Safe and Precise localisation of Railway Objects GNSS Multisensor based Architecture for highly accurate and safe Object Localisation in Railways

- Requirements
- System & Sensors
- Results (feasibility study)

Railways 2018, 3.-7. Sept., Barcelona

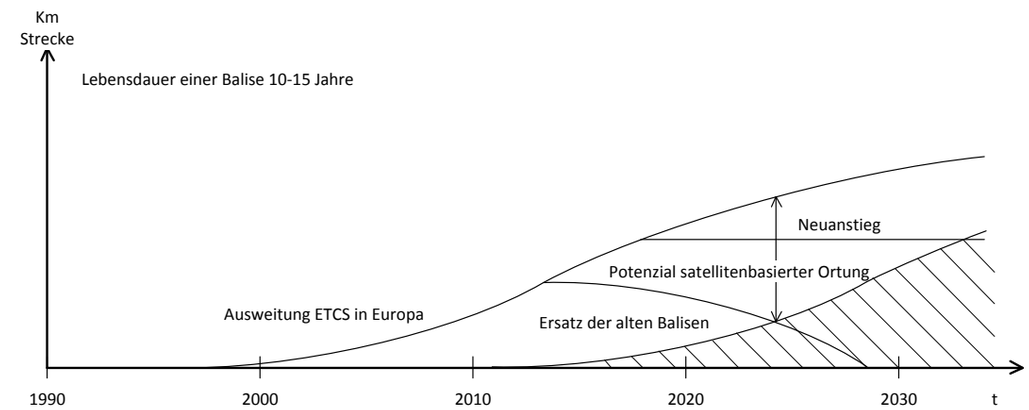
E. Schnieder*, R. Schild[1], U. Becker[2],
A. Brand[3], T. Freissler[4]

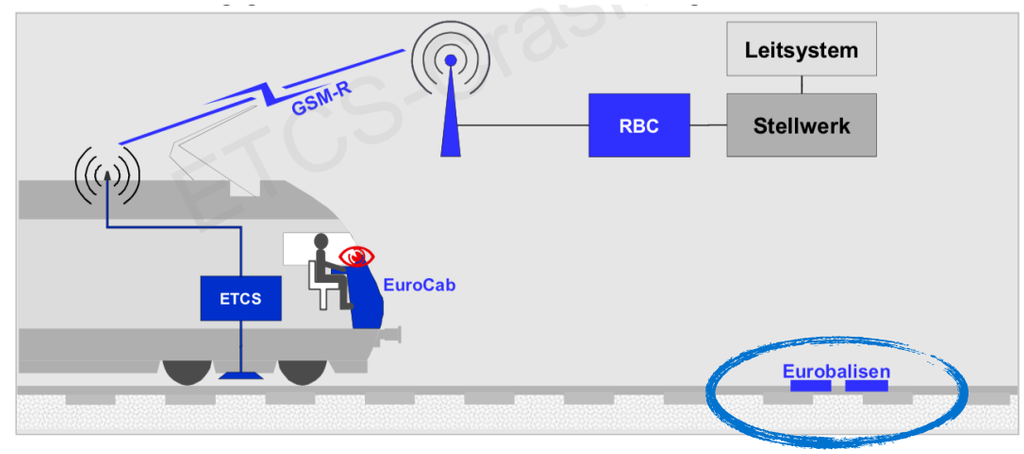
* Assessment & Consulting
[1] Schild & Partner GmbH
[2] TU Braunschweig
[3] SBB
[4] m2c ExpertControl GmbH

The Goal / Problem

Introduce **safety-critical localisation** wherever practical to **increase productivity** and **reduce physical infrastructure**:

- Efficient implementation of ETCS L3+ (train integrity) while substituting « Gleisfreimeldeanlagen» (about 27’000 today).
- Reduction in Infrastructure e.g. 60’000 ETCS balises or 9’000 axle counting system for ETCS L2.
- Safer warning procedures e.g. in case of construction (on tracks) in combination of personal localisation.





location enabled devices

tablet

warnings

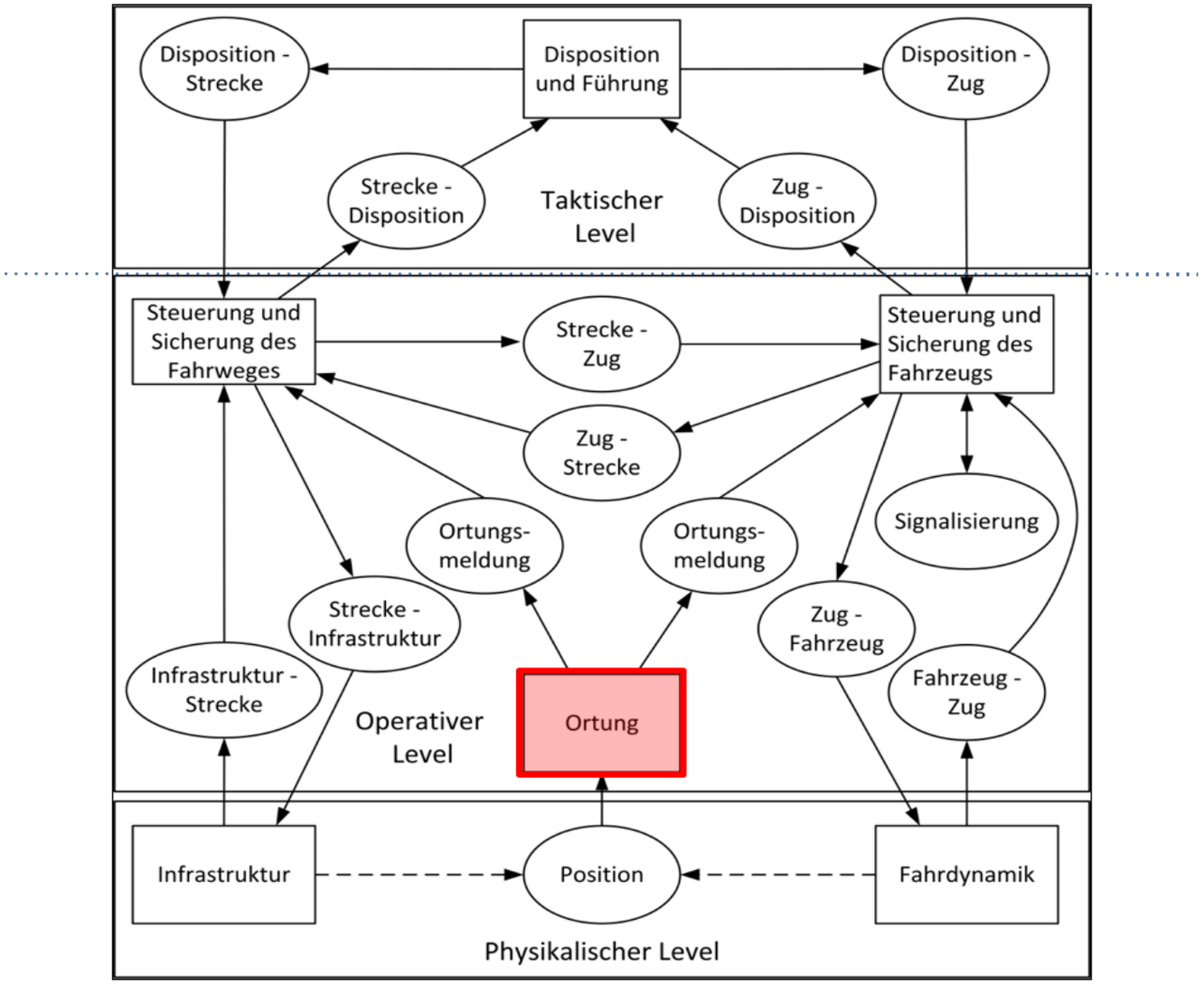
localisation «tag»

