

Navigation Vehicle Location System VLS

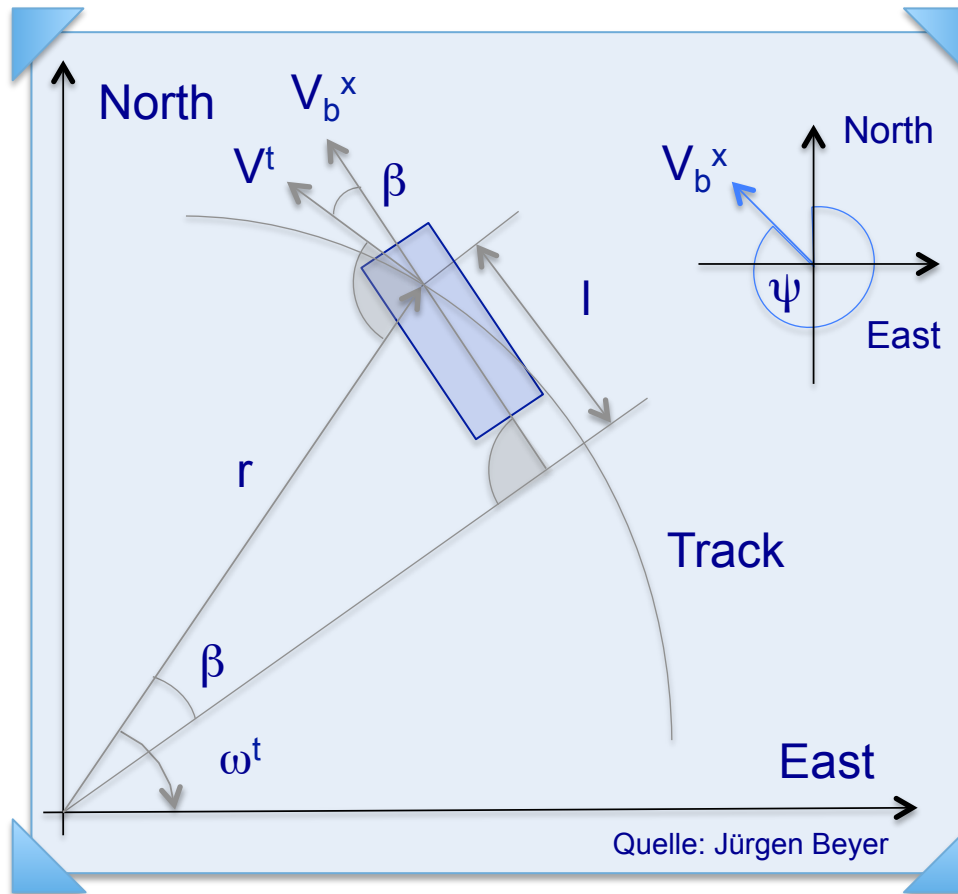
Bewegungsmodell basiertes
und flexibel konfigurierbares
Hybrid-Navigationskonzept
für Landfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer

5 Vehicle Location System VLS

- Grundlagen und Überblick**
- Konzept und Besonderheit des Ansatzes**
- Fiktive und reale Sensorsignale**
- Vergleich von Konfigurationsbeispielen**
- Einbindung der Kundenanforderungen**
- Simulationsbeispiel und Diskussion**

Zweidimensionales Bewegungsmodell für Landfahrzeuge



South pointing chariot
China, 200-265 C.E.



Ancient Greek odometer
Vitruvius, 27-23 B.C.

- Die im Track-KS bestimmte Fahrzeuggeschwindigkeit V^t steht immer senkrecht auf dem Ortsvektor r . Der Winkel β bezeichnet die Verdrehung des Track-KS gegenüber dem körperfesten Koordinatensystem (Body-KS) des Fahrzeuges. Die zugrunde liegende Drehrate ω^b wird im Body-KS, also an Bord des Fahrzeuges gemessen. Man kann in bestimmten Fällen von der vereinfachenden Annahme ausgehen, dass ω^b mit der Drehrate ω^t des Ortsvektors r und mit der Drehrate ω^n im Navigations-Koordinatensystem (Nav-KS) identisch ist. Der Steuerkurswinkel ψ zwischen dem Nav-KS und dem Body-KS zeigt die gesuchte Ausrichtung des Fahrzeuges gegenüber Norden an
- Die Geschwindigkeitstransformation vom Body-KS in das Nav-KS erfolgt im zweidimensionalen Fall unter alleiniger Verwendung des Steuerkurswinkels und wird beschrieben durch die Gleichung

$$\begin{bmatrix} V_x^n \\ V_y^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x^b \\ V_y^b \end{bmatrix}$$

- Liegt die Fahrzeuggeschwindigkeit bereits im Body-KS vor, so genügt diese Gleichung zur Bestimmung der gesuchten Positionsänderungen
- Erfolgt die Messung der Fahrzeuggeschwindigkeit dagegen im Track-KS, so wird zunächst eine Transformation in das Body-KS erforderlich

$$\begin{bmatrix} V_x^b \\ V_y^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{bmatrix} V^t$$

- Durch Einsetzen ergibt sich die direkte Transformation der Geschwindigkeit vom Track-KS in das Nav-KS

$$\begin{bmatrix} V_x^n \\ V_y^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \beta - \sin \psi \sin \beta \\ \sin \psi \cos \beta + \cos \psi \sin \beta \end{bmatrix} V^t \Rightarrow \begin{bmatrix} V_x^n \\ V_y^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi + \beta) \\ \sin(\psi + \beta) \end{bmatrix} V^t$$

- Der Winkel β bleibt noch zu bestimmen

- Aufgrund der Gleichung

$$V^t = r \cdot \omega^t$$

- und der geometrisch ableitbaren Beziehung

$$\sin \beta = \frac{l}{r}$$

- folgt durch Einsetzen und Umformen

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{l}{V^t} \omega^t \right) \approx \frac{l}{V^t} \omega^t \approx \frac{l}{V^t} \omega^b$$

- Der Parameter l ist konstant und entspricht ungefähr der Fahrzeuglänge
- Die Geschwindigkeit V^n im Nav-KS ist von der Geschwindigkeit V^t im Track-KS, der im Body-KS gemessenen Drehrate ω^b , dem Steuerkurswinkel ψ und dem Fahrzeugparameter l abhängig

- Die Initialisierung des Breitengrades B_0 und des Längengrades L_0 sowie die Vorgabe des Anfangs-Steuerkurswinkels ψ_0 wird zum Start benötigt
- Die Breitengradberechnung lautet

$$B(t) = B_0 + \int \frac{V_x^n}{R_{Erde}} dt$$

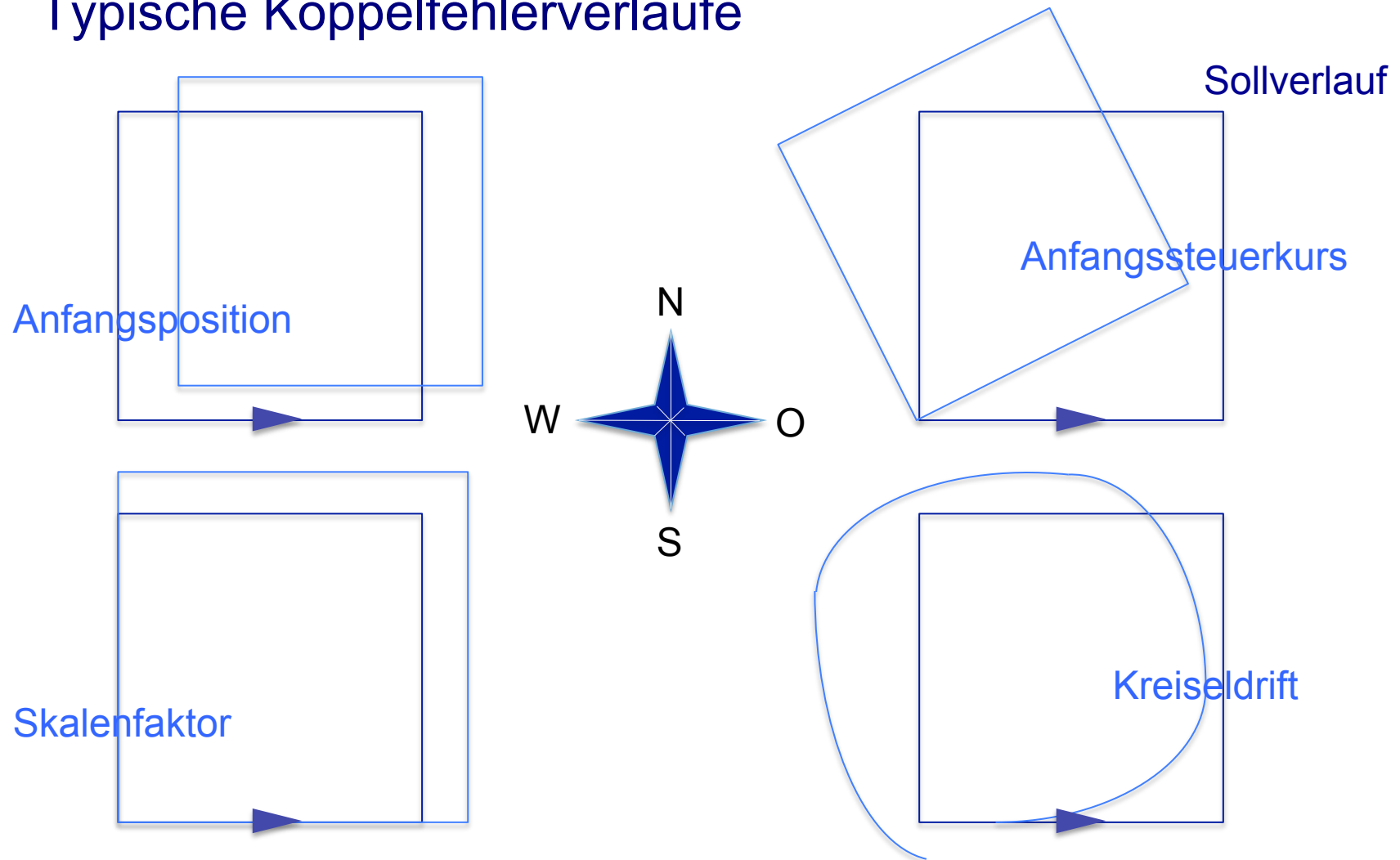
- Für die Längengradberechnung gilt

$$L(t) = L_0 + \int \frac{V_y^n}{R_{Erde} \cos B} dt$$

- Der Steuerkurswinkel wird bestimmt durch

$$\psi(t) = \psi_0 + \int \omega^b dt$$

- Typische Koppelfehlerverläufe



Vollständige Euler_dot Berechnung

$$rol_dot = \omega_x^b + \left[\sin(rol) \cdot \omega_y^b + \cos(rol) \cdot \omega_z^b \right] \cdot \tan(pit)$$

$$pit_dot = \cos(rol) \cdot \omega_y^b - \sin(rol) \cdot \omega_z^b$$

$$azi_dot = \left[\sin(rol) \cdot \omega_y^b + \cos(rol) \cdot \omega_z^b \right] / \cos(pit)$$

Azimut Approximationen:

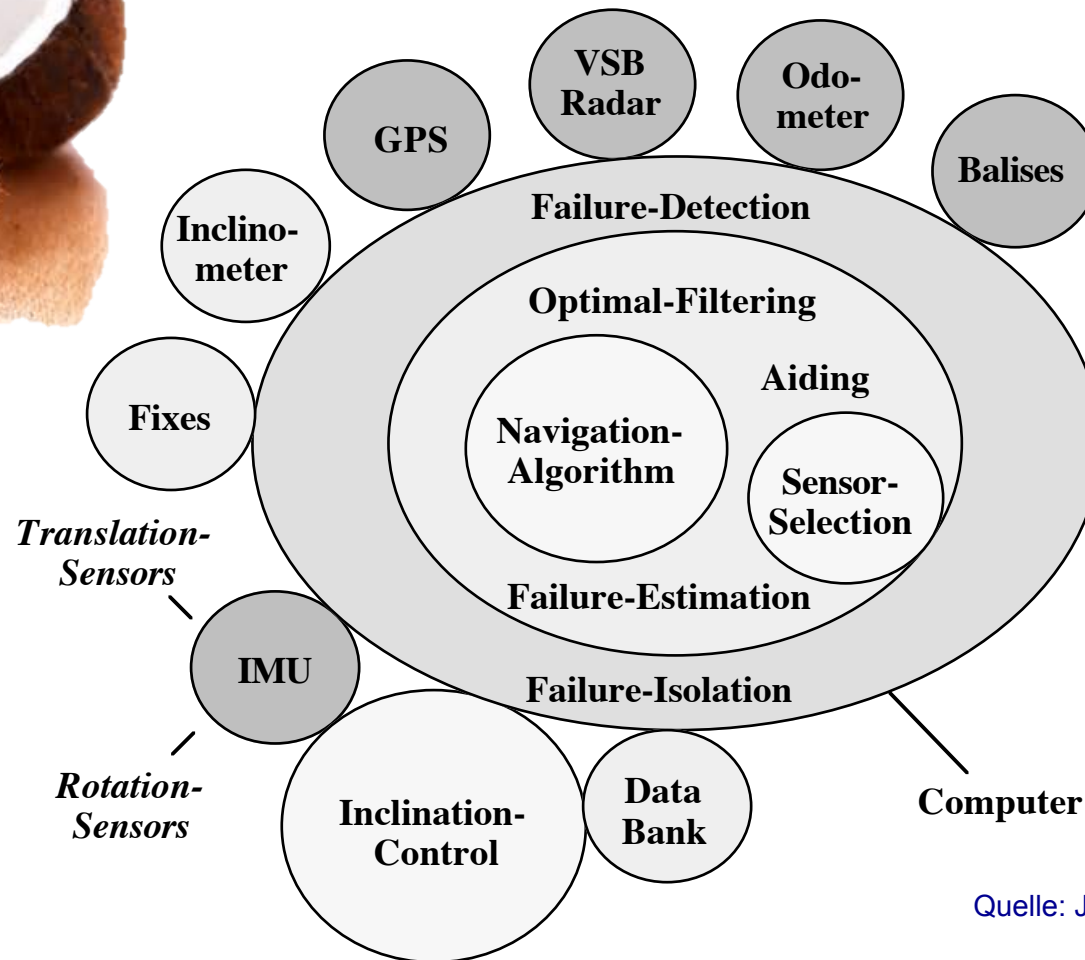
$$azi_dot = \left[\sin(rol) \cdot pit_dot + \omega_z^b \right] / \cos(pit) / \cos(rol)$$

$$azi_dot \approx \omega_z^b$$

- Flexible Navigation Platform
 - Adaptable to mission related requirements
 - dependability (reliability, availability, continuity, integrity)
 - adequate precision (along momentary and planned path)
 - flexibility with respect to fault tolerance and/or precision
 - Cost/Benefit related requirements
 - figure out the most cost effective solution to meet the specification
 - facilitate navigation platform upgrade opportunity via changing the sensor configuration and/or adding new sensor(s)
 - provide “sensor plug-in and run” filter software package (no time consuming adaption and test of filter parameter)
 - Approach in consequence
 - create an adaptable/flexible system due to mission requirements
 - use an equally ranked and free configurable set of sensors

