(\bar{\mathbf{x}}_{k-1}) + \boldsymbol{\varepsilon}_k$

- Beispiel COG (Course Over Ground) aus GNSS:

- $\mathbf{l}_{COG,k+1} = COG_{GNSS}^{B,LL},k+1 = \bar{\psi}_{k+1}^{B,LL} + \text{atan} \left(\frac{-\bar{v}_{y,GNSS_1}^{LL*}}{\bar{v}_{x,GNSS_1}^{LL*}} \right)$ mit



- $$\bar{v}_{x,GNSS}^{LL*} = \cos \bar{\theta}_k^{B,LL} \cdot \left(\bar{v}_{x,RP}^B + \bar{\omega}_{y,k+1}^{B,LL} \cdot (z_{RP}^B - z_{GNSS}^B) + \bar{\omega}_{z,k+1}^{B,LL} \cdot (z_{GNSS}^B - z_{RP}^B) \right) -$$

$$\sin \bar{\theta}_k^{B,LL} \sin \bar{\varphi}_k^{B,LL} \cdot \left(\bar{v}_{y,RP}^B + \bar{\omega}_{x,k+1}^{B,LL} \cdot (z_{RP}^B - z_{GNSS}^B) + \bar{\omega}_{z,k+1}^{B,LL} \cdot (x_{RP}^B - x_{GNSS}^B) \right) -$$

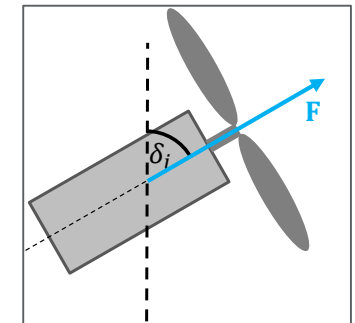
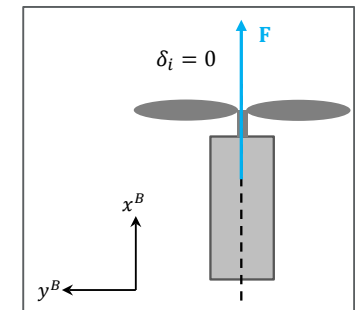
$$\sin \bar{\theta}_k^{B,LL} \cos \bar{\varphi}_k^{B,LL} \cdot \left(\bar{v}_{z,RP}^B + \bar{\omega}_{x,k+1}^{B,LL} \cdot (y_{GNSS}^B - y_{RP}^B) + \bar{\omega}_{y,k+1}^{B,LL} \cdot (x_{GNSS}^B - x_{RP}^B) \right) \text{ usw.....}$$

- Die Beobachtung COG beeinflusst fast alle Zustandsgrößen des EKF!

- **Stellgrößen Ruderstellung und Motordrehzahl**

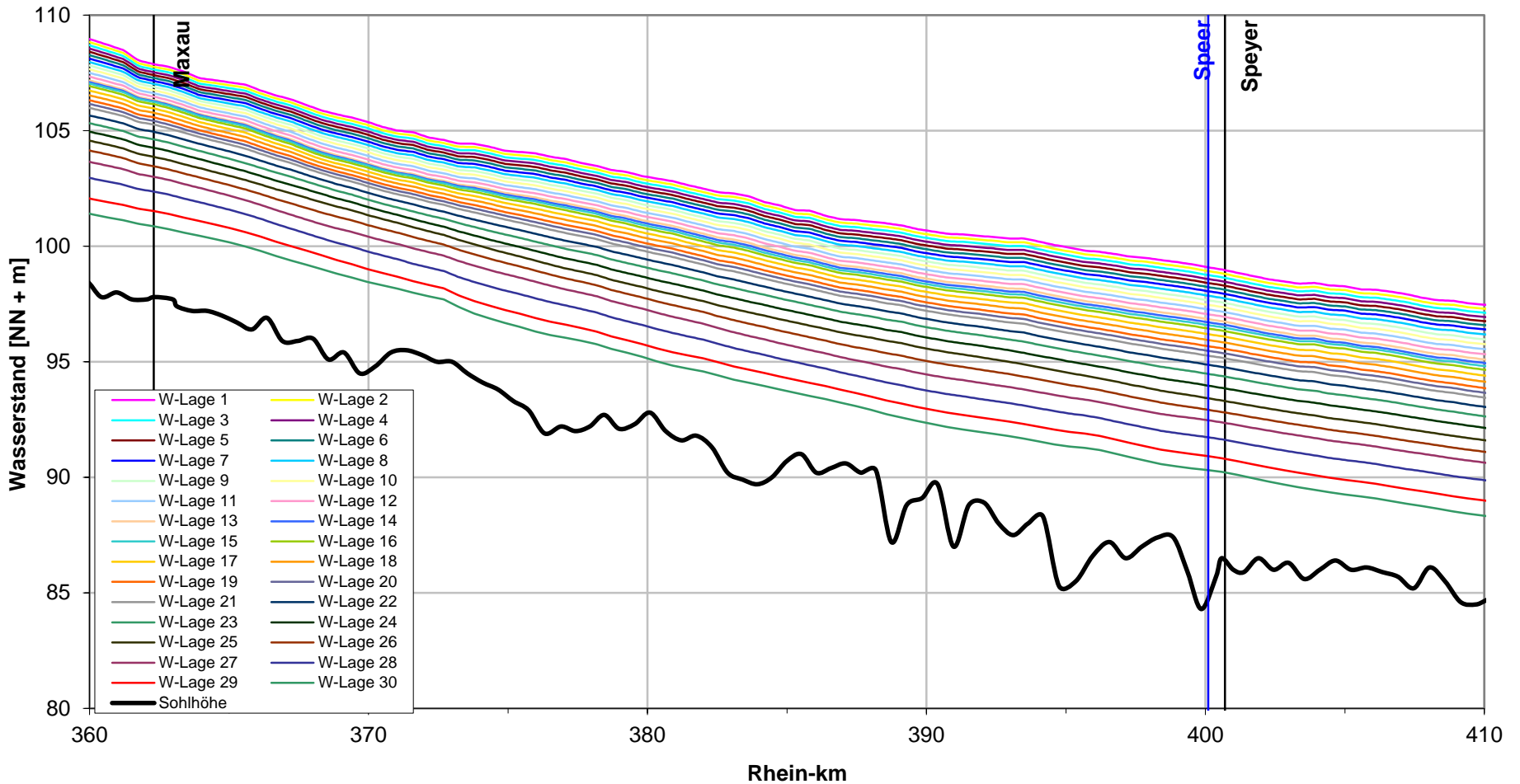
- Wirkung:

- Bei veränderter Motordrehzahl, Ruderstellung $\delta = 0 \Rightarrow$ Geschwindigkeitsänderung
- Bei geänderter Ruderstellung $\delta \neq 0 \Rightarrow$ Drehratenänderung
- Veränderte Stellgrößen wirken sich verzögert aus

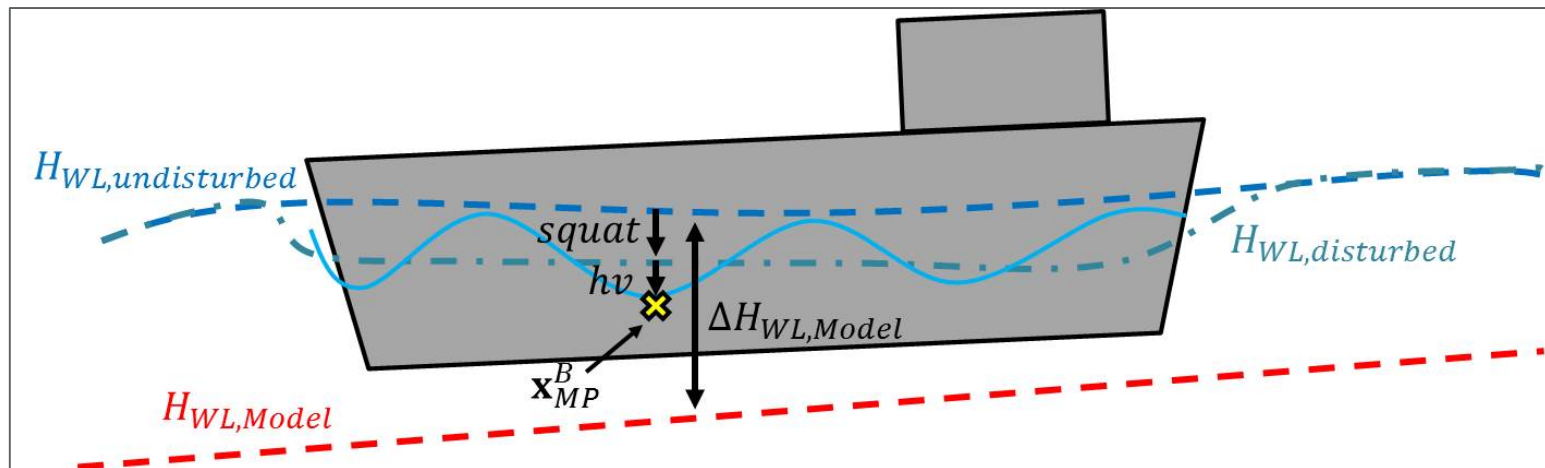


Für geradlinige Messfahrten mit (näherungsweise) gleichbleibender Geschwindigkeit ist das kinematische Modell ausreichend

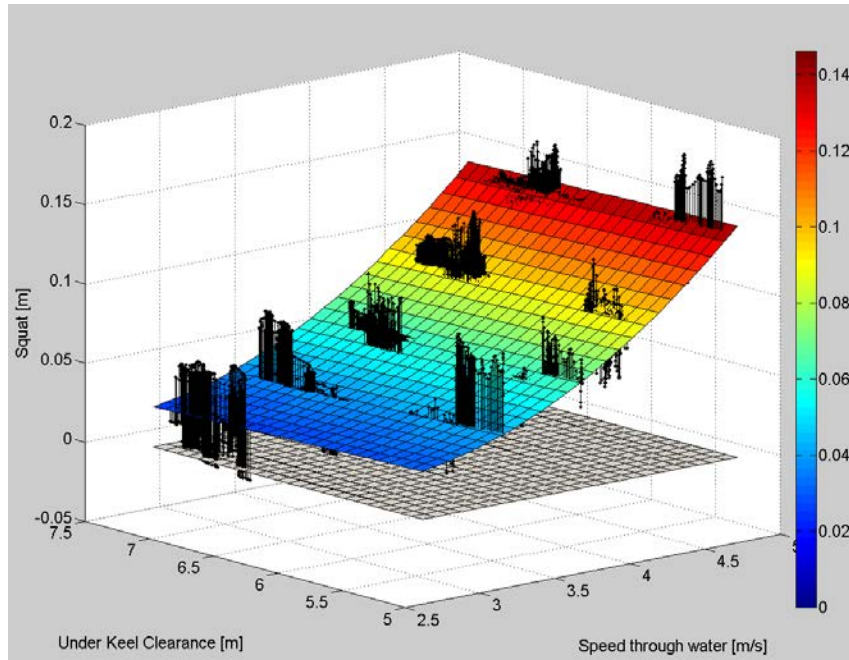
Wasserspiegellagenberechnungen SOBEK-Modell Rhein (Maxau-Speyer)