sources all © SBB

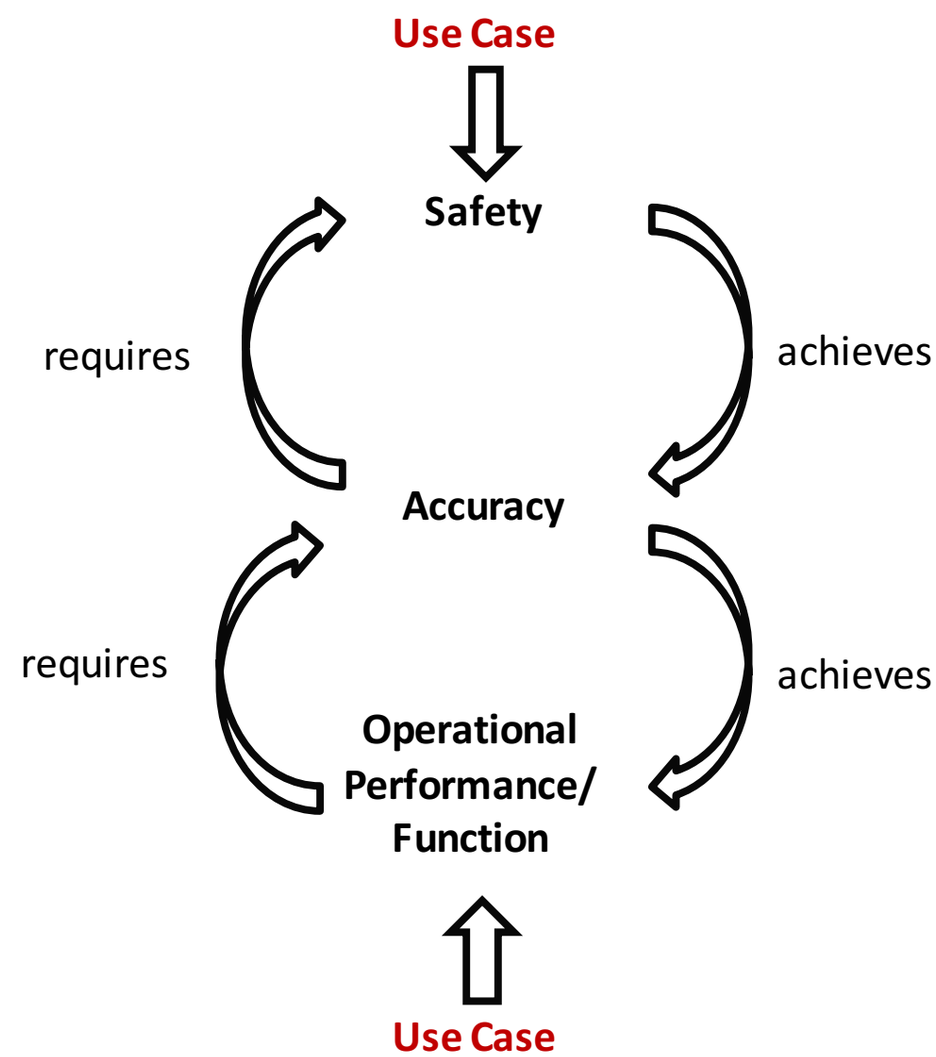
Localisation Requirements

Use Cases + Safety Requirements => Localisation Performance

(accuracy, reliability (RAMSS))



Generic Structure of Train Control- and Safety-Systems



Relations between Use Cases and Characteristics of a localisation system

Requirements

Example of Use Cases

1.2	**„Präzise Zugendeposition (insbesondere Güterzüge)“**
1.2.1	Zugintegrität, um ETCS L3 und moving block zu ermöglichen
1.2.2	Automatische Zuglängenberechnung
1.3	**„Performante „elektronische Kopplung“ von Zügen, Optimierung Zugfolgezeit“**
1.4	**„Präzise Zugspitzenposition für ETCS-Prozess“**
1.4.1	Effiziente, präzise und sichere Steuerung von Vereinen, Trennen, Wenden (VTW) und besetzten Einfahrten
1.4.2	Sicheres Rangieren mit/ohne Shunting-Modus ohne Zwergsignale, trotzdem mit voller Absicherung gegen feindlichen Verkehr
1.4.3	
1.5	, TR, ..)
1.5.1	
1.5.2	
1.5.3	
1.5.4	
1.5.5	
1.6	
1.6.1	
1.6.2	
1.7	Der effektive Bremsweg wird in die ES Risikoberechnung aufgenommen und der Zug somit optimal gebremst. => Zugfolgezeiten optimierbar.
8	Kommerzielle und operative Nutzung
8.1	**„Tracking von Eisenbahnfahrzeugen, Containern, etc..“**
8.2	**„Automatisierung der Verwaltung von rangierten Zügen“**

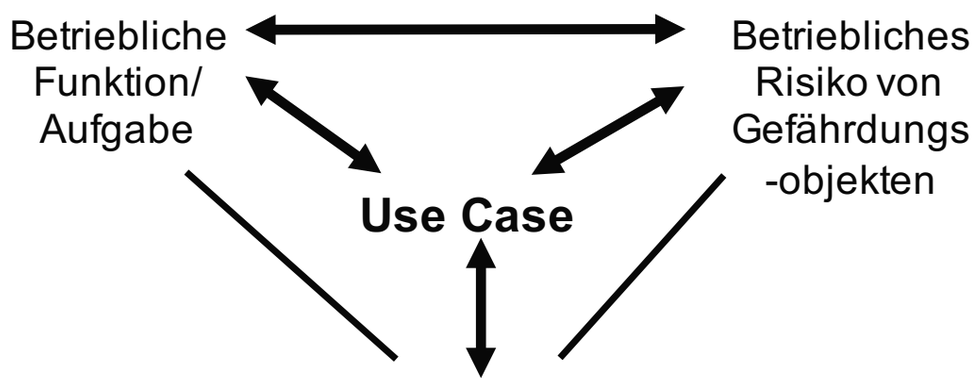
- All relevant Use Cases were systematically analysed (including about 60 aspects).
- We (1) achieve a structure of the localisation objects according to their reference points and characteristical properties to be used for the location functionality.
- We (2) achieve a structure of the use and related requirements including the functional, procedural and operational relationships (e.g. localisation accuracy, time lag of communication etc.)

Requirements

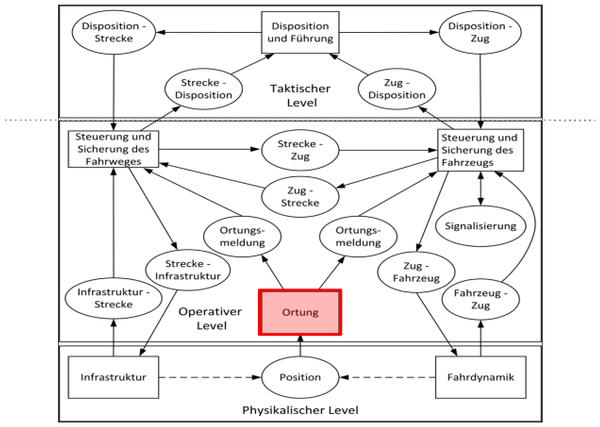
Procedure to generate localisation requirements

UC 1.1: Schnelle und präzise Freimeldung Gleis, Weiche, Barriere

UC 1.1: Schnelle und präzise Freimeldung Gleis, Weiche, Barriere
Schnelle Umstellung Weichen / Öffnung Barriere nach Zugüberfahrt (je nach heutiger Fahrstraßenlogik) mit weniger Komplexität / Systemaufwand möglich als mit heutigen GFM.



Kollision
ZZ1.a Zwei Züge, wegen lückenhafter Technik, z.B. im Stellwerksbereich auch Signalfall
ZZ1.d Zwei Züge, wegen technischem Versagen der Infrastrukturanlagen
ZZ2.a Zug/Rangier, wegen lückenhafter Technik, z.B. Stellwerk
ZZ2.d Zug/Rangier, wegen technischem Versagen der Infrastrukturanlagen
ZZ2.e Übrige Zusammenstöße



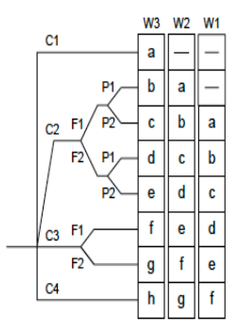
Positionen, Geschwindigkeiten
Von spurgebundenen Fahrzeugen (Zugspitze, Zugende)

Darstellung der Szenarien in der Häufigkeits-Ausmass-Matrix (fett = Änderungen ggü. Szenarienhandbuch 2016)

Qualitative Einteilung	Häufigkeit pro Jahr	Häufigkeitsklasse	Häufigkeits-Ausmass-Matrix					
häufig	über 100	I		PE7, A3, A4, **A6, BR.a**, NBU1, NBU2, NBU4				
	10 bis 100	II		A5, **ZZ3.a, ZZ3.c**, R1, R2, R3, **N.g**	**N.c, N.e, N.f**			
gelegentlich	1 bis 10	III		**ZZ1.c**	PE2, PE5	PE3, A1, BÜ2, NBU3		
	0.1 bis 1	IV		**ZZ2.c**	PE4, PE6, **ZR1.a bis ZR1.e, ZZ2.a bis ZZ2.e, ZZ1.e, ZZ2.e**	PE1, A2, **ZZ1.b, ZZ2.b, ZZ3.b, R01, BR.d, N.d**		
selten	0.01 bis 0.1	V			FL1	ZS1, **ZZ2.a, ZZ2.d**, GG7	**ZZ1.a, ZZ1.d**, GG4, **BR.c**	
	unter 0.01	VI				PA2	PA1, GG2	GG1, GG3, GG5, GG6, **BR.b, N.a, N.b**, BV1, BV2, BV3