Konzept und Besonderheit des Ansatzes

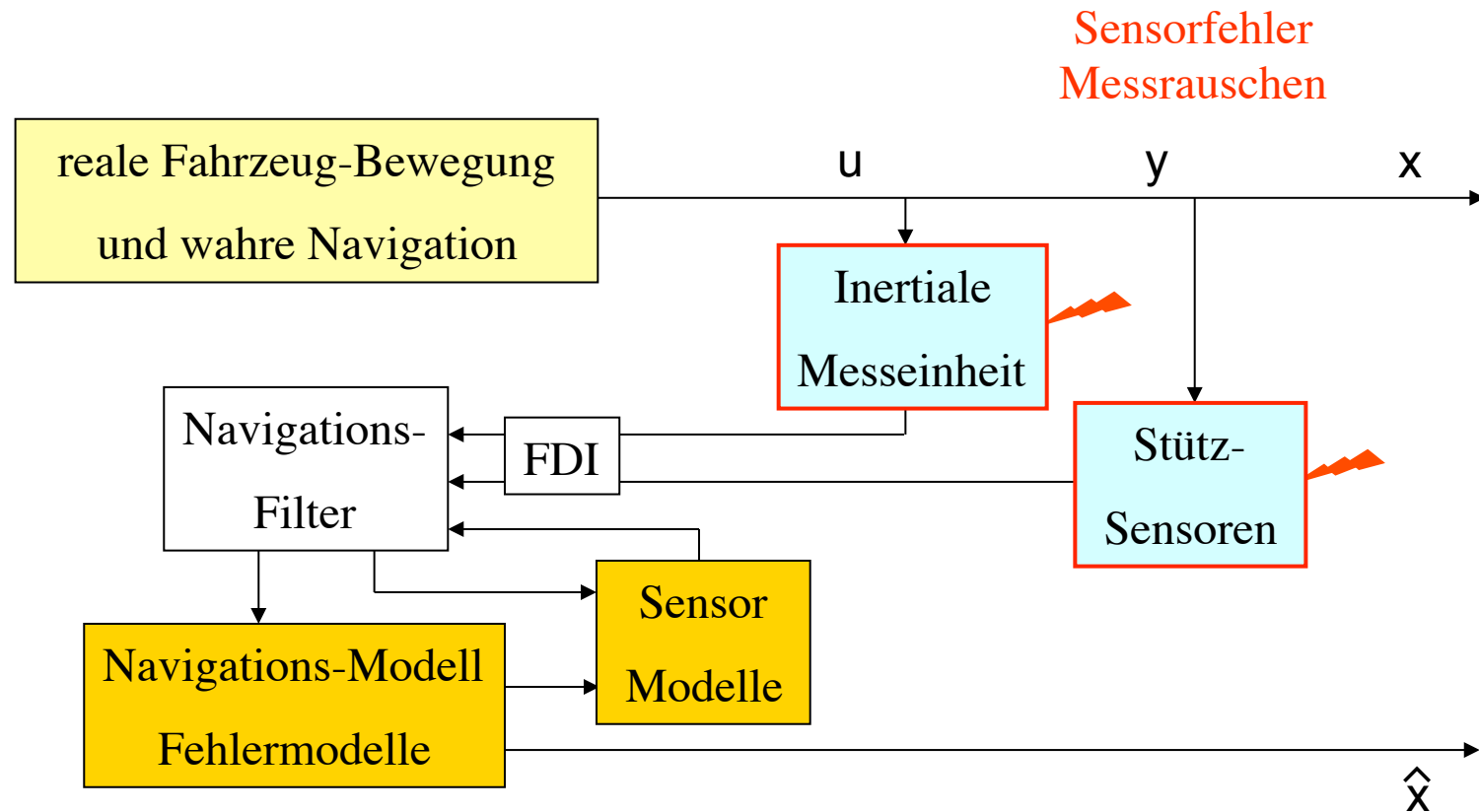
Flexible Navigation Platform



Quelle: Jürgen Beyer

- Multiplex Failure Detection and Isolation (FDI)
 - Sensor hardware built-in test
 - Sensor signal plausibility check
 - continuity of trajectory; physically limits
 - Sensor signal cross monitoring
 - direct signal comparison
 - Take advantage of analytical redundancy
 - dominant sensor/system error estimation
 - mean value and error covariance observation
 - sensor versus fictive-sensor residual monitoring
 - consider observability and attachability of failures
 - Management and Moding
 - Centralized Sensor Error Classification
 - User dependent Model Configuration

Mathematischer Navigations-Monitor



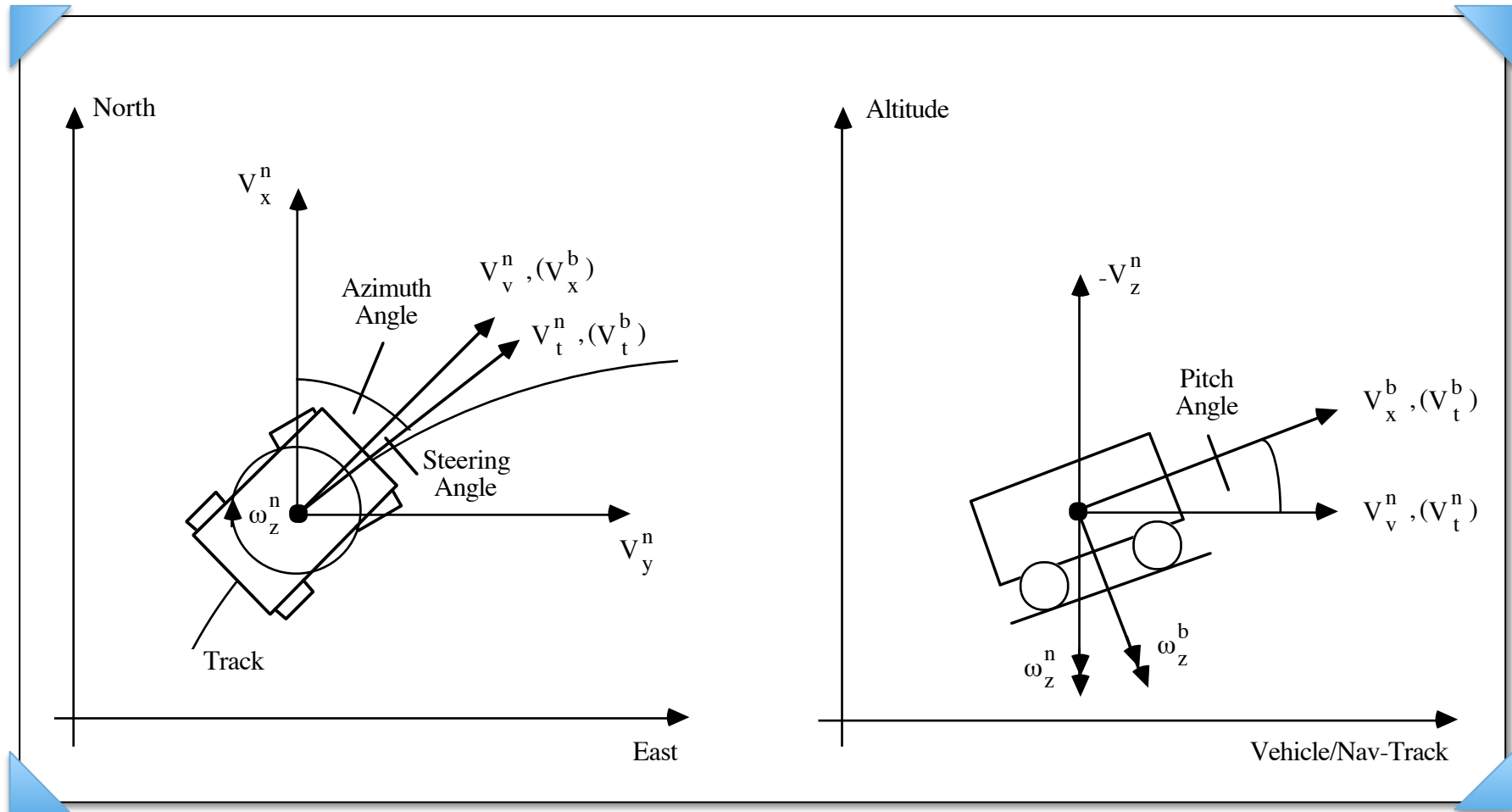
Quelle: Jürgen Beyer

Konzept und Besonderheit des Ansatzes

- Der Vorteil des Vehicle Location Systems VLS liegt in seinem mit dem theoretischen Ansatz des Kalmanfilters übereinstimmenden Modellansatz. Hierdurch wird eine strikte Trennung zwischen der Modellwelt, also dem Filteralgorithmus selbst und der Sensorwirklichkeit realisiert.
- In Konsequenz lassen sich dadurch bessere Filterergebnisse realisieren. Dies liegt u.a. daran, dass alle fiktiven Sensorsignale aus einer gemeinsamen besten Lösung, den im Filter mitgeschätzten Zuständen, gewonnen werden und auch alle Residuen über eine optimale Filterverstärkung auf diese eine gemeinsame Lösung aufgebracht werden. Durch die Gewichtung mit der optimalen Verstärkungsmatrix des Filters wird ein direktes Einwirken des Sensorrauschens auf die geschätzten Zustände beim VLS unterbunden.
- Da alle Sensordaten, also auch die Beschleunigungen und Drehraten, in der Beschreibung ihrer Streuung ausschließlich über die Kovarianzmatrix R berücksichtigt werden, wird der Filterentwurf erheblich vereinfacht. Die sonst notwendige intuitive Bestimmung der Elemente der Q -Matrix zur Beschreibung dieses Sensorrauschens entfällt vollständig. Hierüber wird der Vergleich unterschiedlichster Sensorkonfigurationen ermöglicht, ohne den Filteralgorithmus oder die Filterparameter zu ändern.

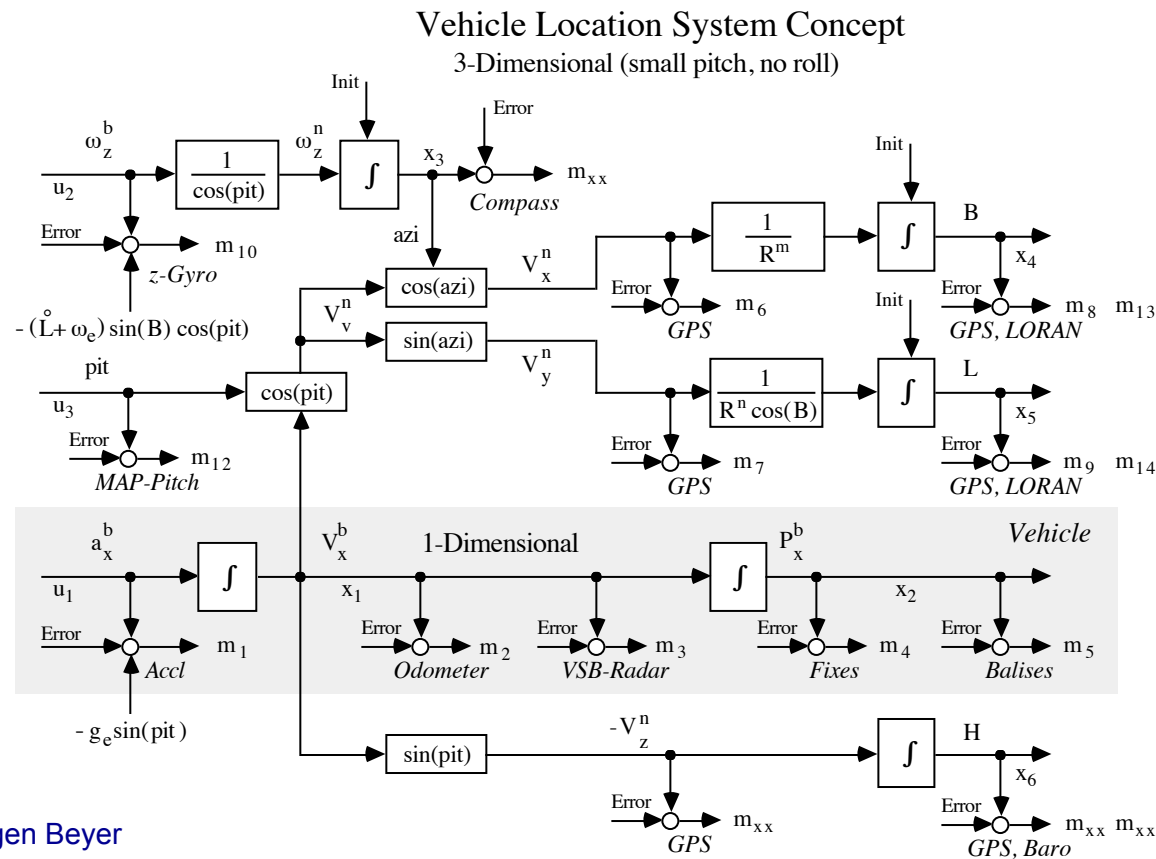
Konzept und Besonderheit des Ansatzes

Verwendete Koordinatensysteme



- Aufbau eines Bewegungsmodells
 - Ein-dimensionales Modell mit doppelter Integration
 - Bestandteile: Beschleunigung, Geschwindigkeit, Wegstrecke
 - Erweiterung durch Modellierung des Nickwinkels (pit)
 - Bestandteile: Vertikalgeschwindigkeit, Höhe
 - Zwei-dimensionales Modell durch Kurswinkel (azi)
 - Bestandteile: Nord-/Ostgeschwindigkeit, Breite, Länge
- Modellierung fiktiver determinierter Sensorsignale
 - Übernahme der relevanten Daten des Bewegungsmodells
 - Aufbringen charakteristischer determinierter Sensorfehler
- Erzeugung realistischer Sensorsignale (Simulation)
 - Den Bewegungsdaten werden die determinierten Sensorsignale sowie stochastische Anteile überlagert