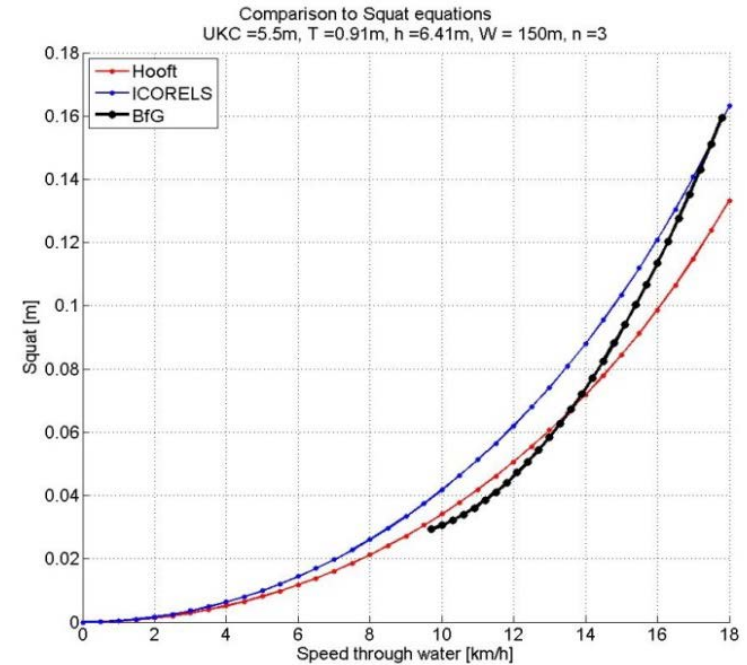
- Die IMU liefert den Abstand zur mittleren Wasseroberfläche (Hub $h\nu$),
- die Höhe des Wasserspiegelmodells $H_{WL,Model}$ wird interpoliert



- Messgleichung:
- $$h\nu_{k+1} = H_{WL,Model,k+1} + \overline{\Delta H}_{WL,Model,k+1} + Load - squat_{k+1} - \overline{U}_{RP,k+1}^{UTM} - \left(\sin \overline{\theta}_{k+1}^{B,LL} \cdot (x_{MP}^B - x_{RP}^B) + \cos \overline{\theta}_{k+1}^{B,LL} \cdot \sin \overline{\varphi}_{k+1}^{B,LL} \cdot (y_{MP}^B - \right.$$



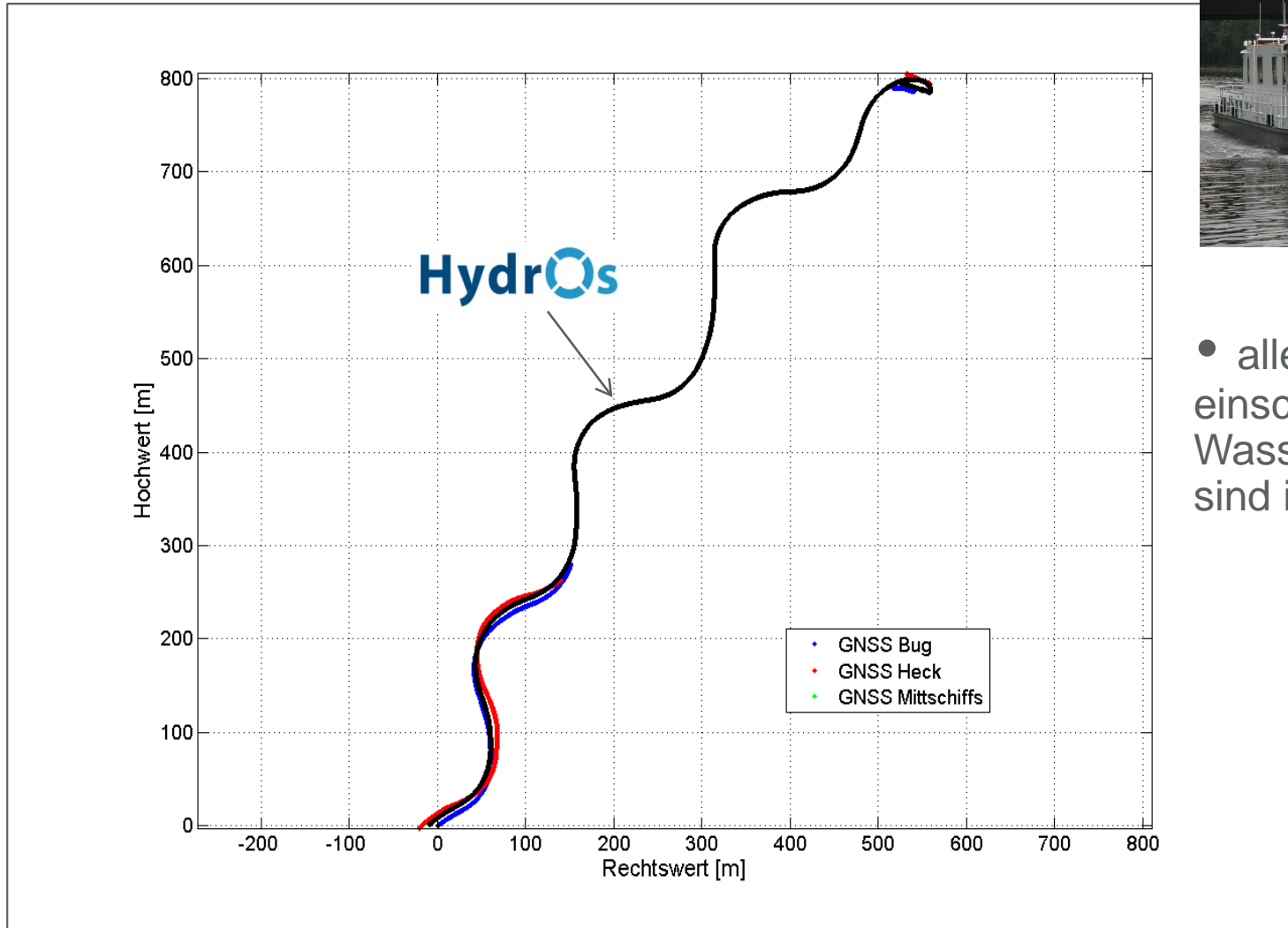
Characteristic model of surveying vessel
“Mercator”