Ausmassklasse	A	B	C	D	E	F
Finanzieller Schaden in CHF	unter 10'000	10'000 bis 100'000	100'000 bis 1 Mio.	1 Mio. bis 10 Mio.	10 Mio. bis 100 Mio.	über 100 Mio.
Personenschäden	eine leicht verletzte P.	mehrere leichtverletzte P., 1 mittelschwer verletzte P.	1 schwerverletzte P. oder 1 Todesopfer (RK 1)	mehrere schwerverletzte P. oder 1 Todesopfer (RK2)	Zahlreiche Schwerverletzte oder 1 bis 5 Todesopfer (RK3)	über 5 Todesopfer (RK3 oder 4)
Qualitative Einteilung	klein		mittel		gross	

Ermittelte Risiken nach SBB-Szenarienhandbuch
zur Zuordnung von Use Cases, Lokalisierungsobjekten sowie Risikofaktoren und resultierender Sicherheitsanforderungsstufe



Auswirkung des gefährlichen Vorfalls C (Consequence)
- C1 geringe Verletzung
- C2 schwere, irreversible Verletzung einer oder mehrerer Personen; Tod einer Person
- C3 Tod mehrerer Personen
- C4 Tod sehr vieler Personen

Häufigkeit und Zeit des Aufenthalts im Gefahrenbereich F (Frequency)
- F1 seltener bis öfterer Aufenthalt im gefährlichen Bereich
- F2 häufiger bis dauernder Aufenthalt im gefährlichen Bereich

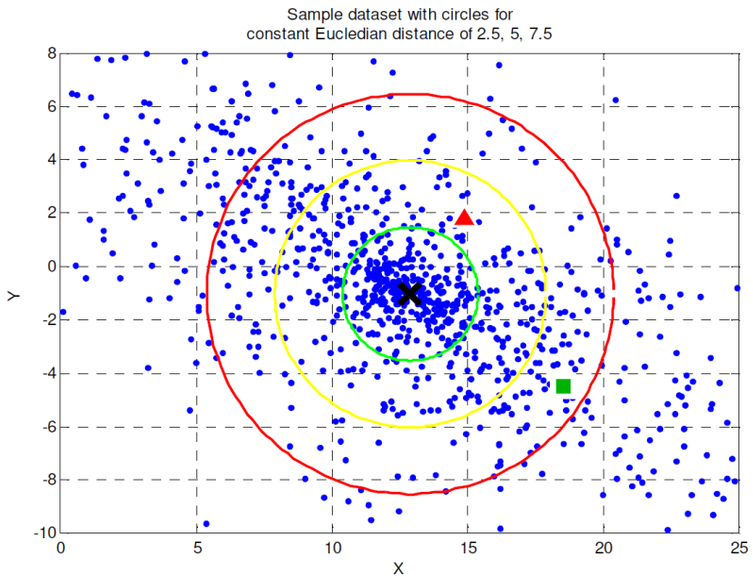
Möglichkeit, den gefährlichen Vorfall zu vermeiden P (Possibility)
- P1 möglich unter bestimmten Bedingungen
- P2 beinahe unmöglich

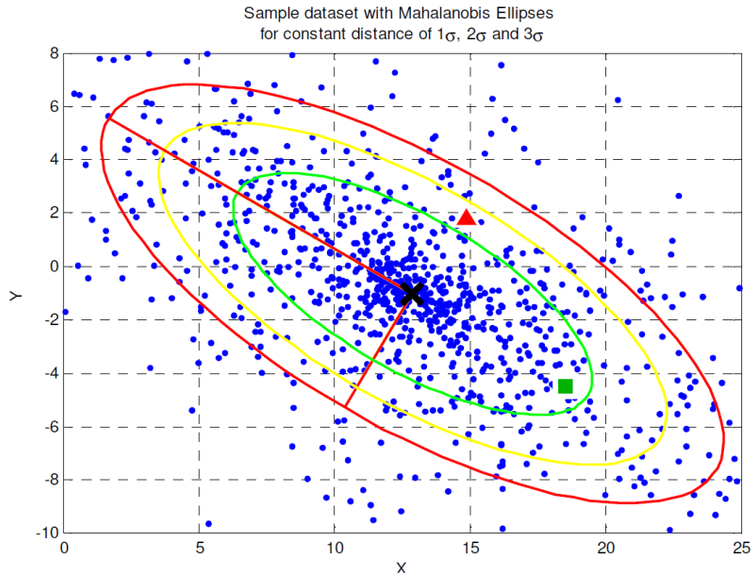
Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Ereignisses W (Probability of the unwanted occurrence)
- W1 eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass die unerwünschten Ereignisse auftreten, und nur wenige unerwünschte Ereignisse sind wahrscheinlich
- W2 eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass die unerwünschten Ereignisse auftreten, und wenige unerwünschte Ereignisse sind wahrscheinlich
- W3 eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit, dass die unerwünschten Ereignisse auftreten, und häufige unerwünschte Ereignisse sind wahrscheinlich