Grund-Idee des Vehicle Location Systems



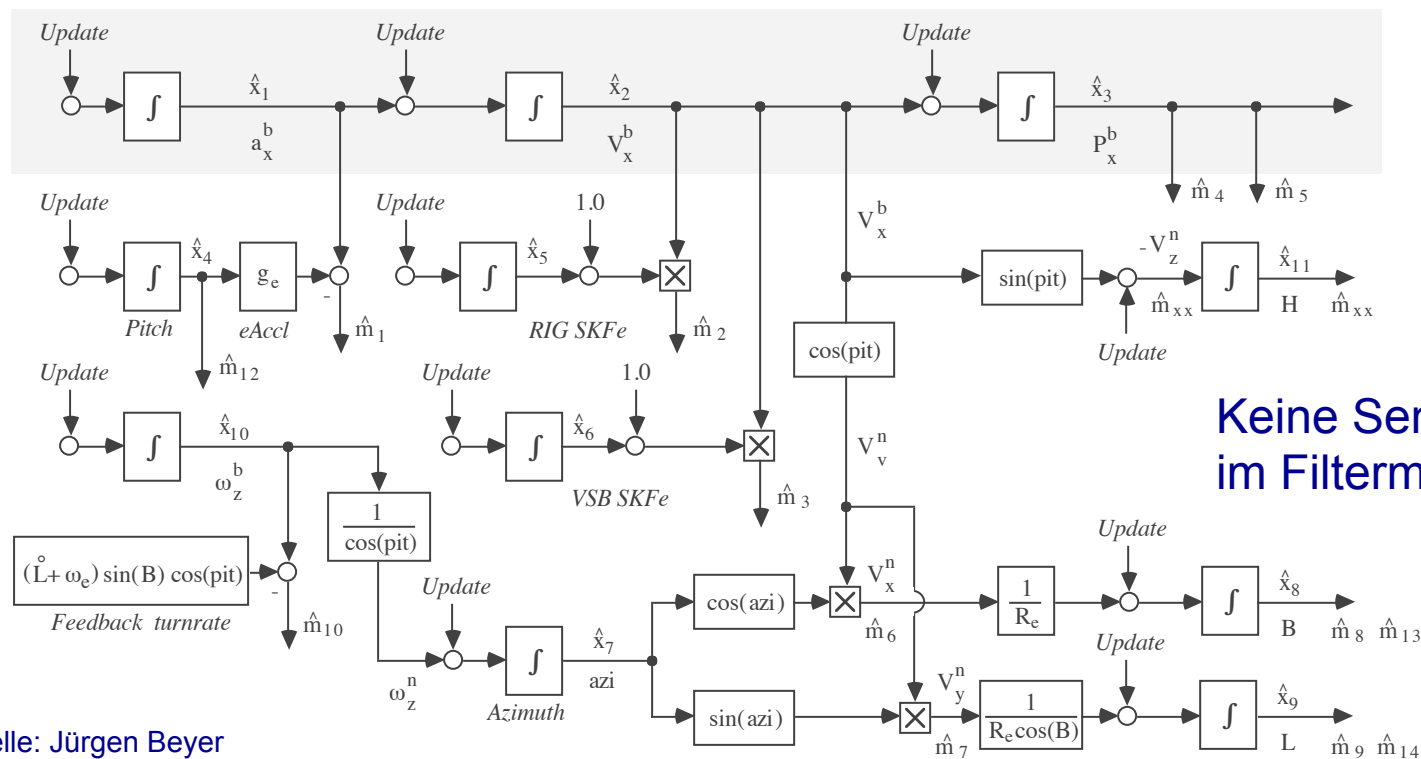
Quelle: Jürgen Beyer

File: VLS_Concept

erstellt am: 06.08.1996 By
Update am: 02.02.1997 By

Filter-Konzept des Vehicle Location Systems

Vehicle Location System Filter
3-Dimensional (small pitch, no roll)



**Keine Sensoren
im Filtermodell !**

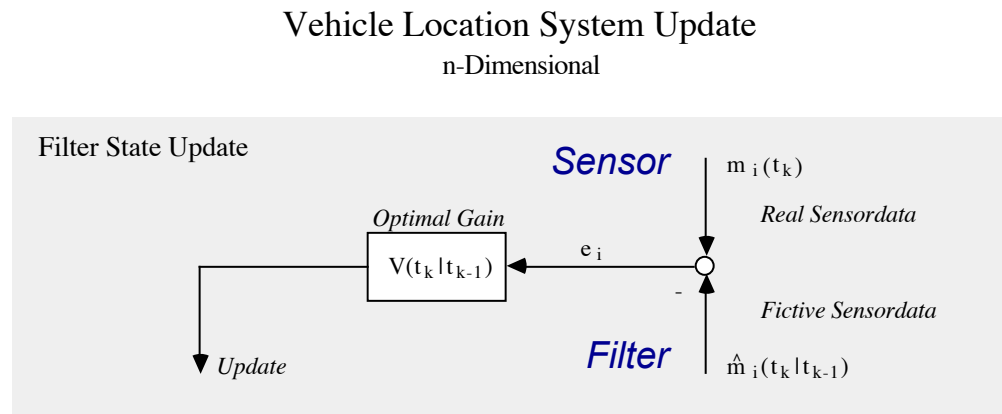
Quelle: Jürgen Beyer

File: VLS_Filter

erstellt am: 30.09.1996 By
Update am: 02.02.1997 By
Update am: 13.11.2000 By

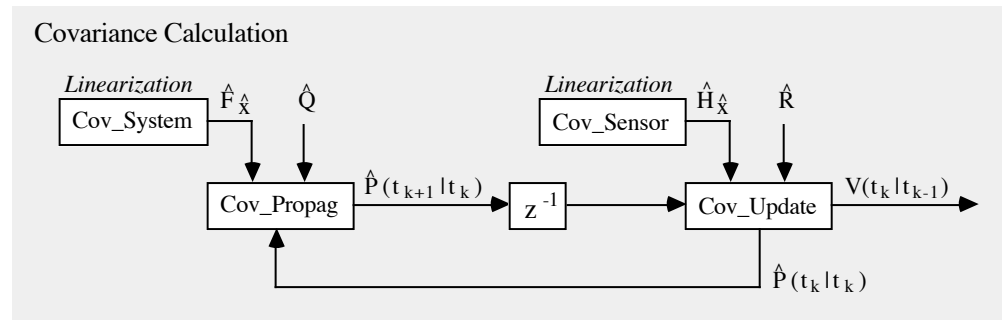
Update-Konzept des Vehicle Location Systems

Korrektur der
Filtermodell-
zustände



Optimale
Auswertung
der Residuen

Quelle: Jürgen Beyer



Kovarianz-
Modell

- Advantage of a Mathematical Navigation Monitor
 - Equally ranked aiding sensor signals
 - Stringent sensor and model separation
 - no sensor noise on analytical platform
 - Sensor independent navigation algorithm
 - system is easy to extend and easy to adapt
 - autonomous navigation computation on board
 - combines all available information
 - provides one consistent navigation-solution
 - Stochastically model interpretation
 - Approach fits to the control theory
 - Straight forward multiplex FDI

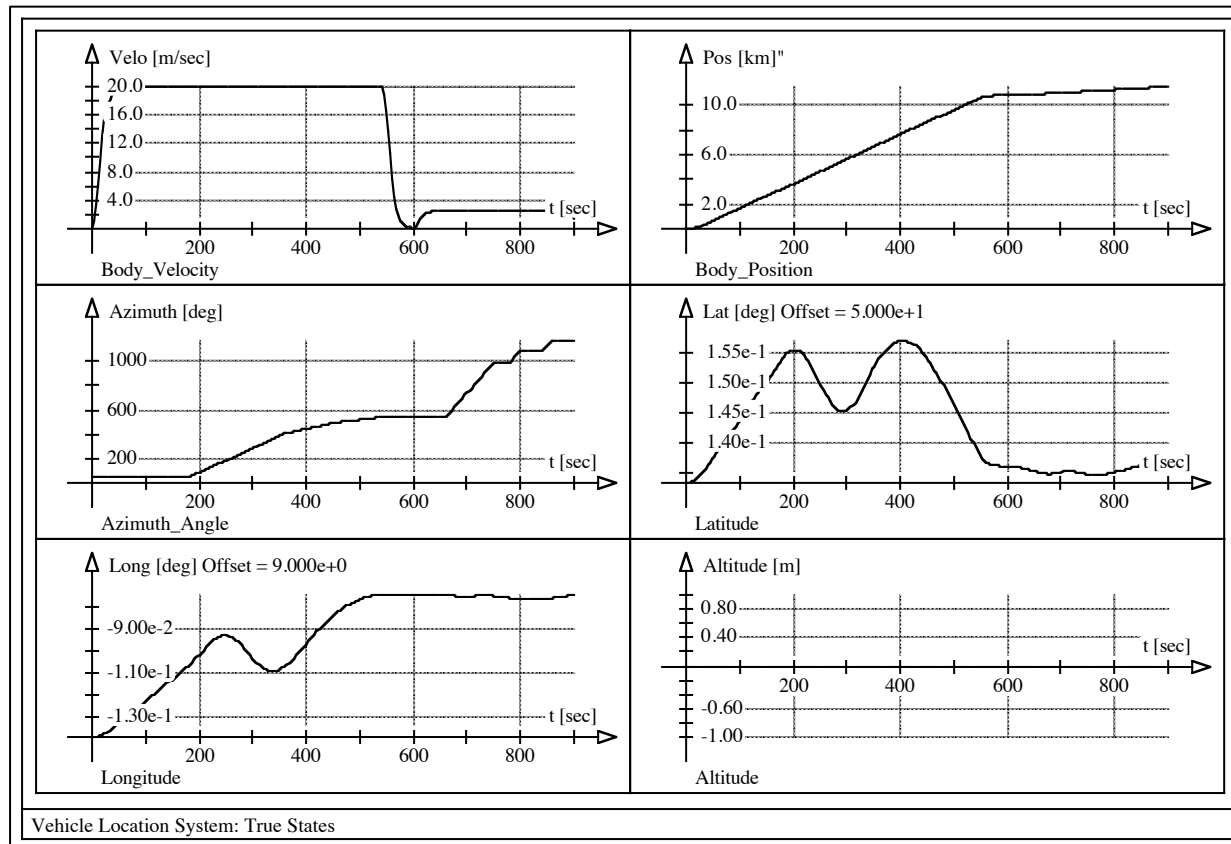
Vergleich von Konfigurationsbeispielen

- Zustandssimulation und Trajektorie
- Simulierter Satz an Sensorsignalen (19 Stück)
 - ACL, RIG, VSB, FIXES, BALISES
 - GPS-Velo(x,y), GPS-Pos(x,y), Gyro, LWS, MAP_pit
 - LORAN(x,y), GPS-Velo(z), GPS-Alt(z), Baro, Hodo-L/R
- Sensorkonfiguration 1
 - ACL und MAP_pit
 - Ein-dimensionales Bewegungsmodell mit Vertikalkanal
- Sensorkonfiguration 2
 - ACL, RIG, GPS-Alt, Gyro, MAP_pit, LORAN
 - Zwei-dimensionales Bewegungsmodell mit Vertikalkanal
 - Fehlertoleranz durch Redundanz der Positionsbestimmung

Vergleich von Konfigurationsbeispielen

VLS Zustandssimulation (Beispiel)