Comparison: Equations of Hooft resp. ICORELS
and “Mercator” model

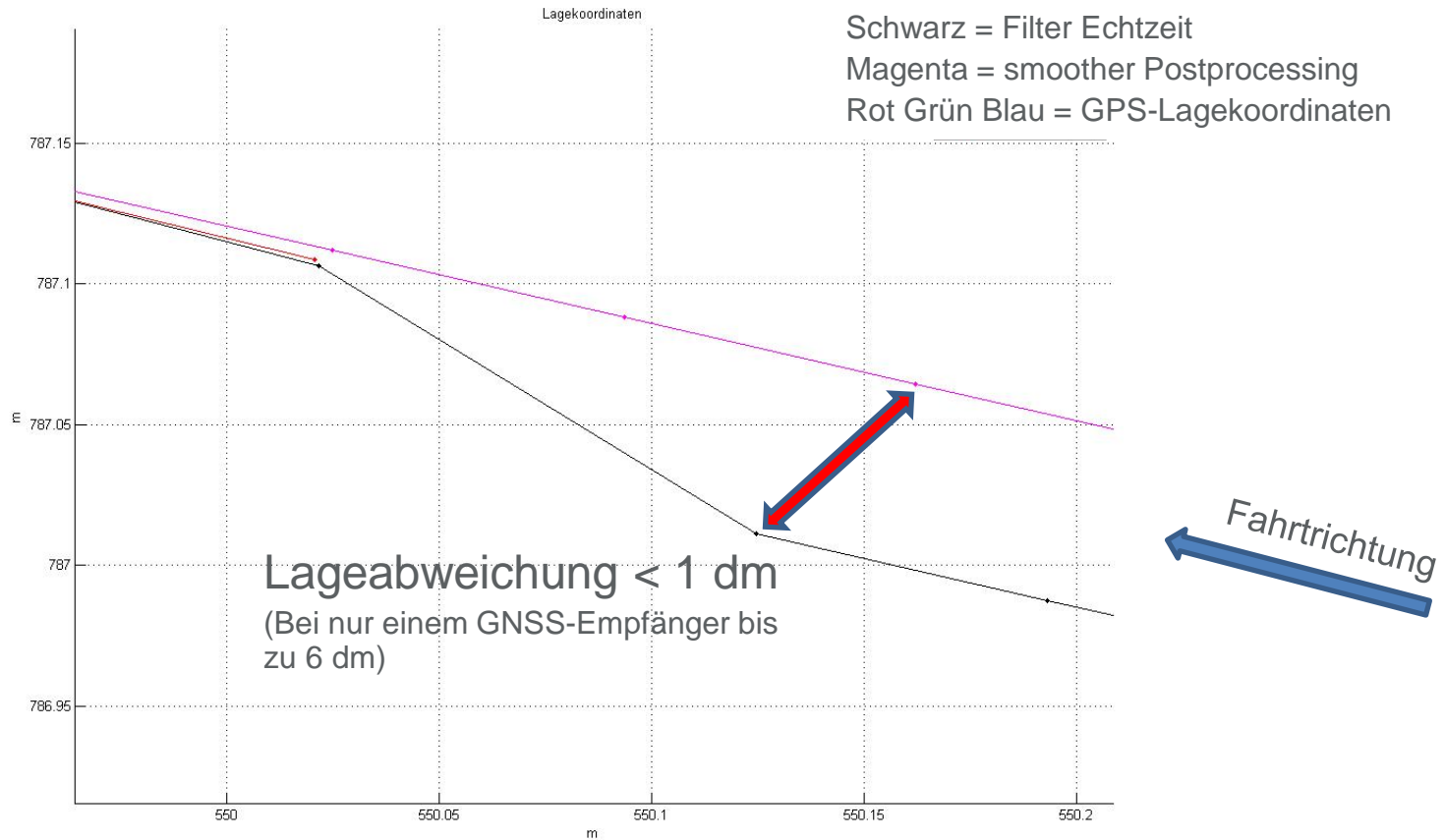
$$squat_i = a \cdot v_{rel,i} + b \cdot h_{ukc,i} + c \cdot v_{rel,i}^2$$