Requirements

Coordinate Systems and Accuracy

radial distribution

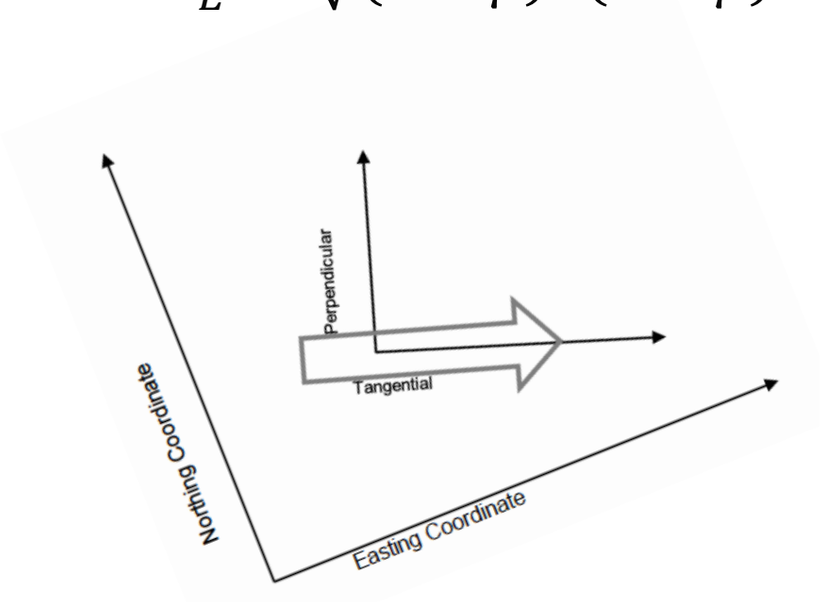


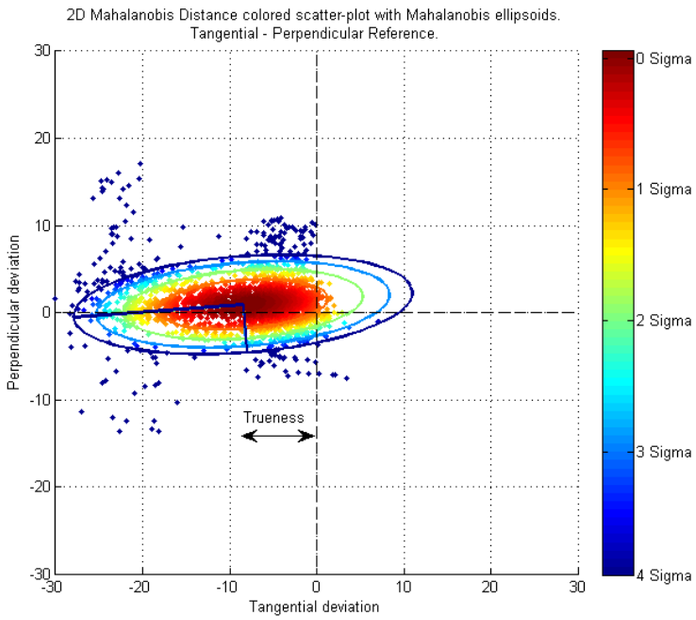


Mahalonobis ellipses

$$D_E = \sqrt{(x-\mu)^T(x-\mu)}$$

$$D_M = \sqrt{(x-\mu)^T S^{-1}(x-\mu)}$$

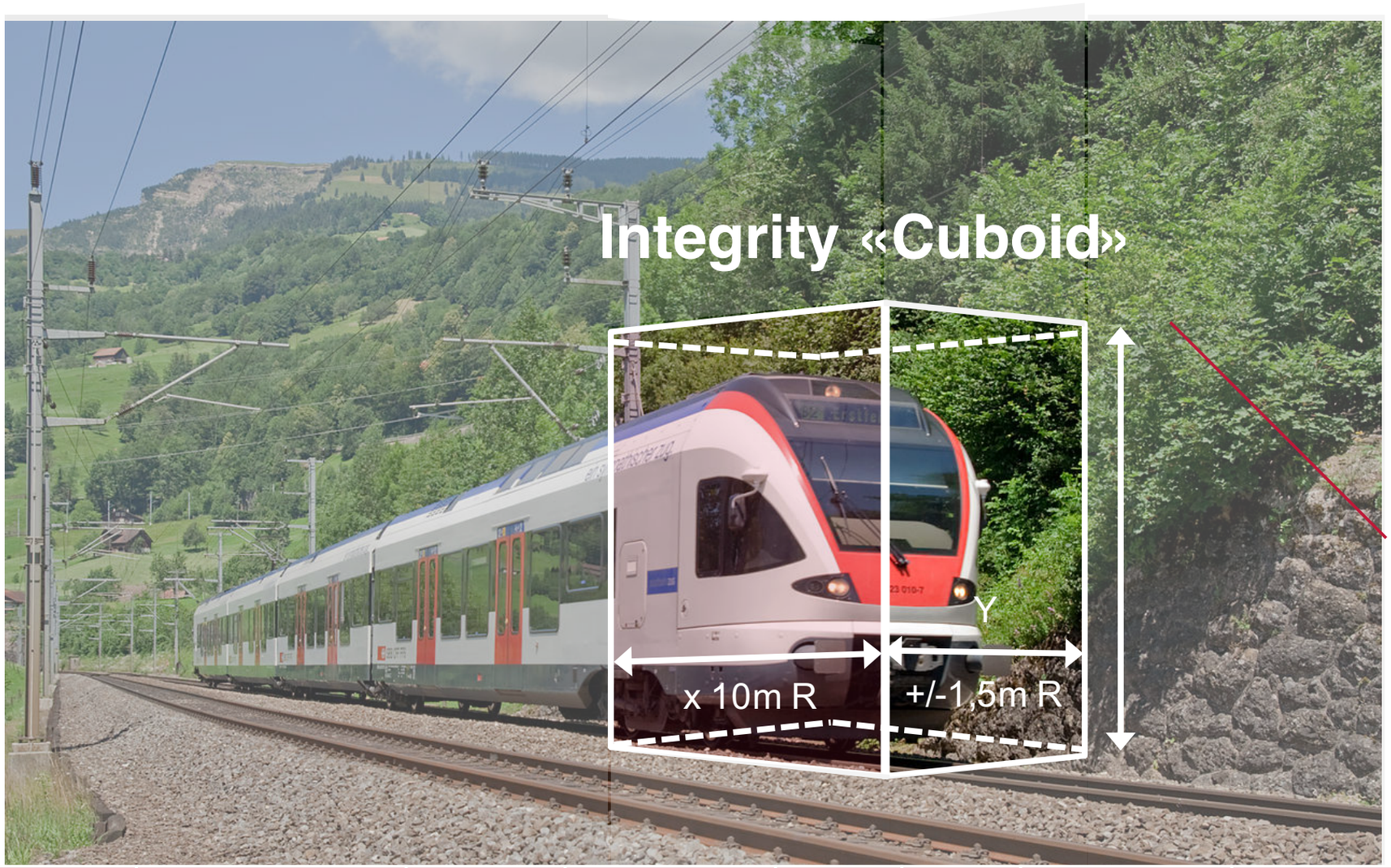




coordinates in north/east
und vehicle coordinate system

Requirements

Integrity and Accuracy for two Use Cases



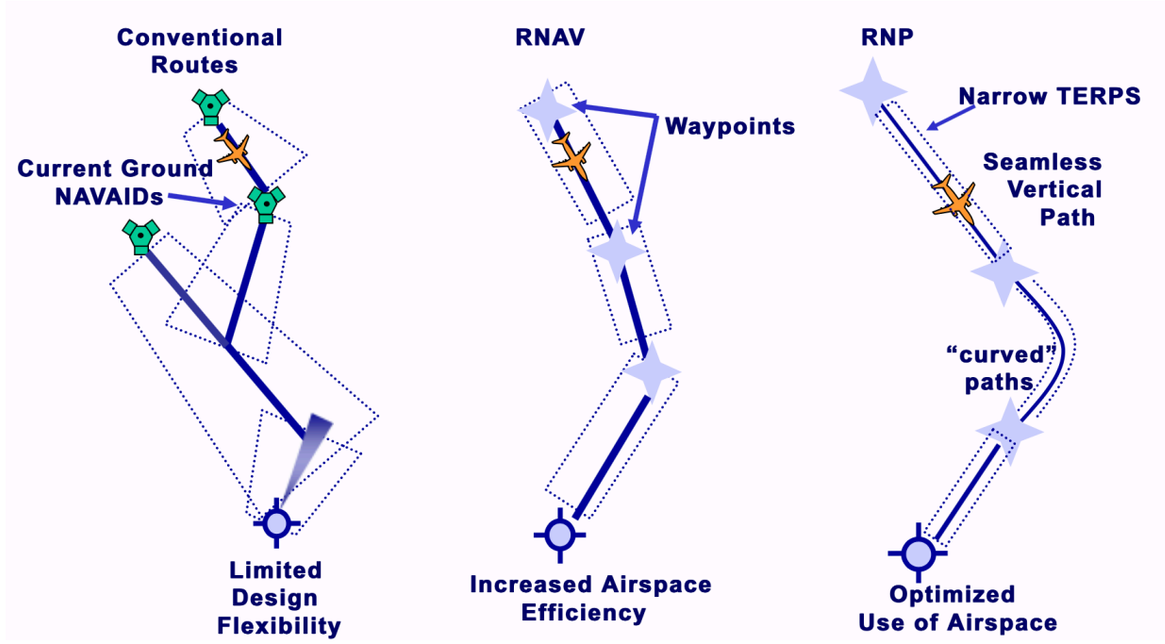
Use Case Nr	Lokalisierungs-objekt	SIL	Genauig-keit	MTTF	MTTR	Verfüg-barkeit	Latenz o. Periode
1.1	Gleisfreimeldung (GFM)	SIL3/ SIL4	x ≤66,4 m R y +/-1,5 m R	1 Jahr	0,5h	0,9999375	1s
1.2 – 1.7 8.1 – 8.2	Zugposition Fahrzeuge	SIL 3	10 m R	1 Jahr	0,5h	0,9999375	0,5 s 0.5 s

System & Sensors

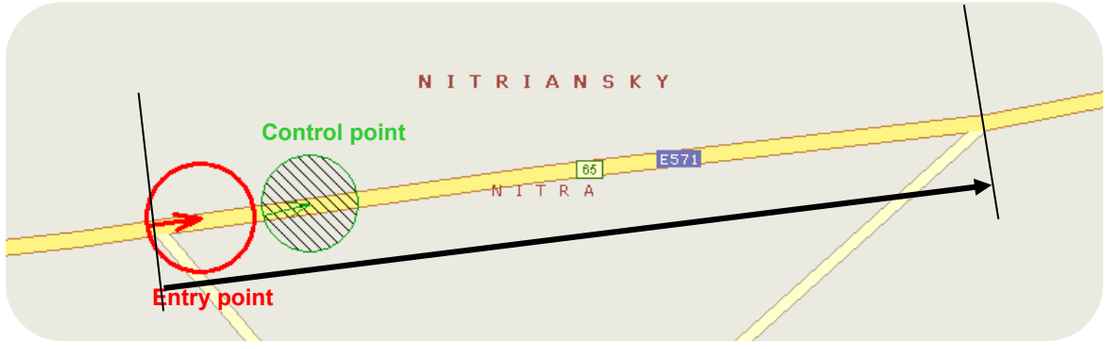
It needs to be a **multi-sensor system** specially designed to meet accuracy, integrity and availability levels.