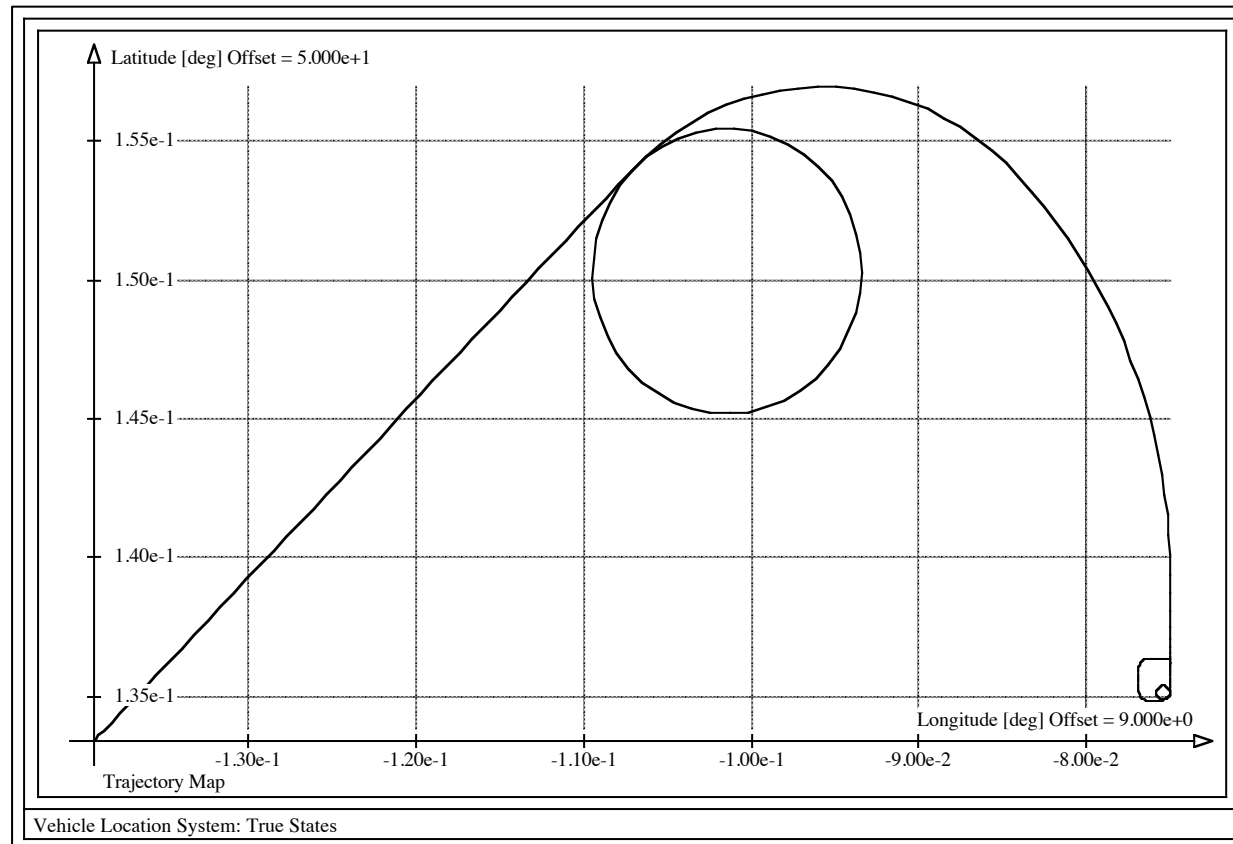
Quelle: Jürgen Beyer



Vergleich von Konfigurationsbeispielen

Simulierte Trajektorie VLS (Beispiel)

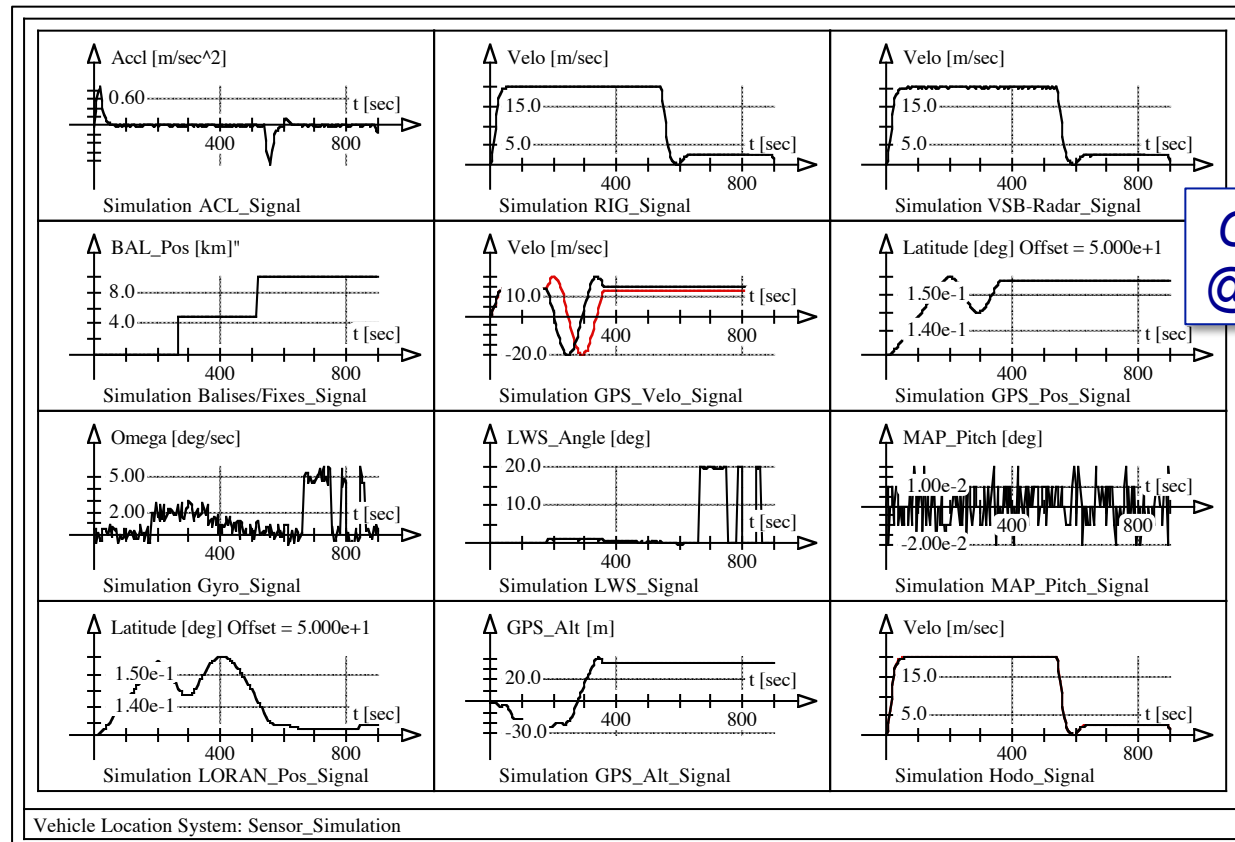
Quelle: Jürgen Beyer



Vergleich von Konfigurationsbeispielen

Simulierte Sensorsignale im Beispiel

Quelle: Jürgen Beyer



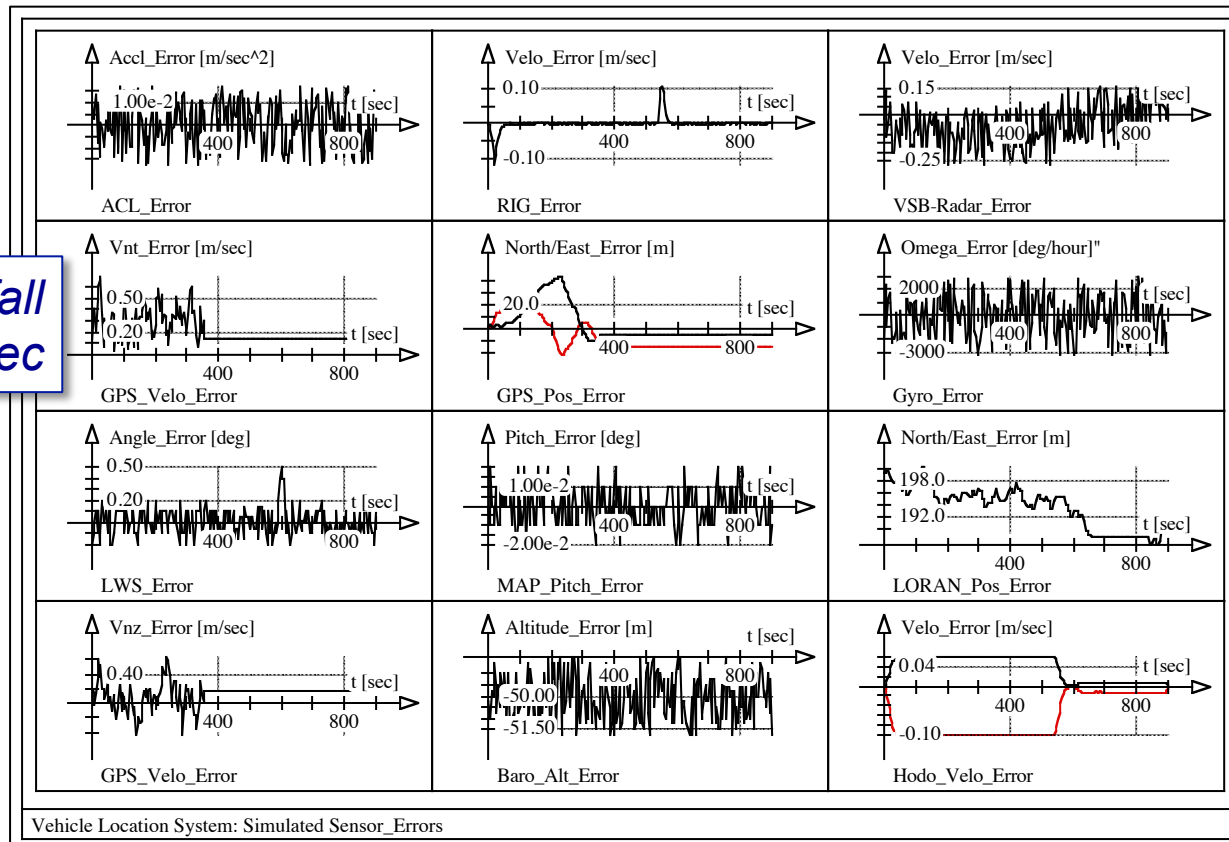
ACL, RIG, VSB, Fixes, Balisen, GPS-Velo, GPS-Pos, Gyro, LWS, MAP_pit, LORAN, GPS-Alt, Hodo-L/R

Vergleich von Konfigurationsbeispielen

Aufgebrachte Sensorfehler im Beispiel

Quelle: Jürgen Beyer

*GPS-Ausfall
@ t=360 sec*

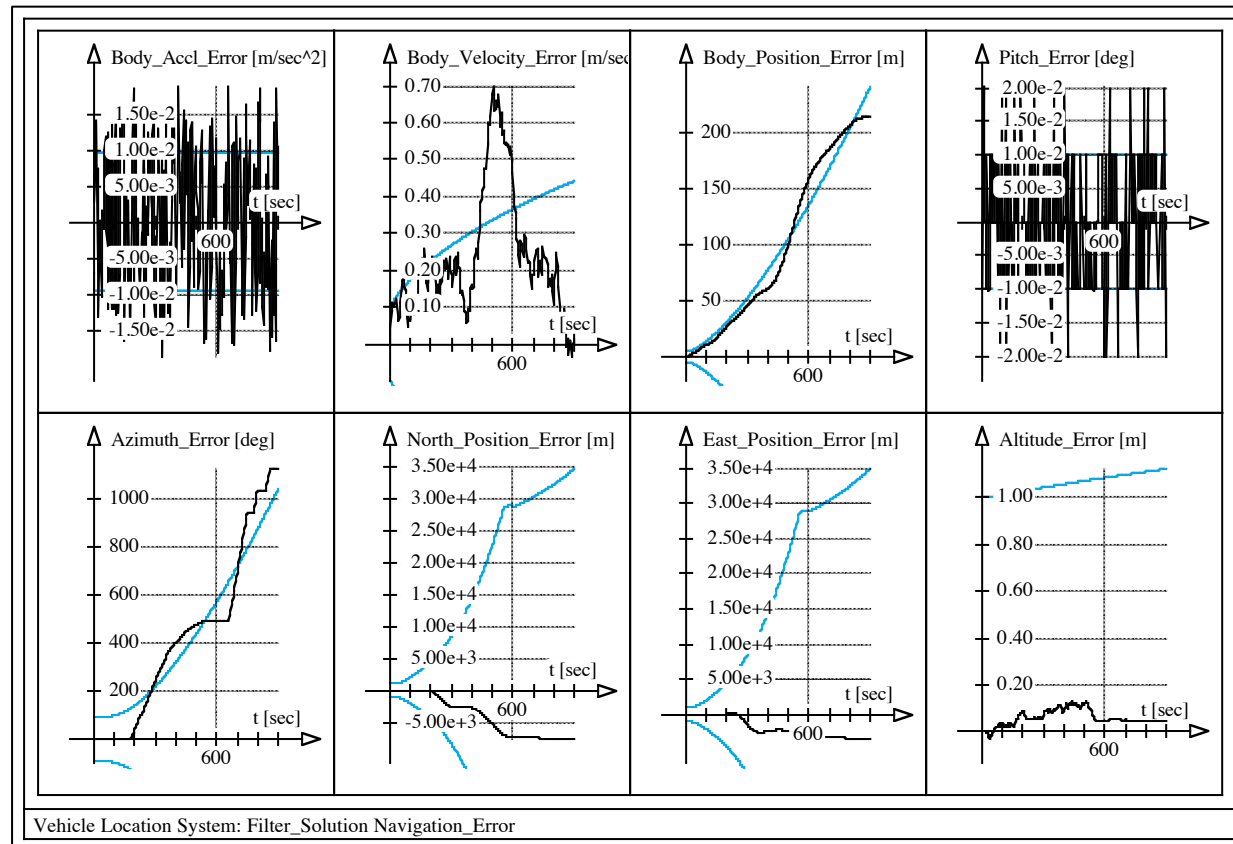


ACL, RIG, VSB, GPS-Velo, GPS-Pos, Gyro, LWS, MAP_pit, LORAN, GPS-Vrt, Baro, Hodo-L/R