FILTERPERFORMANCE HORIZONTAL POSITION



- alle Sensoren einschließlich Wasserspiegelmodell sind integriert

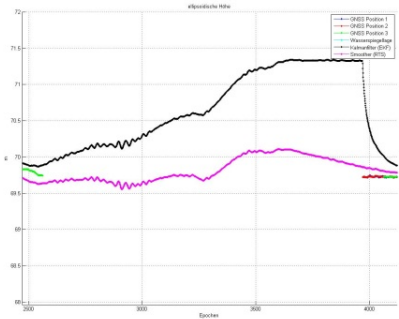
FILTERPERFORMANCE HORIZONTALE POSITION



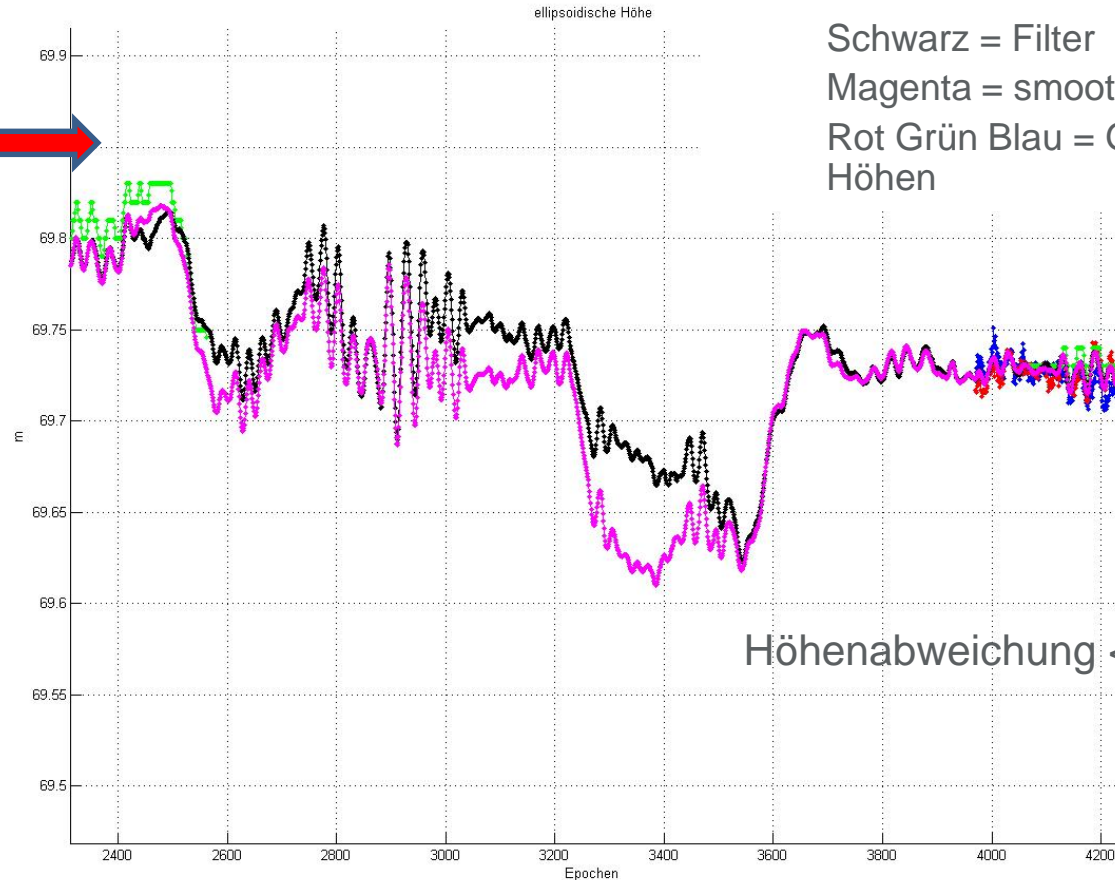
Lücke 2 Min mit Hubsensor und Squat und hydrodynamischem Model