Analogies (or «lessons learned») from different application domains:

- **Area Navigation / Required Navigation Performance** as being currently used in aviation «Safety Critical»
- **DSRC/GNSS Electronic Tolling** «Business Critical»



performance based navigation © FAA



«virtual» toll control point © NDS

System & Sensors

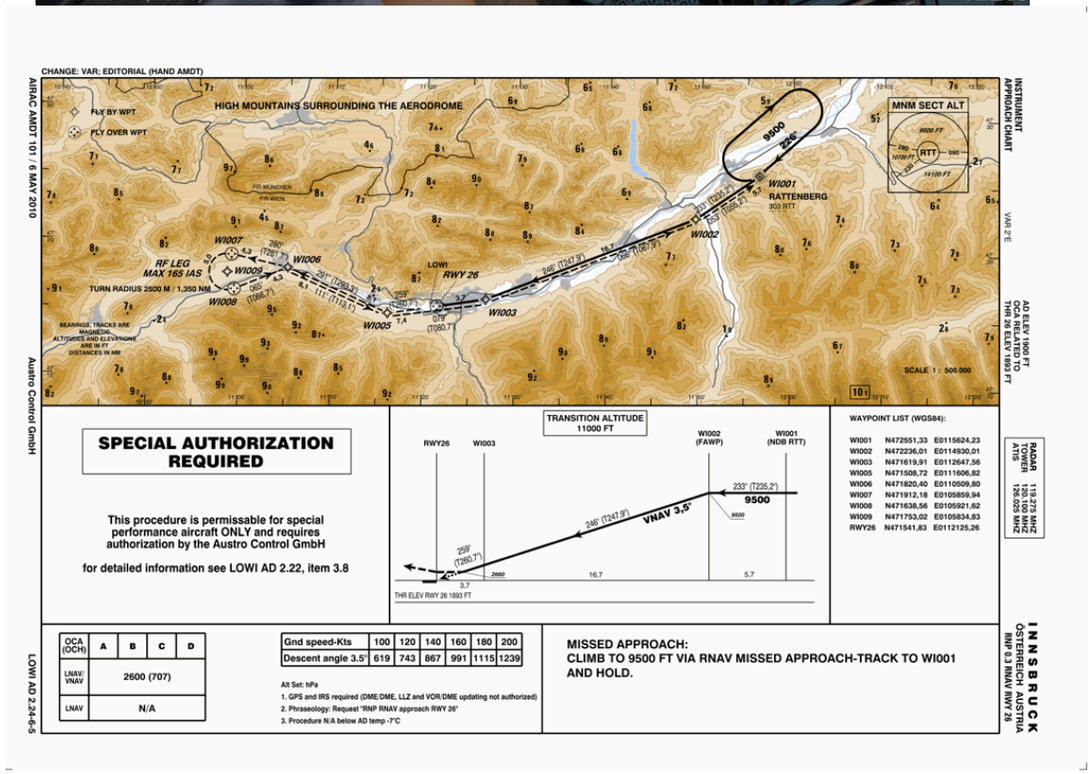
Aviation: Performance based Navigation (PBN)

It is a «safety critical» system and meets SIL3 ÷ SIL4 [10^{-6} ÷ 10^{-9}] requirements.

Multi-Sensor Avionics System:

- Pitot/Static -> speed/altitude,
- Inertial Measurement Unit -> movement and orientation in 3D,
- Satellite Navigation (GPS L1/SBAS -> absolute location,
- VOR/DME/ILS -> absolute location.

Fusion of sensors (i.e. Flight Managment System/Autopilot) enables and ensures cross checks for continuous integrity and accuracy.



System & Sensors

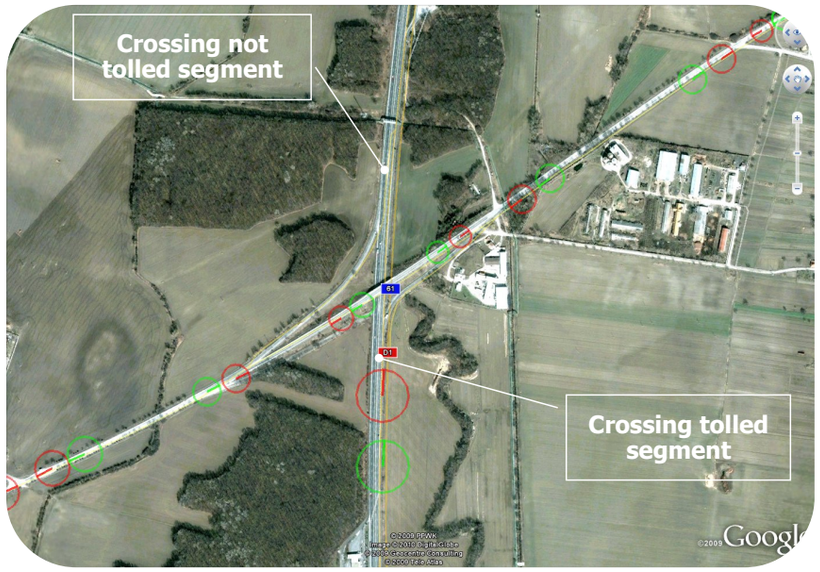
Electronic Tolling: GNSS only with (very) large amounts of data

It is a «business critical» system and can achieve SIL2 [10^{-3}] (on demand).

Combined Sensors in an «OBU»:

- Gyroscope -> directional change,
- Satellite Navigation (GNSS/SBAS) -> absolute location,
- DSRC -> absolute location.

GNSS only can work if combined with business logic and if it is adapted to operational and environment constraints i.e. use of maps.



System & Sensors

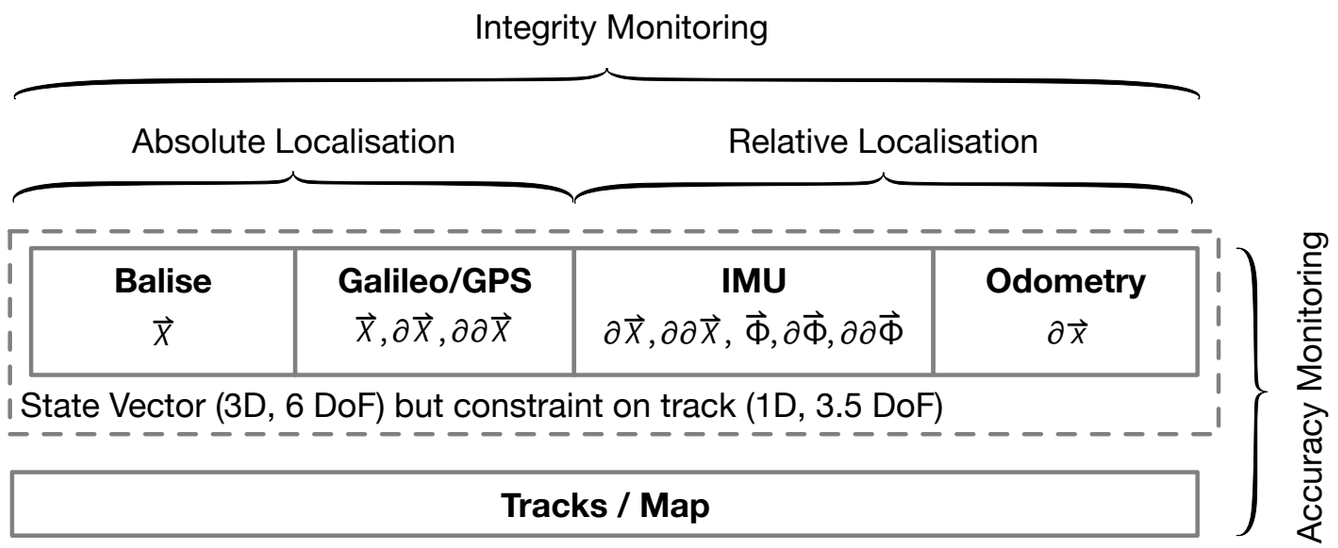
Railway: «performance based navigation» & large amount of data

It is a «safety critical» system and needs to be capable of SIL3 ÷ SIL4 [10-6 ÷ 10-9].

Combined Sensors:

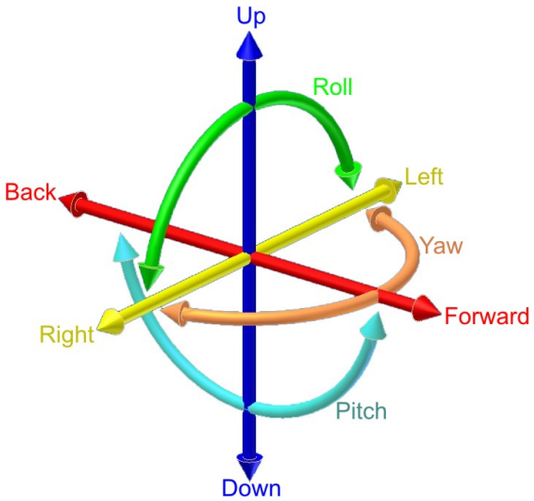
- Odometry -> speed
- Inertial Measurement Unit (IMU) -> Movement and Orientation in 3D
- Satellite Navigation (Galileo [E1/E5 AltBOC]/GPS L1/EGNOS) -> absolute location
- Balise -> absolute location

Fusion of sensors in an «OnBoard» enables and ensures cross checks for continuous integrity and accuracy.



Given the 1 Degree of Freedom nature of a «vehicle on tracks» the system is well over-defined thus enabling sufficient «self» integrity monitoring (i.e. system autonomous integrity monitoring).

Accuracy Monitoring in 2D (cross and above) is done relative to the tracks (i.e. an accurate map thereof). The current technical challenge is to reliably estimate the along track accuracy using GNSS.