Vergleich von Konfigurationsbeispielen

VLS Zustandsschätzfehler und Sigmaverlauf in Filterkonfiguration 1

Quelle: Jürgen Beyer



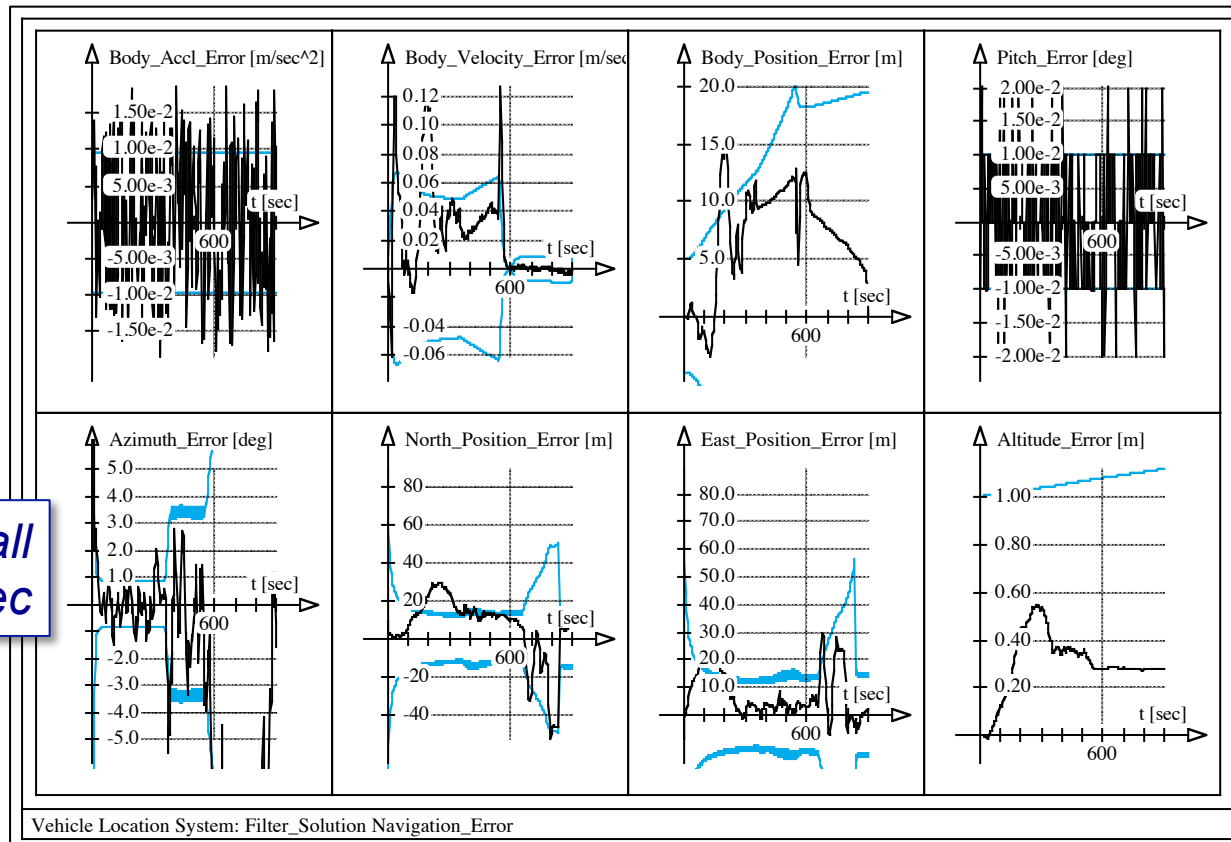
ACL und MAP_pit

Vergleich von Konfigurationsbeispielen

VLS Zustandsschätzfehler und Sigmaverlauf in Filterkonfiguration 2

Quelle: Jürgen Beyer

**GPS-Ausfall
@ t=360 sec**



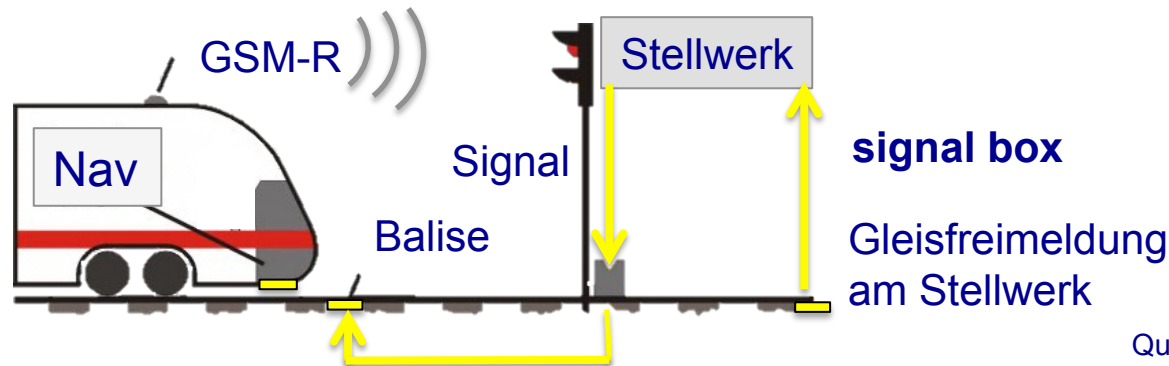
ACL, RIG, GPS, GYR, MAP_pit sowie LORAN

Einbindung der Kundenanforderungen

- Geht man davon aus, dass vermehrt die Definition einer Mission die Anforderungen an ein neues Navigationssystem stellt und nicht mehr, wie bisher, die Mission aus der Qualität des zuvor definierten Navigationssystems abgeleitet wird, so wird der Nutzen des VLS deutlich
- Die sonst übliche kostenintensive Entwicklung und Anpassung des Navigationsalgorithmus und dessen Test entsteht nur noch einmal und lässt sich zudem auf bedeutend mehr Anwendungsfälle, die sich nur noch in der Wahl der jeweiligen Sensor-konfiguration unterscheiden, umlegen
- Darüber hinaus wird der Wartungsaufwand für die Softwareapplikationen gegenüber dem Status quo minimiert
- Letztendlich kann die günstigste Sensorkonfiguration eines Navigationssystems für eine Mission a priori bestimmt und gegenüber dem Auftraggeber auch nachgewiesen werden

- Typische Vorgehensweise
 - Vorgabe technischer Spezifikationen durch den Auftraggeber oder Ausarbeitung technischer Spezifikationen durch die Analyse der gestellten Kundenanforderungen
 - Entwicklung und Demonstration möglicher Konfigurationen und Auslegungen des Navigationssystems (Simulation und Test)
 - Sofern möglich, endgültige Festlegung des Navigationssystems in Abstimmung mit dem Auftraggeber
 - Ziel: Technischer Nachweis des Systems anhand eines Piloten mit anschliessender Abnahme durch den Auftraggeber
- Typische Beispiele
 - Schienenanwendungen (ETCS, ESF und ROS)
 - Airport Fire & Rescue Vehicles
 - Car-Sharing Navigation

- European Train Control System ETCS Level 1
 - Zugsicherung durch Blockabstand (Gleisfreimeldung)
 - „Navigation“ findet in der Infrastruktur statt

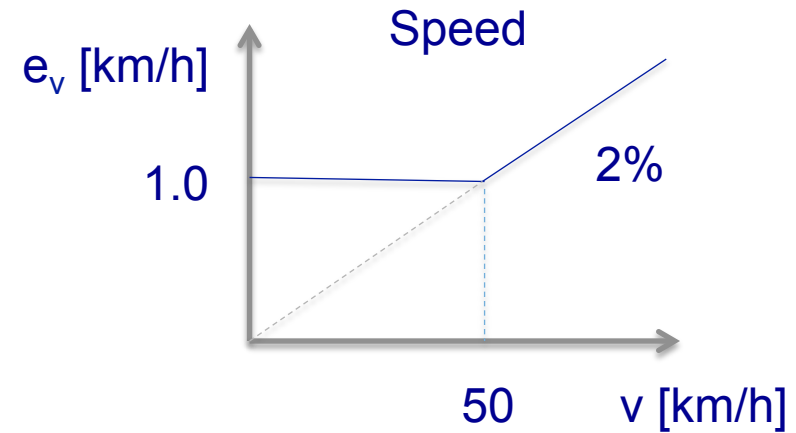
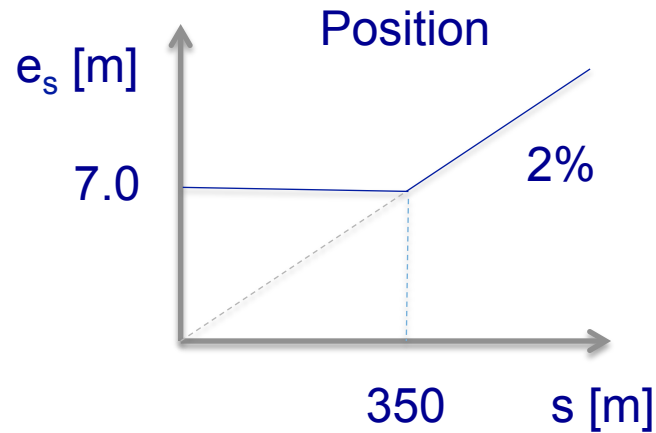


Quelle: Wikipedia

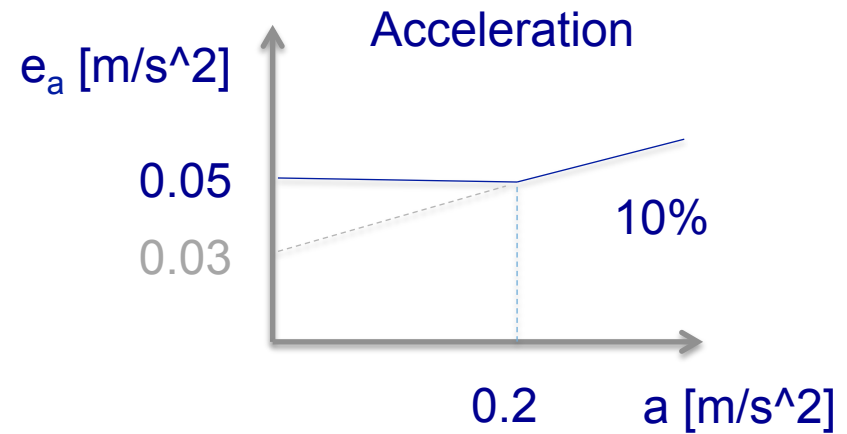
- Ausbaustufe ETCS Level 2 (ohne Signal)
 - Optisches Signal durch bi-direktionale Kommunikation ersetzen
 - Positionsbestimmung zwischen Balisen durch weitere Sensoren
- Ausbaustufe ETCS Level 3 (ohne Stellwerk)
 - Navigation erfolgt im Fahrzeug (ermöglicht „moving block“)

- European Train Control System ETCS – ursprüngliche Fragestellung mit Navigationsrelevanz
 - Kann GPS bzw. später Galileo die Balisen ersetzen ?
 - Interpolationsmöglichkeiten bei GNSS Abschattung
- Später aufgekommene Navigationsfragen
 - Welchen Vorteil bringt ein GNSS beim beschlossenen Einsatz von Balisen und Radimpulsgebern RIG ?
 - Wie genau kann der Skalenfaktorfehler des RIG geschätzt werden und welche Filterdynamik lässt sich erreichen ?
 - Ist der Betrieb einer Lokomotive unter Permanentschlupf ohne die Verwendung eines (teuren) VSB Radars möglich ?
 - Können zwei GNSS Antennen am Anfang und am Ende des Zuges eine sichere Zugvollständigkeitserkennung garantieren ?