VERBESSERUNG HÖHEN MIT WASSERSPIEGELMODELL

Lücke 2 Min nur mit GNSS/INS-Kopplung



Höhenabweichung 0,5m

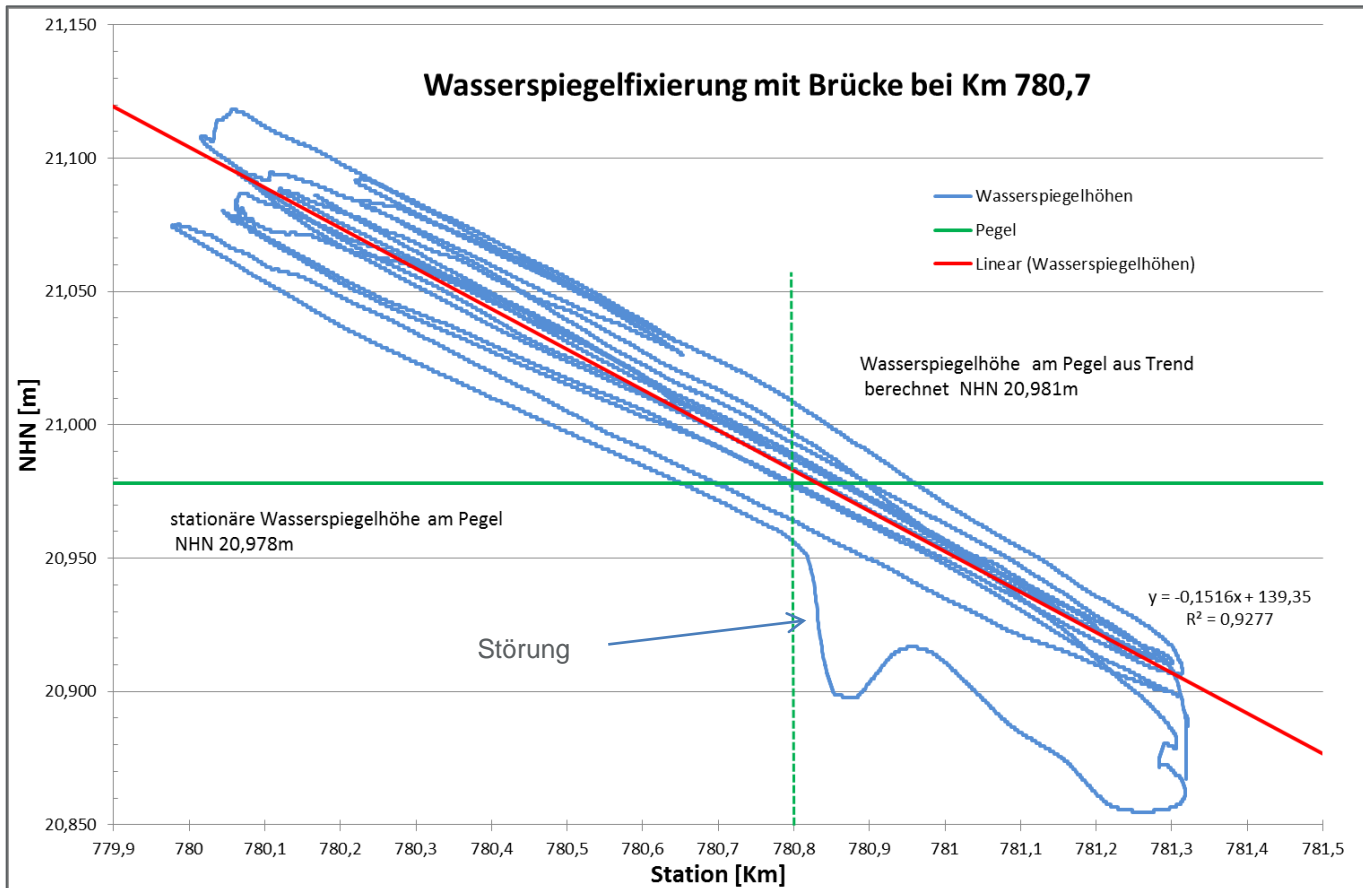


Schwarz = Filter
Magenta = smoother
Rot Grün Blau = GPS-Höhen

Höhenabweichung < 0,02m

Lücke 2 Min mit Hubsensor und Squat und hydrodynamischem Modell

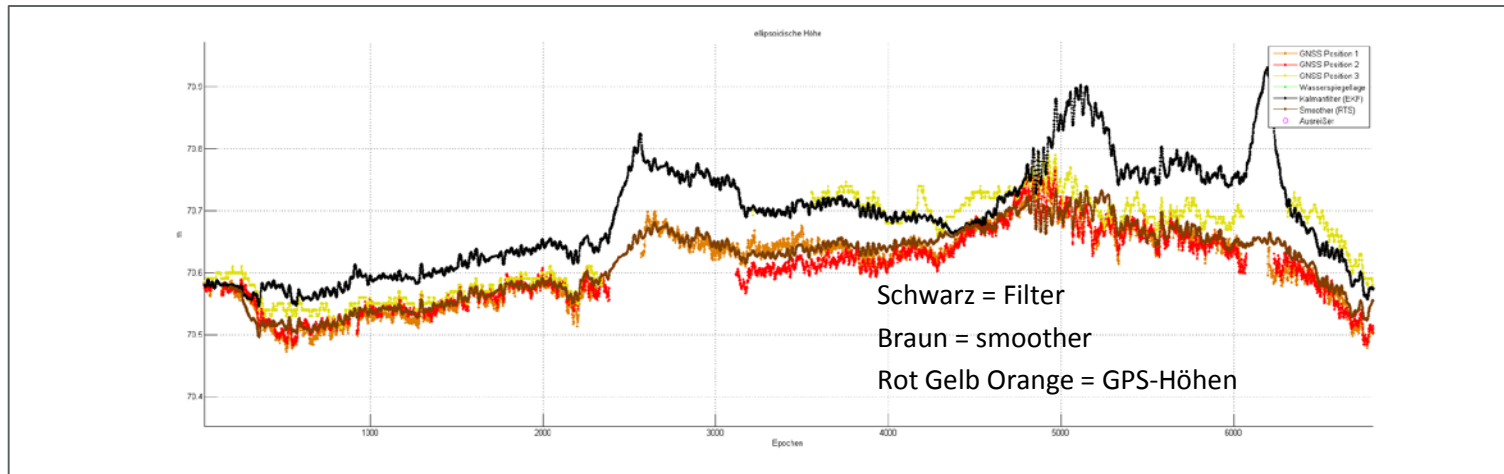
ERGEBNISSE WASSERSPIEGELFIXIERUNG



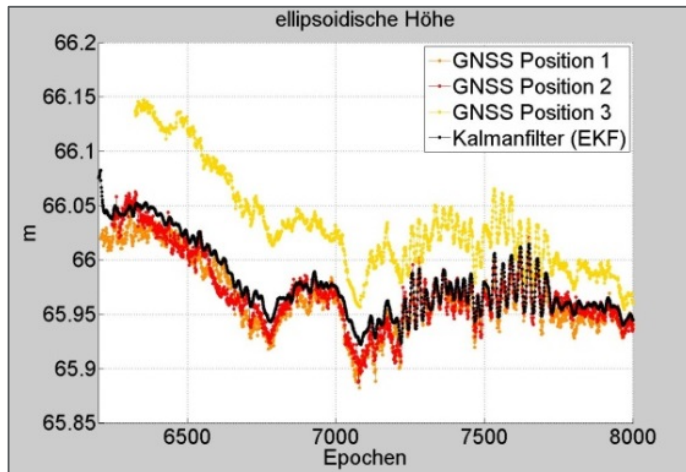
- Rote Linie = Regressionsgerade
- Abweichung am Pegel: 0,3 cm
- Querneigung des Flusses nicht berücksichtigt=> 2cm Abweichung vom Mittel möglich

1. Bestandteile eines hydrographischen Vermessungssystems
2. Sensorfusion
3. Systemkonzept hydrographisches Positionierungssystem
4. **Verbesserung der Filterperformance**
 - Filtertuning mit statistischen Methoden
 - Qualitätskontrolle
 - Adaptive Filterung
5. Fazit und Ausblick