System & Sensors

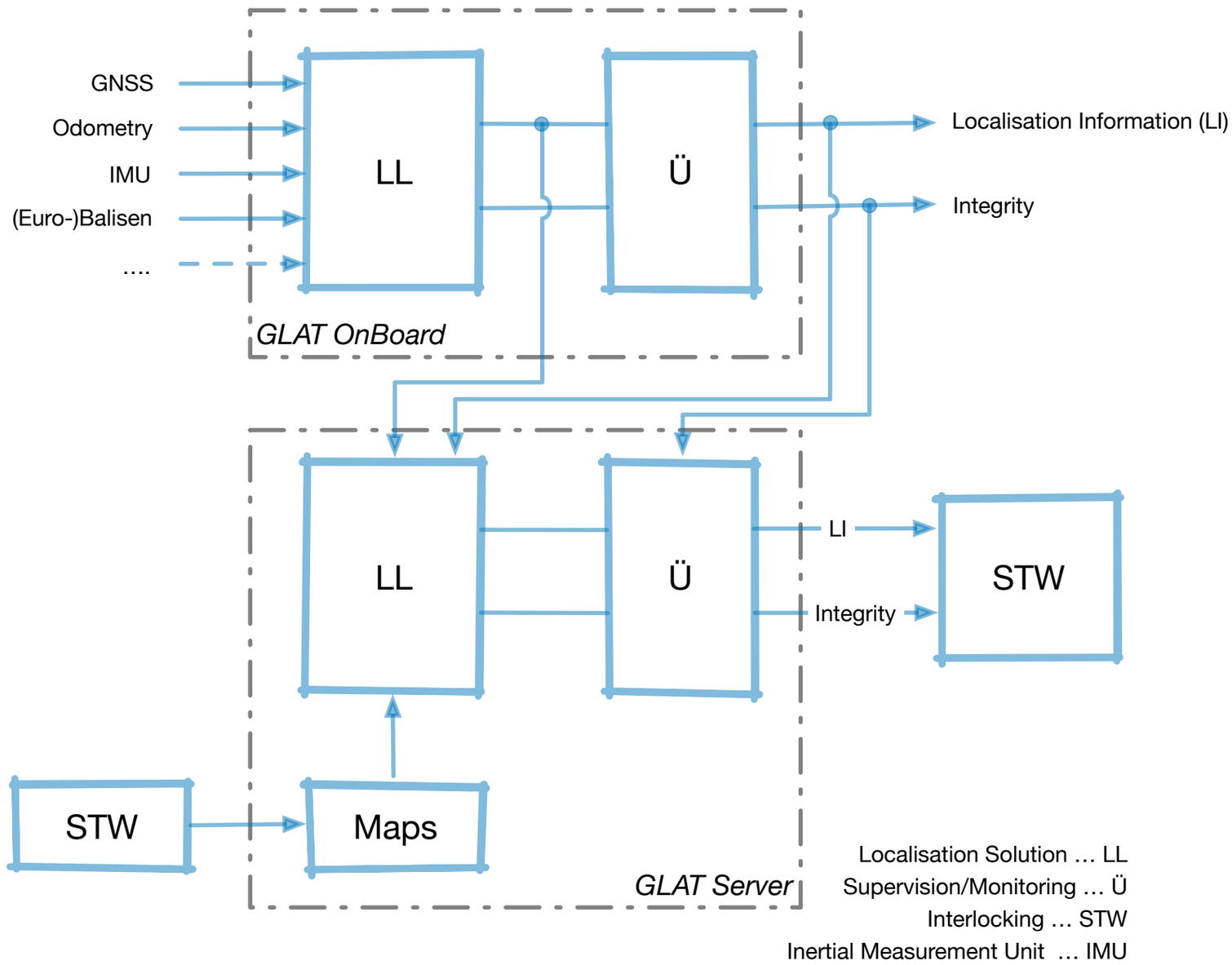
Architecture

We suggest a combination of an «OnBoard» and a central localisation functionality.

They work in sequence to fulfil the required functions:

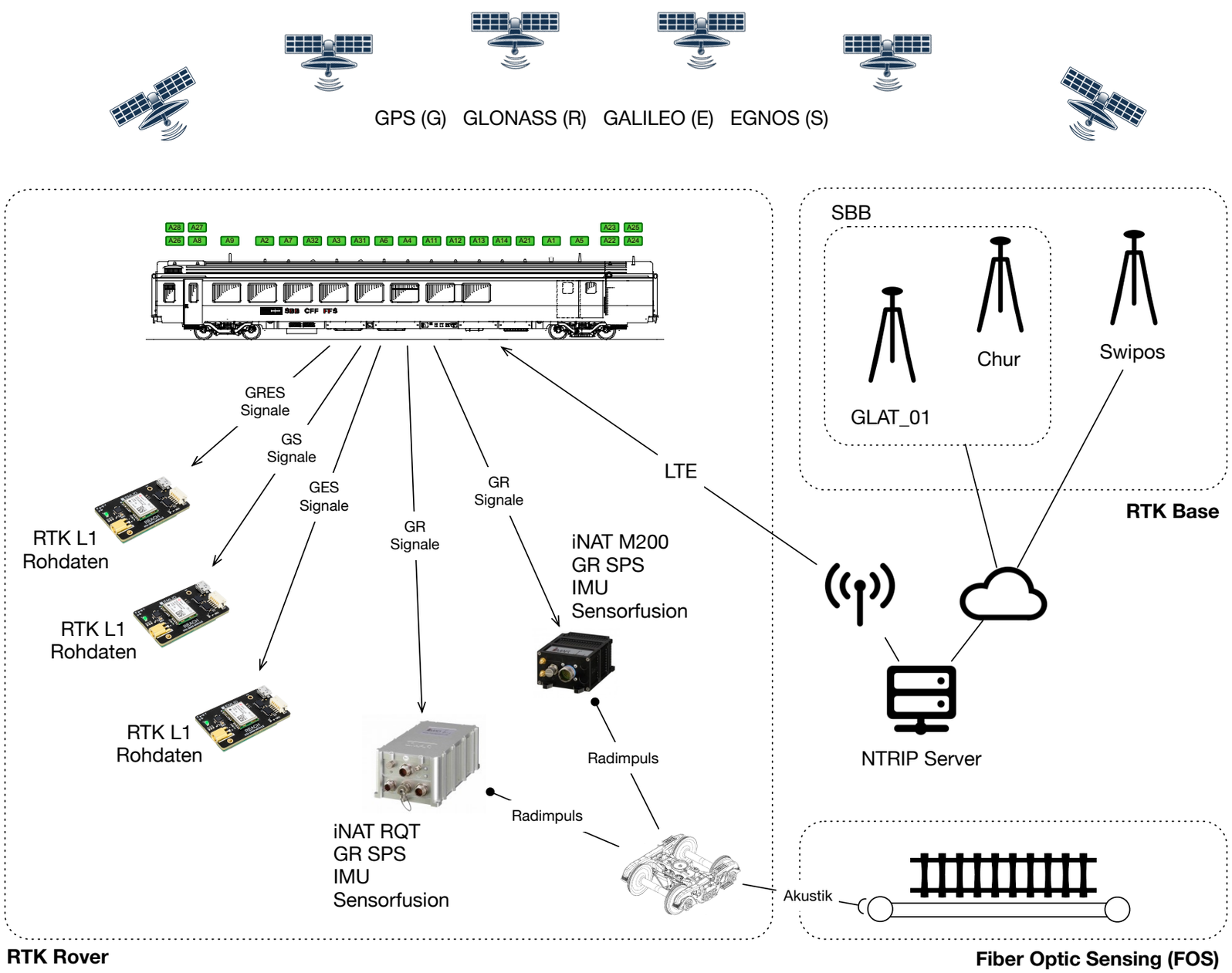
- localisation,
- supervision/monitoring (integrity),
- interfacing with e.g. interlocking.

The fusion of sensors works sequentially in two stages, on the level of the OnBoard and the Server.