Schiienenanwendungen

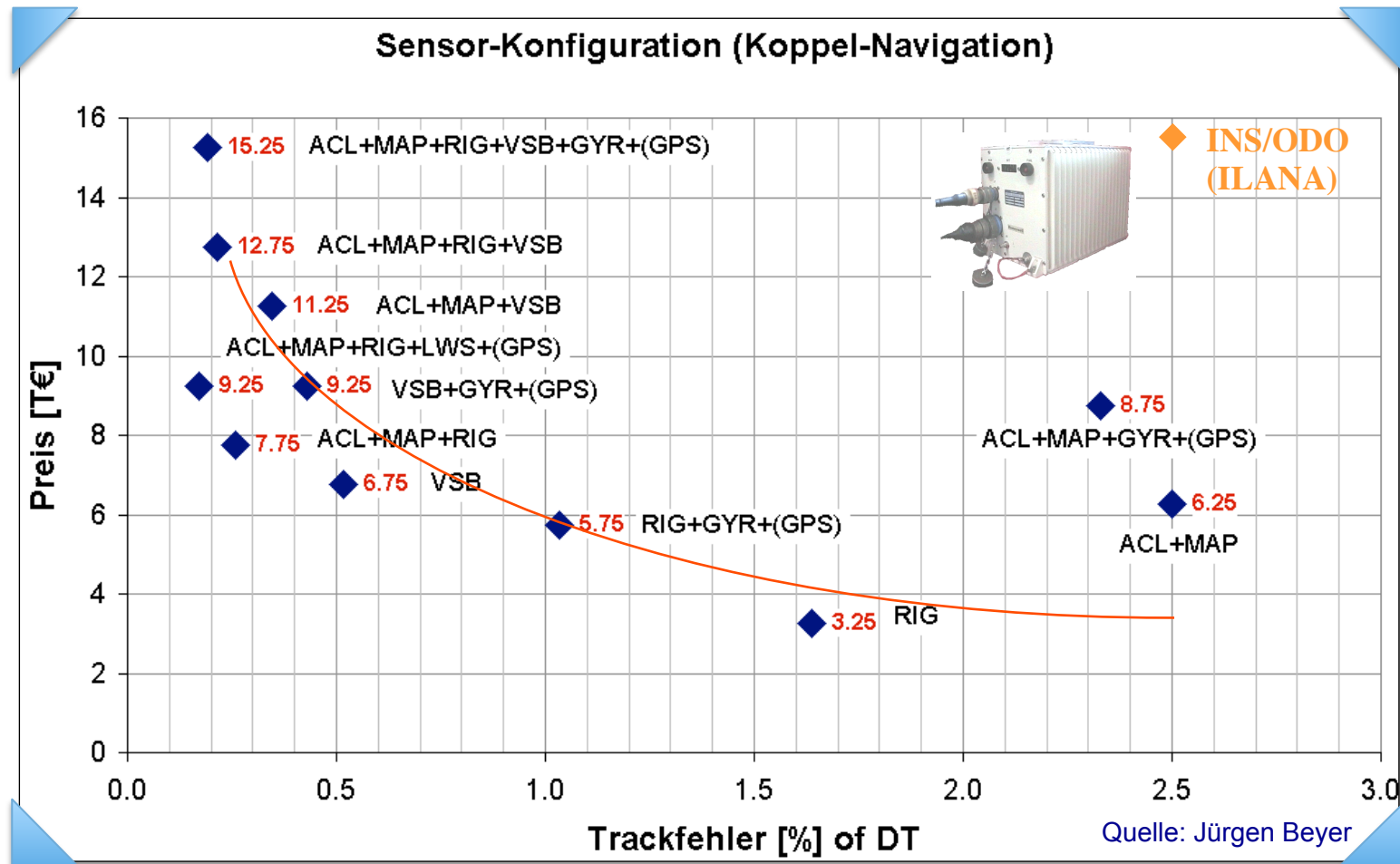


European Train Control System
ETCS Spezifikation
Quelle: ADtranz

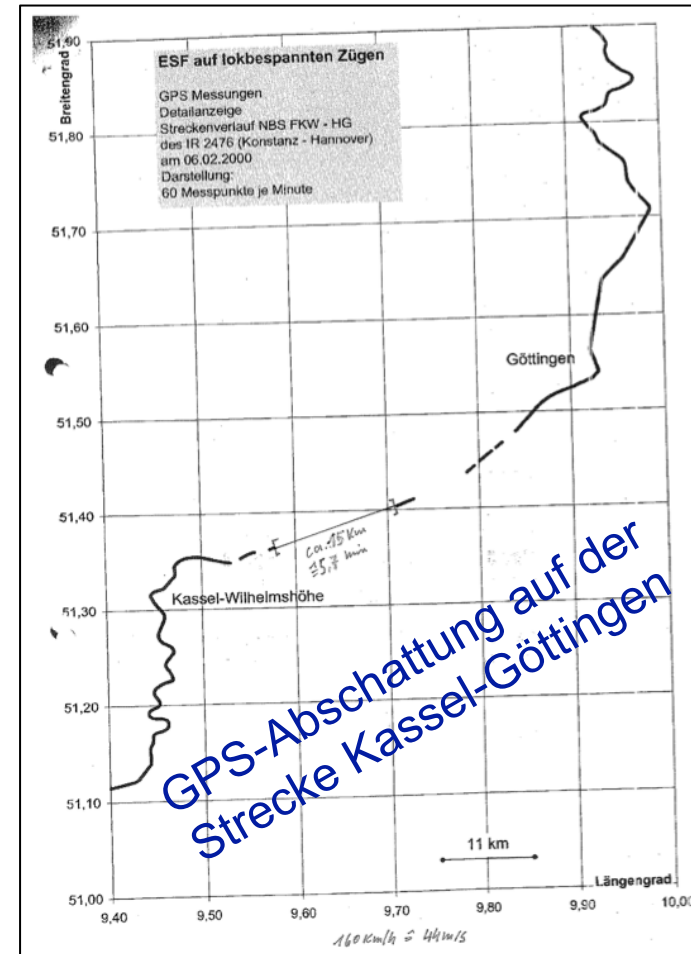


Vergleich von Konfigurationsbeispielen

Fehlerabschätzung – Ein-dimensionales Bewegungsmodell

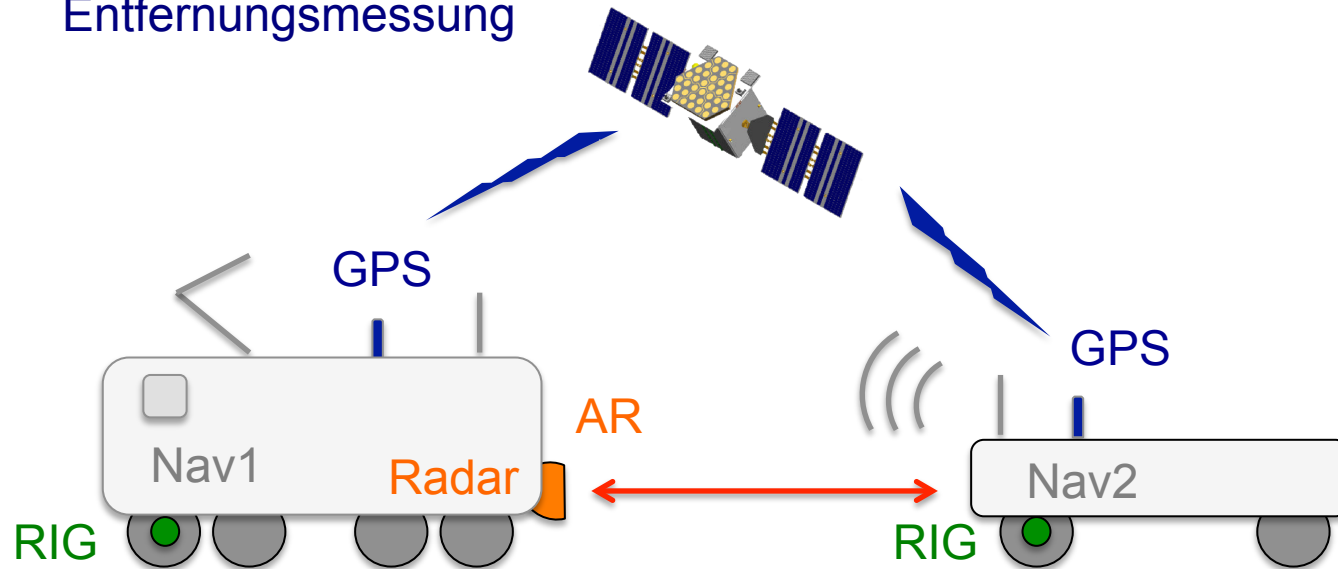


- Projekt ESF
Energiesparende Fahrweise
 - The system gives coasting advices based on track and train data, timetable, position, time and operational situation
 - Continuous speed optimisation could also be given by ESF but is presently not active
 - The system has been in operation on all ICE trains of DB since May 2006



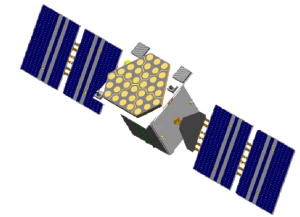
Quelle: ISB Uni Hannover

- Rendezvous Ortungs-System ROS
 - Bremsversuche für Güterwagen (DB Minden)
 - Sicherheitsabstand und vereinfachtes Wiederankoppeln
 - Ansatz: Verbesserte sichere Differential-GPS Genauigkeit
 - Empfänger in Nav1 und Nav2 werten identische Satelliten aus
 - Radimpulsgeber RIG und ein Abstandsradar AR stützen die Entfernungsmessung



Frankfurt/Airport Fire & Rescue Vehicles

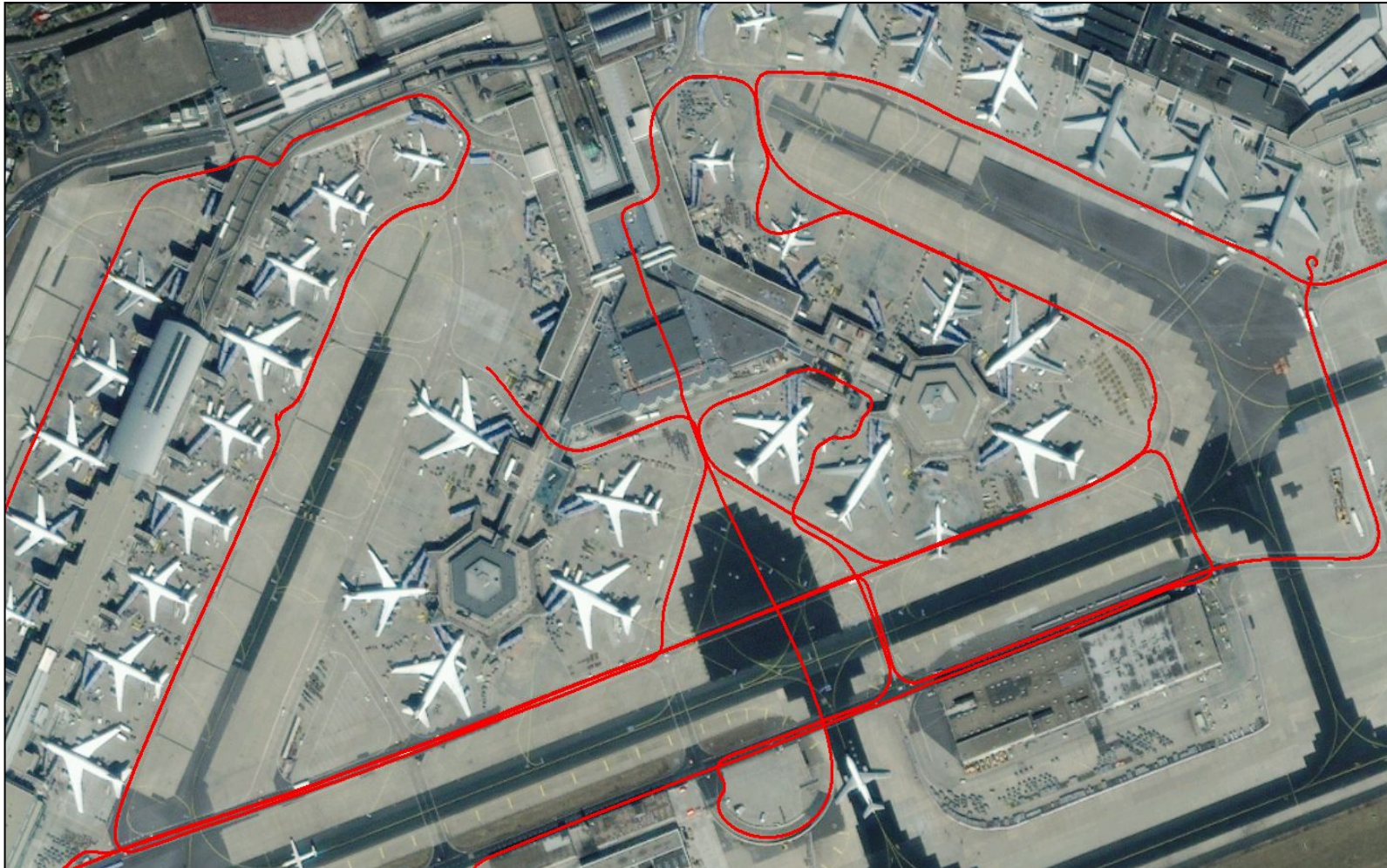
- Motivation and Goal
 - Improve Taxiway vehicle fleet management
 - Ensure Time to Target in less then 3 minutes
 - Allow operation under bad weather conditions
- System Components
 - Operator Station
 - Large scale display to show the situation
 - Gather and value dynamic information
 - Broadcast information & missions
 - Vehicle Equipment
 - Fault-Tolerant Navigation: DGPS aided dead reckoning system
 - Data handling: on-board industrial PC & navigation-display
 - Communication
 - Bi-directional data link: vehicle -> operator station -> all vehicles