Falsche
stochastische
Vorinformation
=>
Abweichungen
von mehreren dm

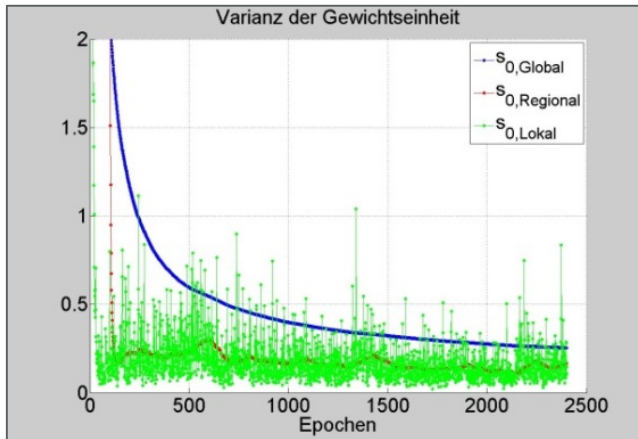


Zutreffende
stochastische
Vorinformation

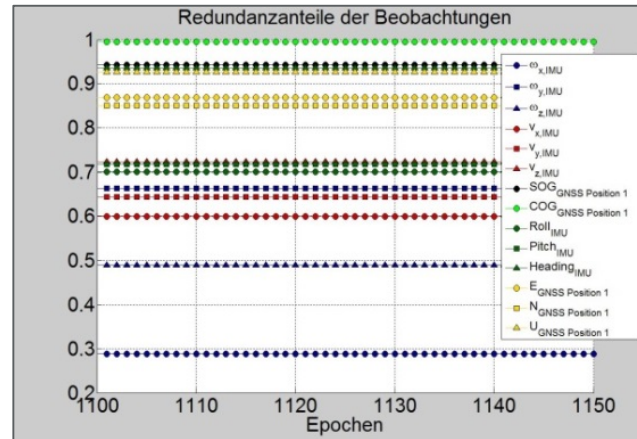


- Start mit Herstellerangaben der Varianzen
- Im EKF Schätzung von Varianzfaktoren für
 - Beobachtungen
 - Störgrößen
 - Zustandsvektor

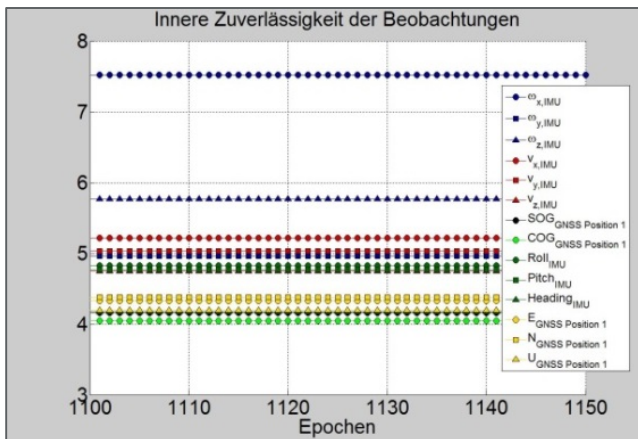
PRÜFUNG DER FILTERABSTIMMUNG



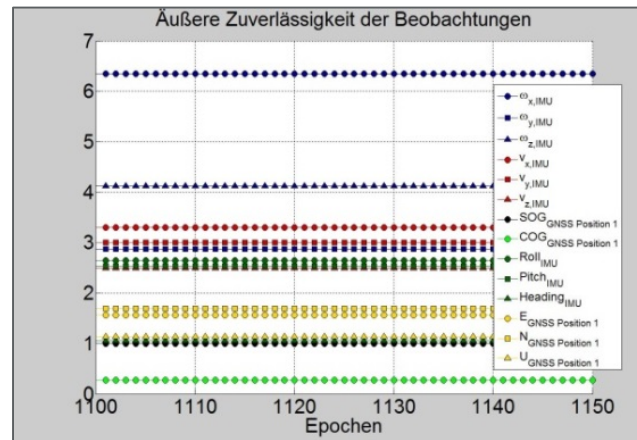
Varianz der Gewichtseinheit ≤ 1



Redundanzanteile der Beobachtungen 0,3 - 1



Innere Zuverlässigkeit $\sim 4 - 5$

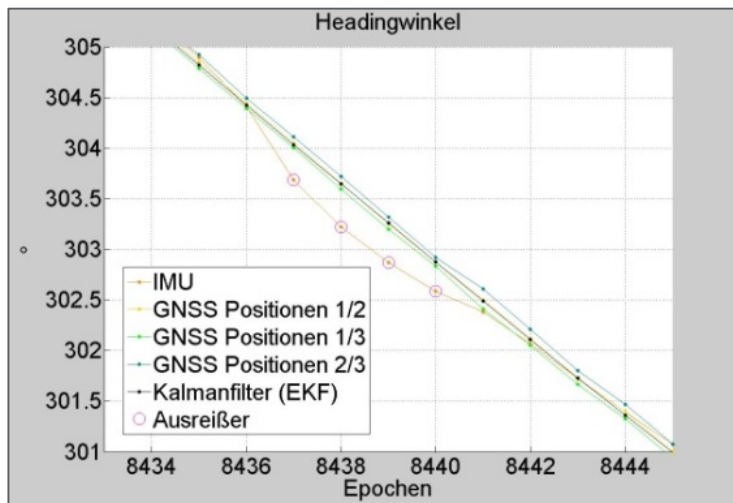


Äußere Zuverlässigkeit $\sim < 4$

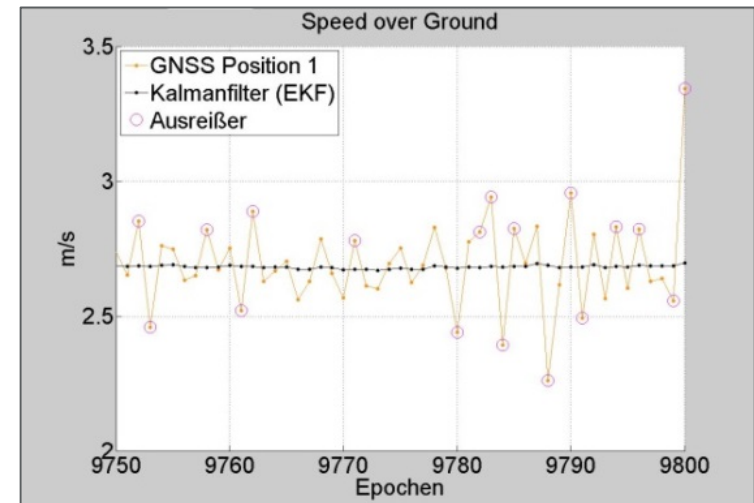
Prüfung der Eingangsgrößen:

Zustandsvektor $\hat{\mathbf{x}}_k$, Stellgrößenvektor \mathbf{u}_k , Störgrößenvektor \mathbf{w}_k , sowie Beobachtungsvektor \mathbf{l}_{k+1} auf Ausreißer in jeder Epoche:

1. Gestörtes Modell? Hypothesentest der Varianz der Gewichtseinheit
2. Suche nach dem größten Ausreißer (Testgröße $T = \frac{v_{g_i,k}}{\sigma_{v_{g_i,k}}} \sim N(\alpha_0, 0,1)$)
3. Anpassen der Kovarianzmatrix der Beobachtungen (Herabgewichten)
4. Neu-Berechnen der Epoche, weiter mit 1



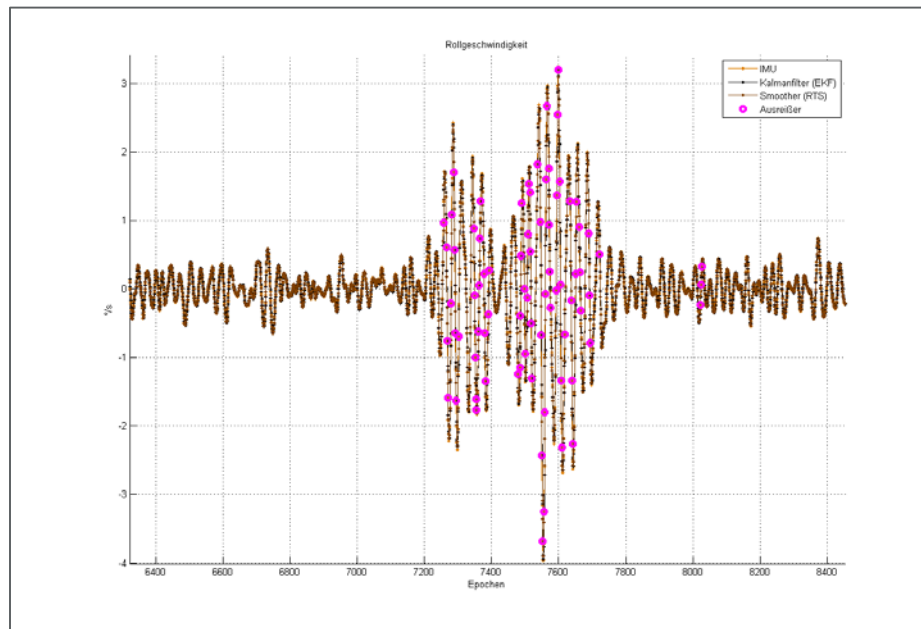
Vergleich Azimut aus verschiedenen Sensoren und EKF



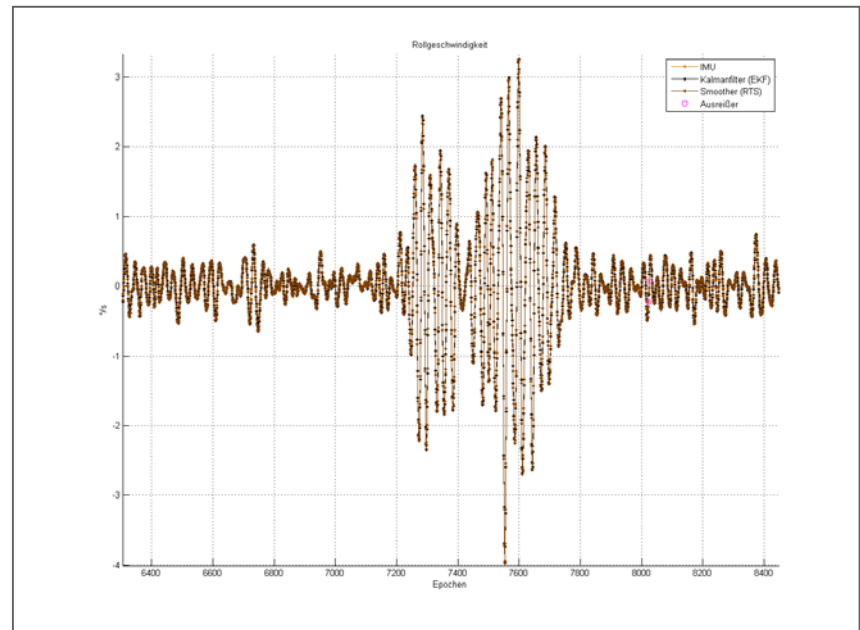
Ergebnis Ausreißersuche bei GNSS-SOG-Messung

Adaptive Filterung

- Entweder Prozessrauschen oder Messrauschen variieren
 1. Geschätzte Varianzen des Prozessrauschens werden mit wählbarer Korrelationslänge gefiltert
 2. Prozessrauschen wird angepasst, wenn a-priori-Wert überschritten wird.



Ausreißersuche Rollwinkel ohne adaptive Filterung



Ausreißersuche mit adaptiver Filterung

1. Bestandteile eines hydrographischen Vermessungssystems
2. Sensorfusion
3. Systemkonzept hydrographisches Positionierungssystem
4. Verbesserung der Filterperformance
- 5. Fazit und Ausblick**

- Genauigkeit in Lage von 30 cm und Höhe 10 cm ist erreichbar (Messunsicherheit mit 95% Wahrscheinlichkeit, nach 60 Sek Lücke)
- Wasserspiegelfixierung mit voller Fahrt: Rhein in $\frac{1}{4}$ der Zeit
- Ausblick
 - Integration von Kamera, Fächerlot und Laserscanner für terrain positioning, bzw. SLAM
 - High-End IMU durch Kombination mehrerer Low-Cost-IMU's ersetzen/ergänzen?

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit