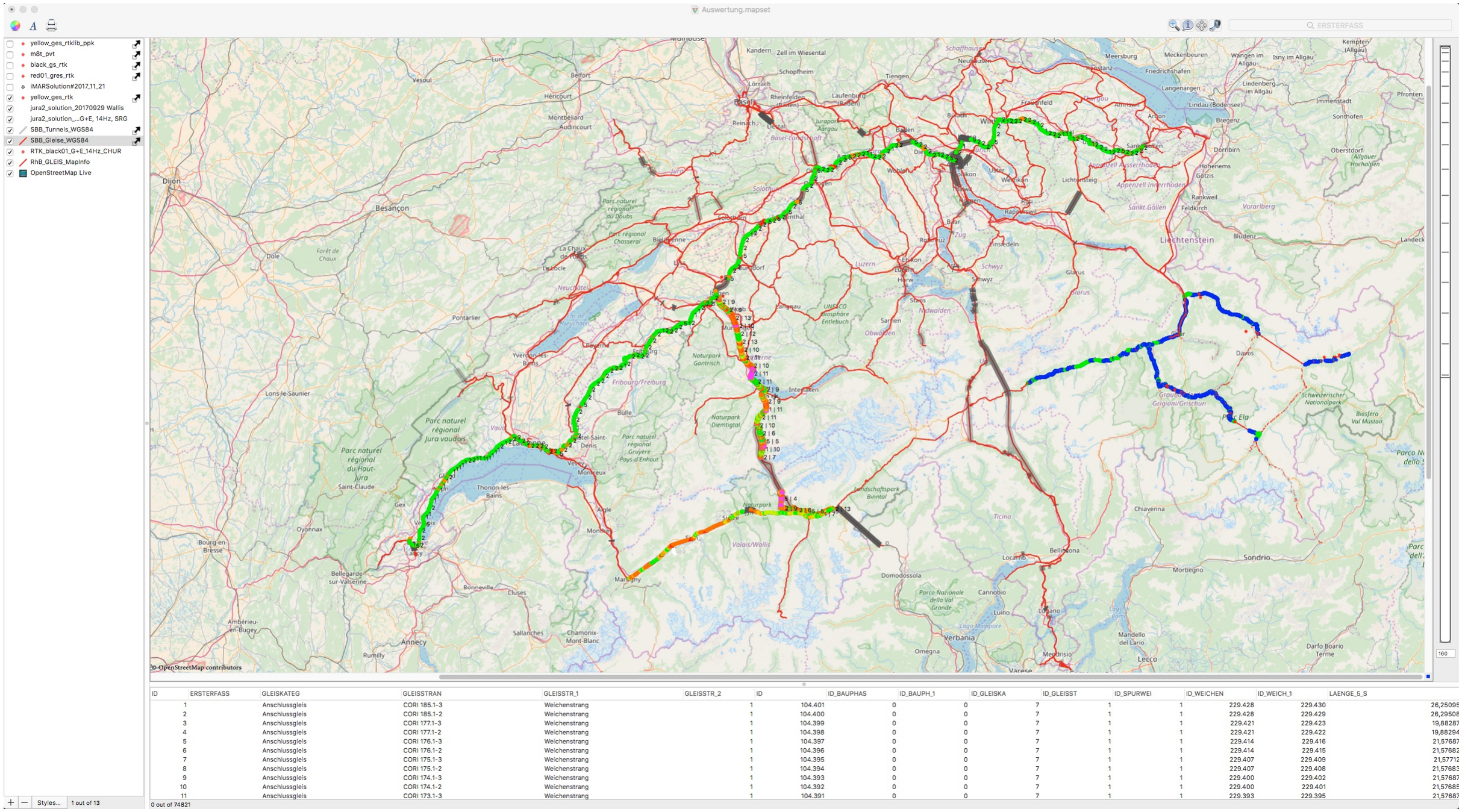
Results

Phase 0 - Trials



Results

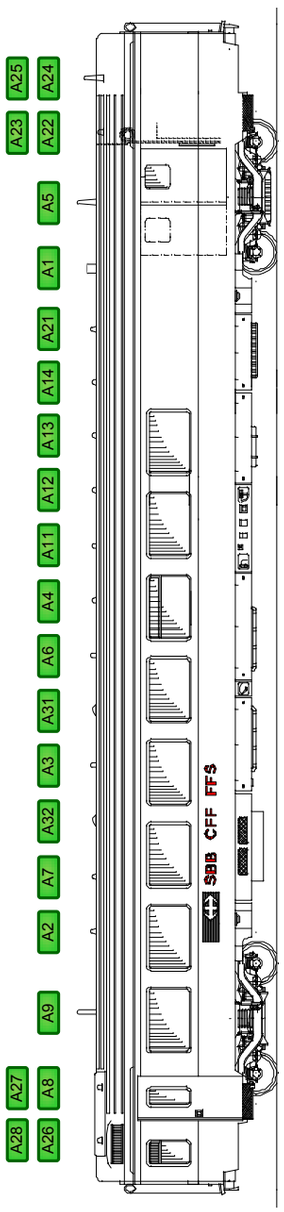
Phase 0 - Trials



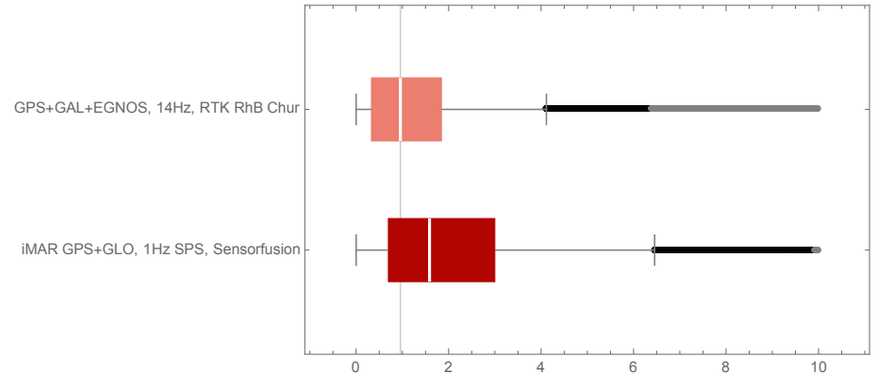
ID	ERSTERFASS	GLEISKATEG	GLEISSTRAN	GLEISSTR_1	GLEISSTR_2	ID	ID_BAUPHAS	ID_BAUPH_1	ID_GLEISKA	ID_GLEISST	ID_SPURWEI	ID_WEICHEN	ID_WEICH_1	LAENGE_5_S
1		Anschlussgleis	CORI 185.1-3	Weichenstrang		1	104.401	0	0	7	1	1	229.428	229.430	26,25095
2		Anschlussgleis	CORI 185.1-2	Weichenstrang		1	104.400	0	0	7	1	1	229.428	229.429	26,29508
3		Anschlussgleis	CORI 177.1-3	Weichenstrang		1	104.399	0	0	7	1	1	229.421	229.423	19,88287
4		Anschlussgleis	CORI 177.1-2	Weichenstrang		1	104.398	0	0	7	1	1	229.421	229.422	19,88294
5		Anschlussgleis	CORI 176.1-3	Weichenstrang		1	104.397	0	0	7	1	1	229.414	229.416	21,57687
6		Anschlussgleis	CORI 176.1-2	Weichenstrang		1	104.396	0	0	7	1	1	229.414	229.415	21,57682
7		Anschlussgleis	CORI 175.1-3	Weichenstrang		1	104.395	0	0	7	1	1	229.407	229.409	21,57712
8		Anschlussgleis	CORI 175.1-2	Weichenstrang		1	104.394	0	0	7	1	1	229.407	229.408	21,57683
9		Anschlussgleis	CORI 174.1-3	Weichenstrang		1	104.393	0	0	7	1	1	229.400	229.402	21,57687
10		Anschlussgleis	CORI 174.1-2	Weichenstrang		1	104.392	0	0	7	1	1	229.400	229.401	21,57685
11		Anschlussgleis	CORI 173.1-3	Weichenstrang		1	104.391	0	0	7	1	1	229.393	229.395	21,57687

Results

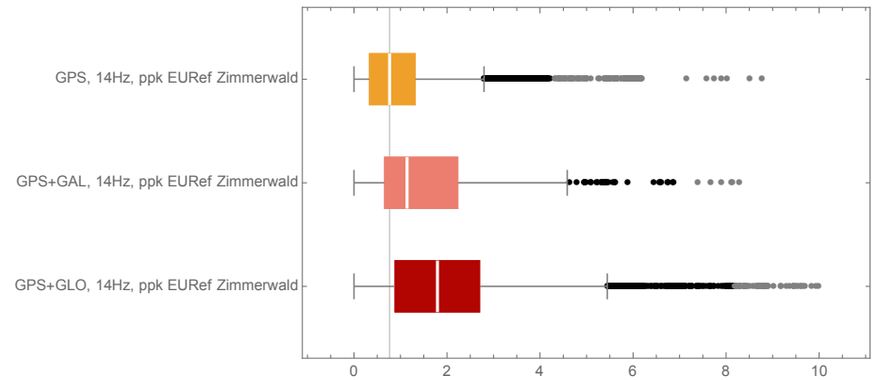
Phase 0 - Trials



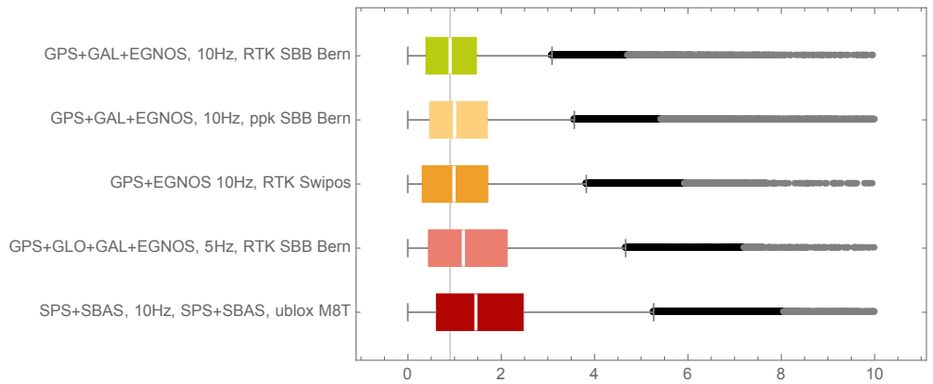
cross track (y)
[m]