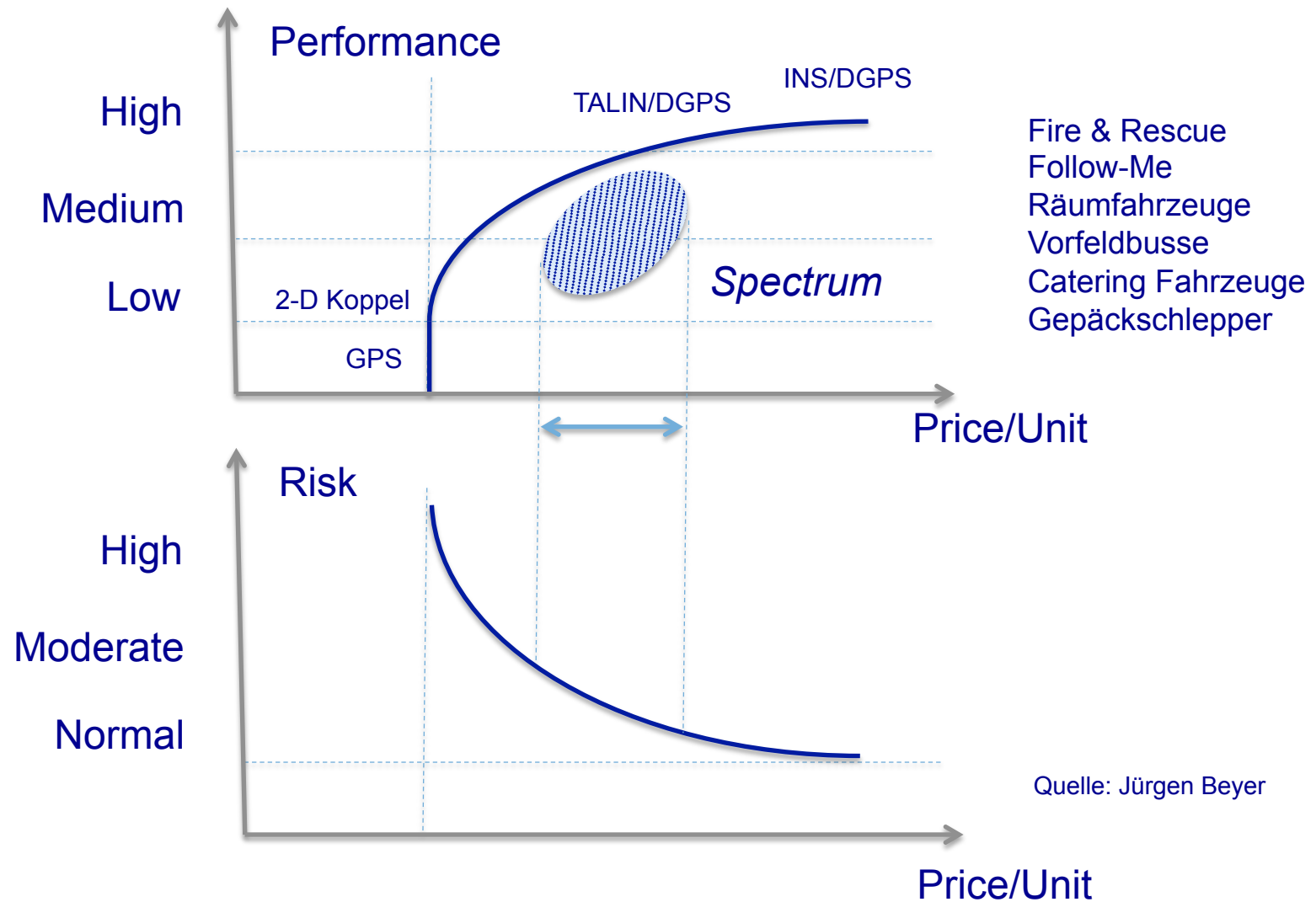
Quelle: Fraport AG 2005

Frankfurt/Airport Fire & Rescue Vehicles

ETNA Testfahrten



Frankfurt/Airport Fire & Rescue Vehicles

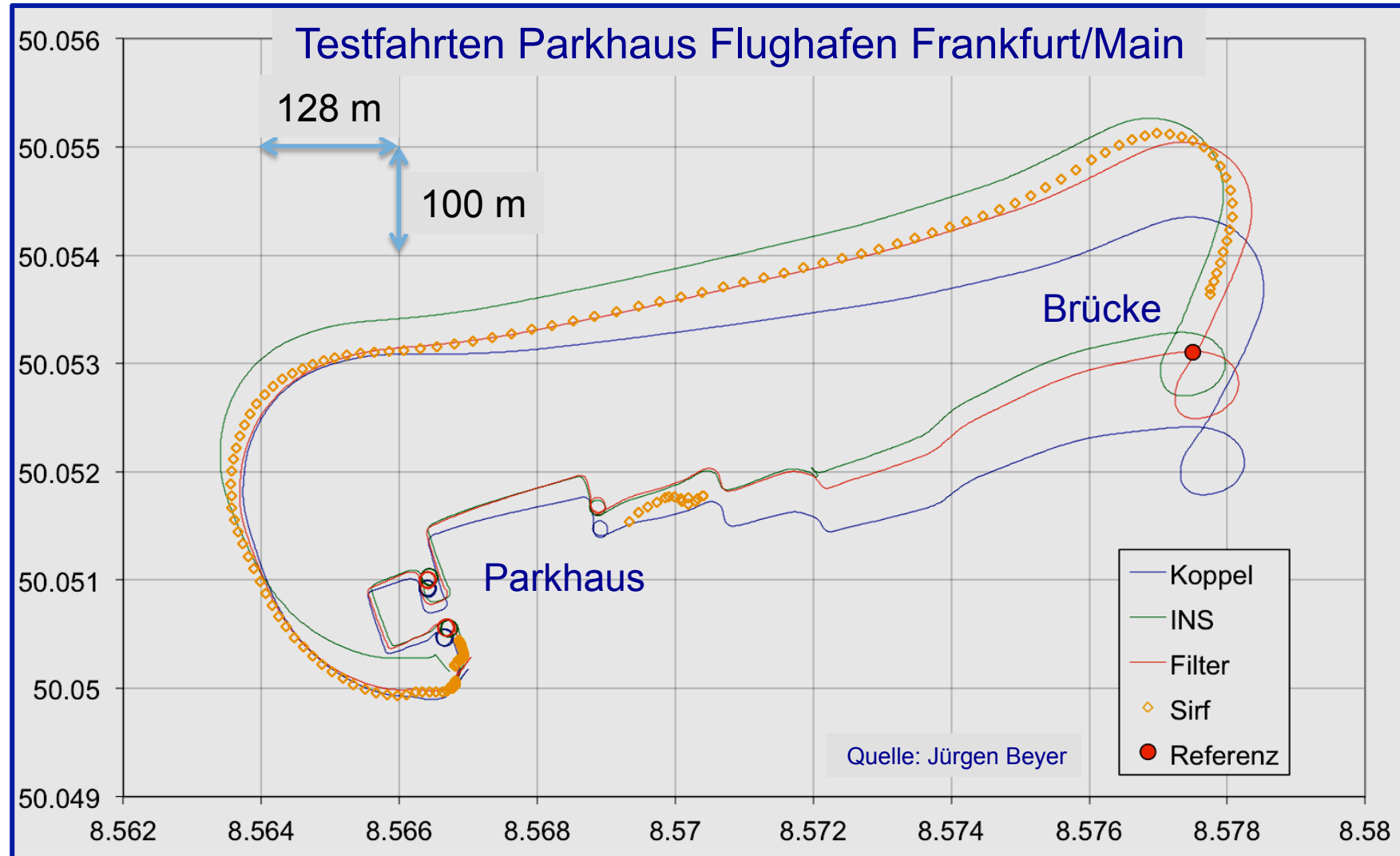


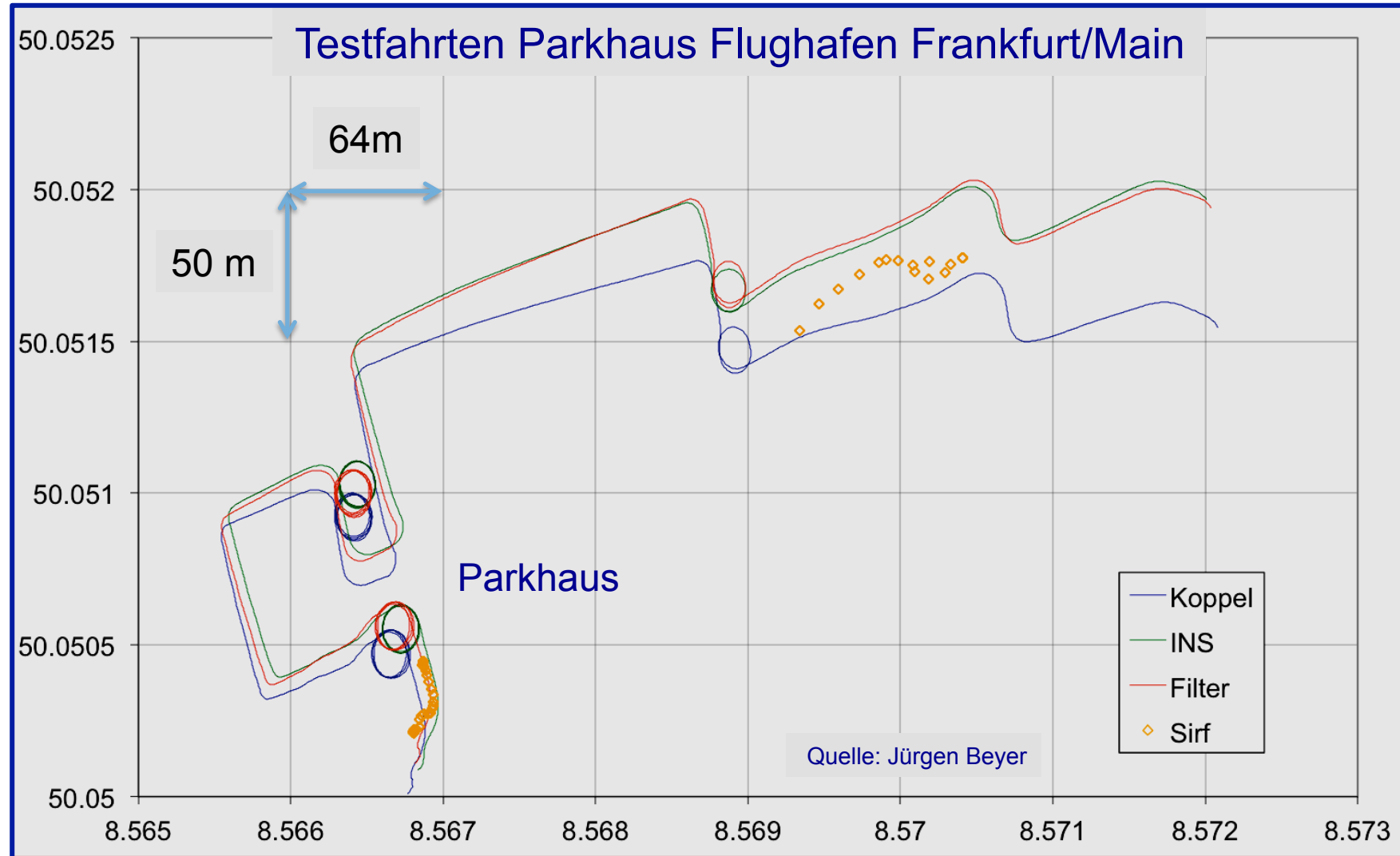
Frankfurt/Airport Fire & Rescue Vehicles

Name	TEUR	Low Cost	Adv. LC	Ext. LC	Standard	High End	Adv. HE	Talin/DGPS	INS/DGPS
H764	60								
TALIN	44							44	60
RT20	7						7	7	7
Trimble	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5			
ISA	25					25	25		
HG1700	12				12				
GG1320	16								
GG1308	6			6					
FOG	4		4						
VSG	1	1		1					
SAS	0.5	0.5		0.5					
MAG	0.5			0.5					
ODO	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Power SP	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25		
Rechner	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5		
Software	1	1	1	1	1	1	1		
Summe		4.25	6.75	10.75	14.75	27.75	34.25	51.5	67.5

Angegebene Preise sind Näherungen
Quelle: Jürgen Beyer

- Positionsbestimmung auf Koppelnavigationsbasis für Car-Sharing Anwendungen in Landfahrzeugen mit folgenden Leistungsmerkmalen
 - Permanente, lückenlose Spurverfolgung im Strassennetz, in Parkhäusern und in Tiefgaragen
 - Bei Verfügbarkeit von gültigen DGPS-Positionsdaten ist der resultierende Positionsfehler < 10 m (Vertrauensintervall: 2 sigma = 95%),
Ohne Verfügbarkeit von gültigen DGPS-Positionsdaten wächst der resultierende Positionsfehler max. mit 5% des zurückgelegten Weges (Vertrauensintervall: 1 sigma = 68%)
 - In fest eingebauten bi-direktional kommunizierenden Strassen-Kfz Bordausrüstungen einsetzbar





Testfahrten Parkhaus Flughafen Frankfurt/Main

Sity-One 1.0		<c> ZIU / Beyer Industries / TU Darmstadt 2001			
Lat :	North :	D-Age :	0.0	Deviation	
Lon :	East :	GDOP :	4.804	B :	
Height:	Down :	Count :	5	L :	
Time :	1758840.00	Track :	Sat. :	50102400	H :
1764					Dead Reck
Stat :	80	North :	0.004	Azi :	339.247
Lat :	50°02'24.339"	West :	-0.001	Hdg :	339.203
Lon :	8°37'32.808"	Up :	-0.002	Rol :	359.659
Height:	143.87	Alpha :		Pit :	0.231
SIRF					Barometer
Lat :	50°03'00.726"	Status:	0	Speed :	0.000
Lon :	8°34'00.864"	Time :	54841.0	Track :	0.0
Height:	183.90	Sat's :	0		
Filter Estimation		Filter Covariance		Sensor_Count	
X8 :	50.05073	X4 :	-0.384	S8 :	0.00044
X9 :	8.56566	X5 :	0.000	S9 :	0.00069
X11:	176.8	X14:	-95.8	S11:	0.958
X1 :	-0.001			S1 :	0.040
X2 :	-0.00	X10:	-0.014	S2 :	0.10
X3 :	27719.0	X7 :	-734.9	S3 :	7.3
				S4 :	0.995
				S5 :	0.000
				S14:	0.911
				S7 :	0.29
				S10:	0.022
Ebene: 11 Schott: 1 Platz: 34					Sensor_Count
					GPS_Pos : 763
					GPS_Vel : 503
					Odo_Ubx : 17520
					GG_1320 : 17520
					USG_Wbz : 0
					BAR_PnH : 17520
Sys: 50 918.5 21968 300432					

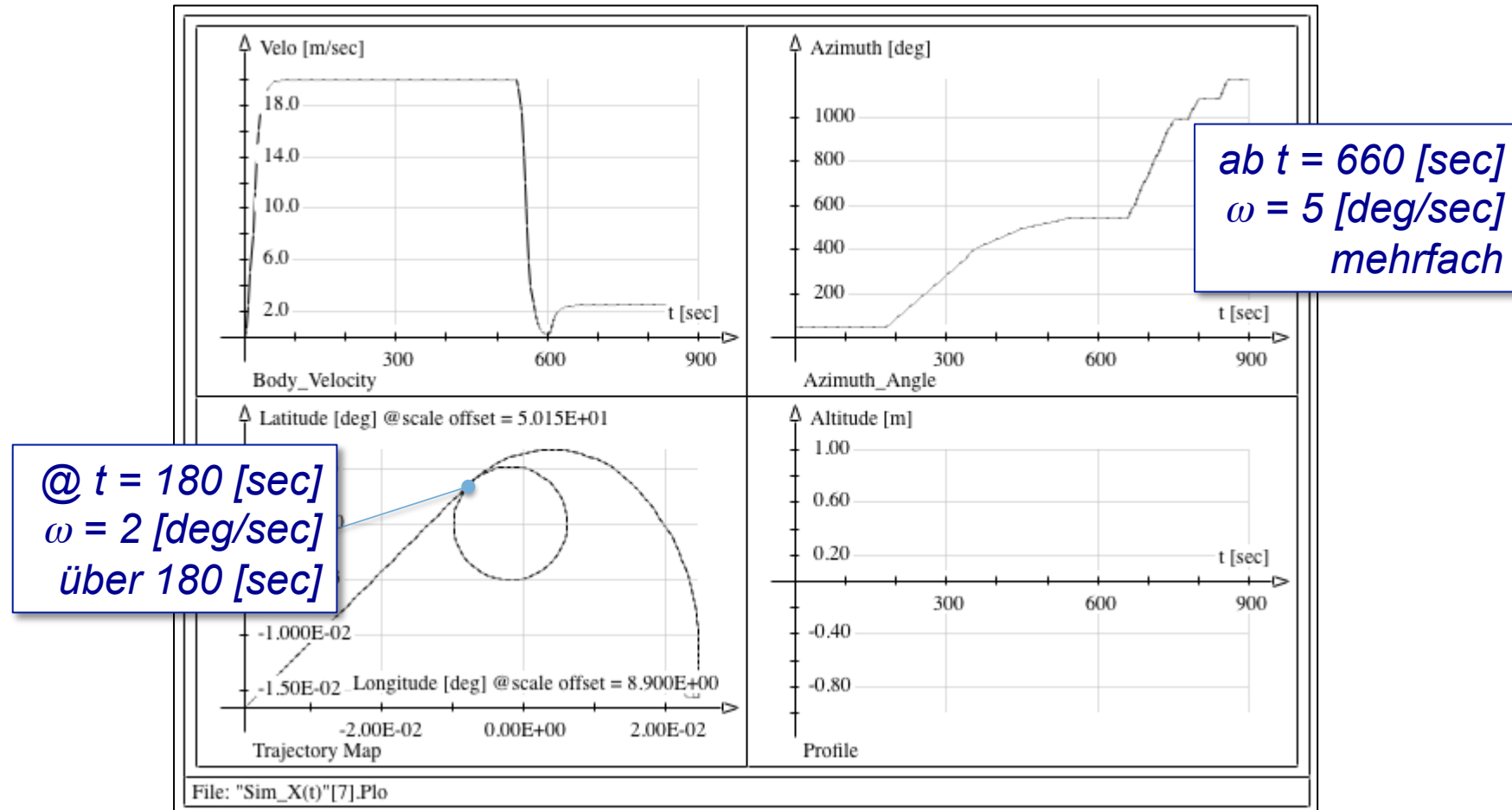
Quelle: Jürgen Beyer

- Was liefert die VSB und GPS-Vel_Nord Kombination ?
 - Gibt es eine Beschleunigungsschätzung ?
 - Werden Breiten- und Längengrad ermittelt ?
 - Erfolgt eine Schätzung des Azimuth-Winkels ?
- Was bringt eine reine GPS-Sensorik ?
 - Erfassung der Beschleunigungen ?
 - Abbildung schneller Drehungen ?
- Was passiert, wenn kein Sensor mehr verfügbar ist ?
 - Kann der Algorithmus überhaupt noch arbeiten ?
 - Wenn ja, ist das Ergebnis richtig ?
 - Wie sinnvoll ist das Ergebnis ?



Simulationsbeispiel und Diskussion

Simulierte Trajektorie



Quelle: Jürgen Beyer

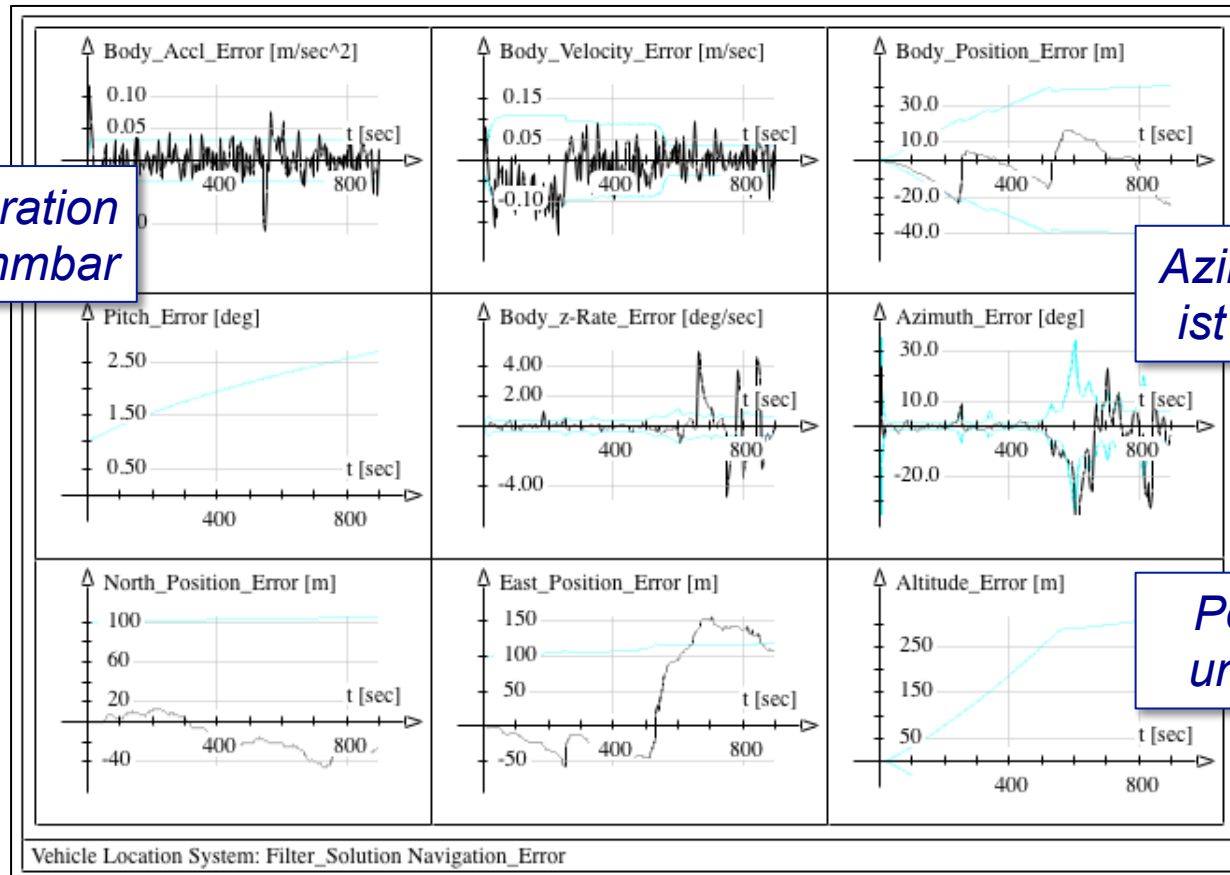
Simulationsbeispiel und Diskussion

VLS Zustandsschätzfehler und Sigmaverlauf

*Acceleration
ist bestimmbar*

*Azimuth-Winkel
ist detektierbar*

*Position/Höhe
unbestimmbar*

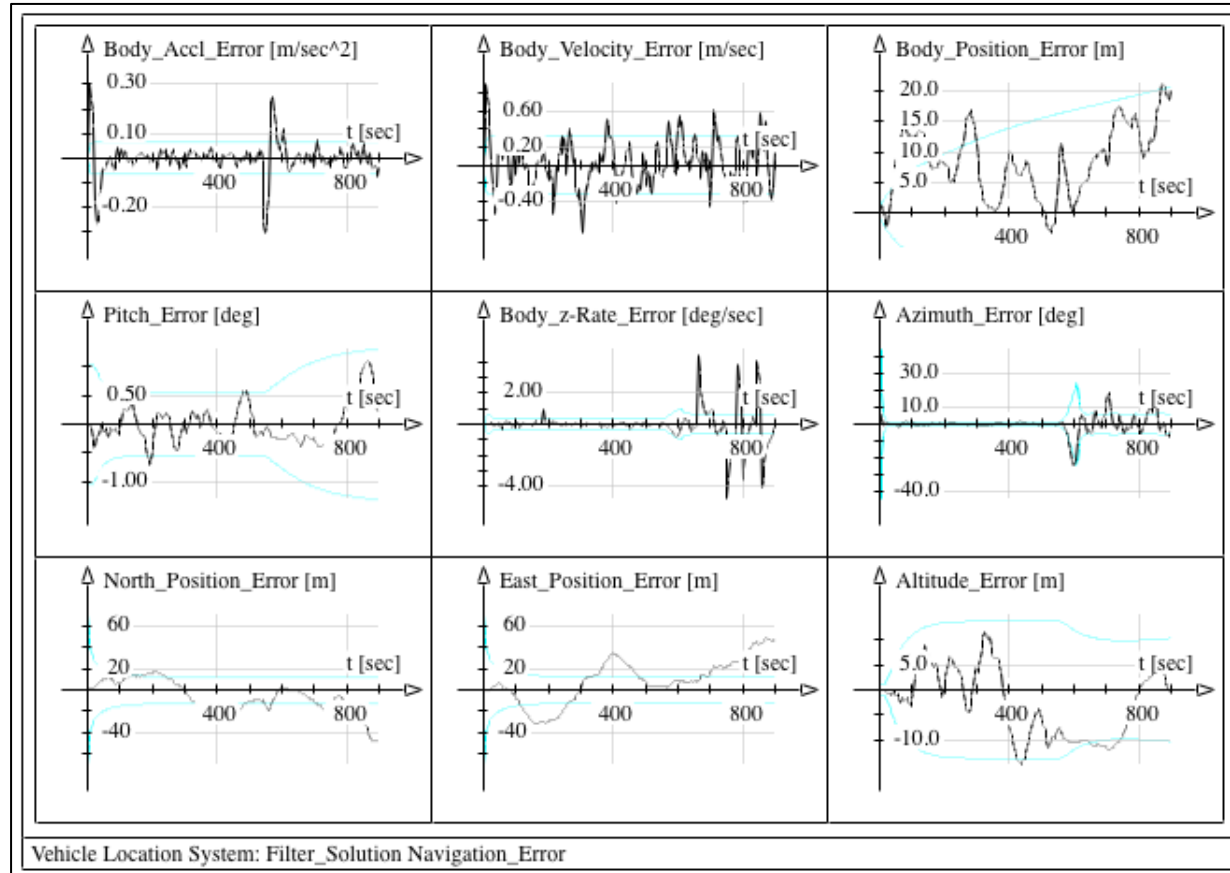


VSB und GPS-Vel_Nord

Quelle: Jürgen Beyer

Simulationsbeispiel und Diskussion

VLS Zustandsschätzfehler und Sigmaverlauf

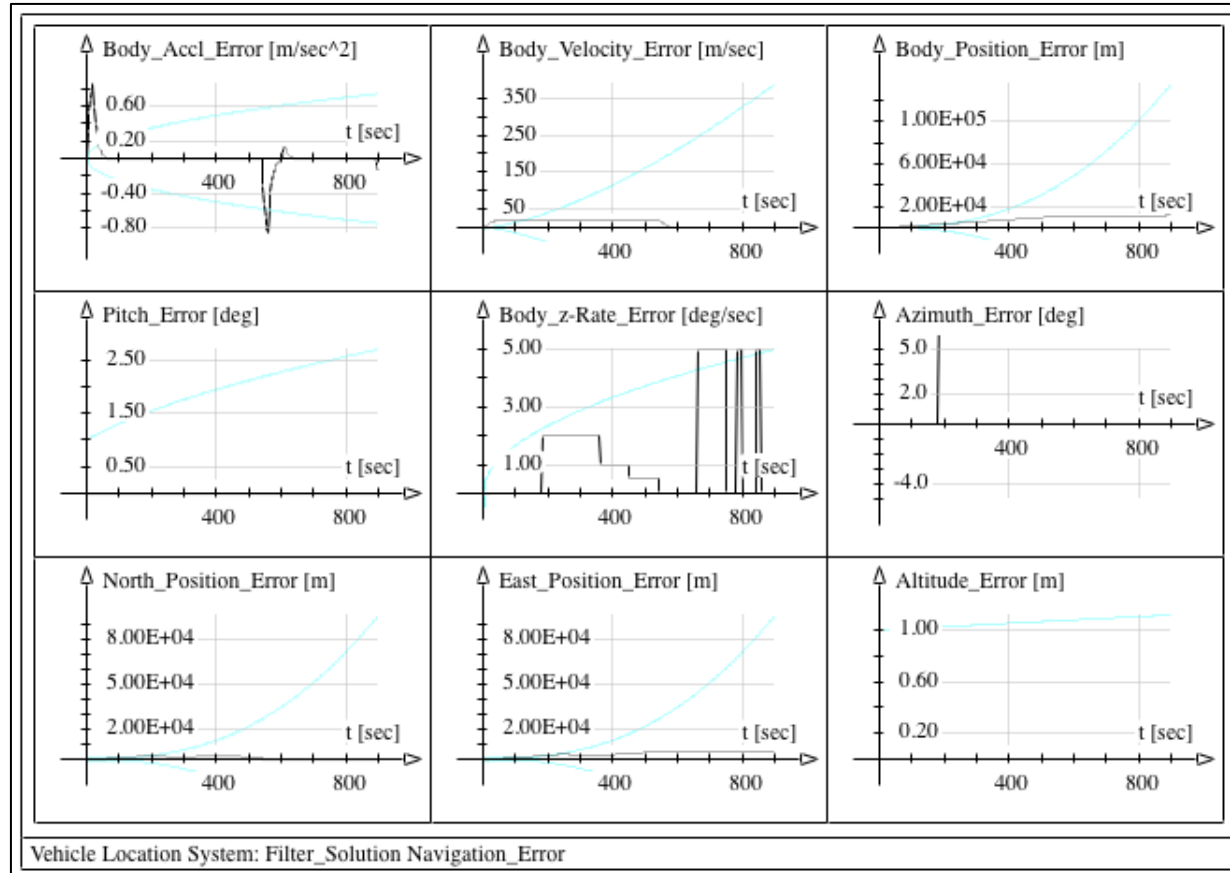


GPS-AI Sensorik

Quelle: Jürgen Beyer

Simulationsbeispiel und Diskussion

VLS Zustandsschätzfehler und Sigmaverlauf



keine Sensoren

Quelle: Jürgen Beyer