RhB Netz
Engadin, Graubünden



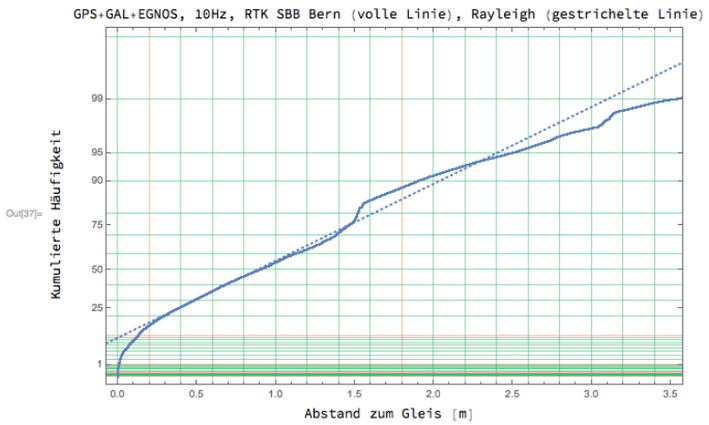
SBB Netz
Wallis, Aaretal



SBB NBS Netz
Genf <> St. Gallen

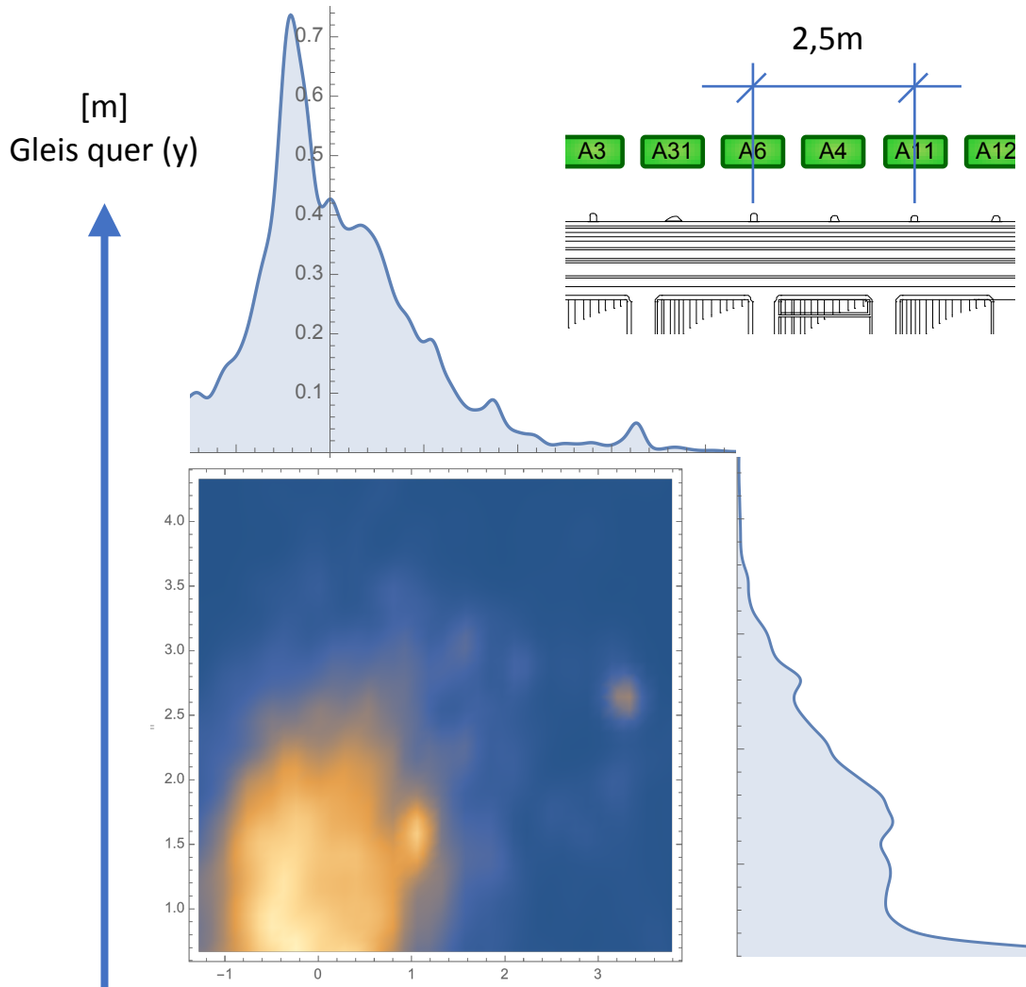
Cross Track Error:

50% within 1 Meter
75% within 1,5 Meter („track accuracy“)
90% within 2 Meter
97% within 3 Meter



Results

Phase 0 - Trials

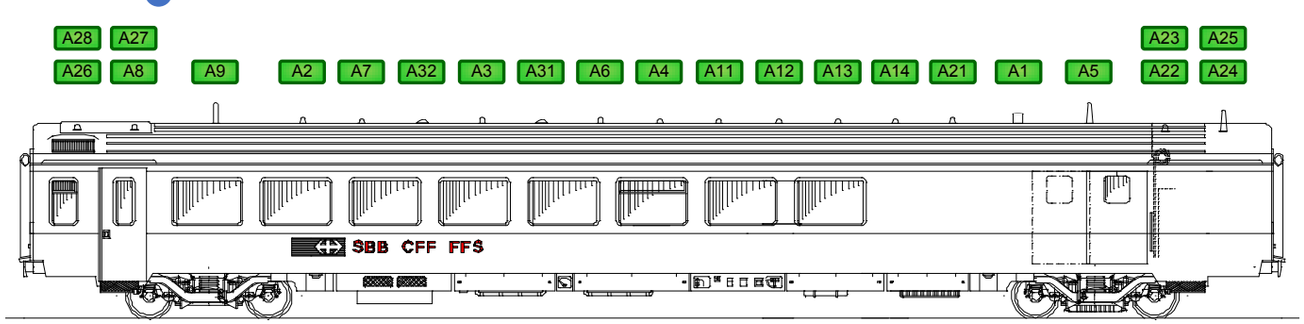


Statistik Gleis läng (x)
„Relative Baseline“ RTK GS (Antenne A6) und RTK GES (Antenne A11)
Antennen A6 und A11 Abstand: 2,5m
2D: σ = 0.96

Statistik Gleis quer (y)
RTK GS
Antenne A6

Rayleigh Verteilung
Skalen Parameter = 1,01343
und einer Standardabweichung σ **= 0,66**

$$\sqrt{2 * 0.66^2} = 0.933$$



Results

Phase 0 - Trials

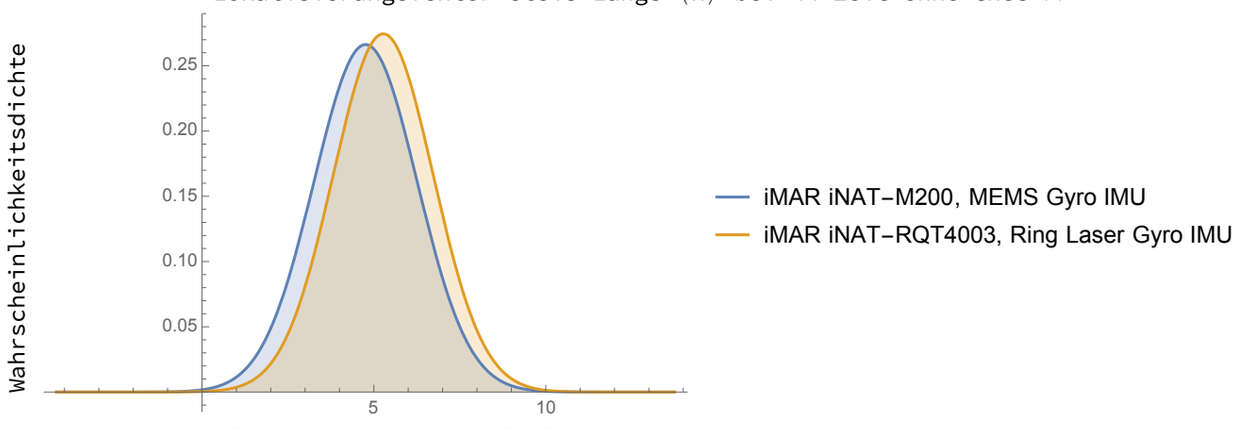
Geschwindigkeit Triebfahrzeug [m/sec] 30

Lokalisierungsobjekt 1 Sigma GNSS Fehler [m] 0.7

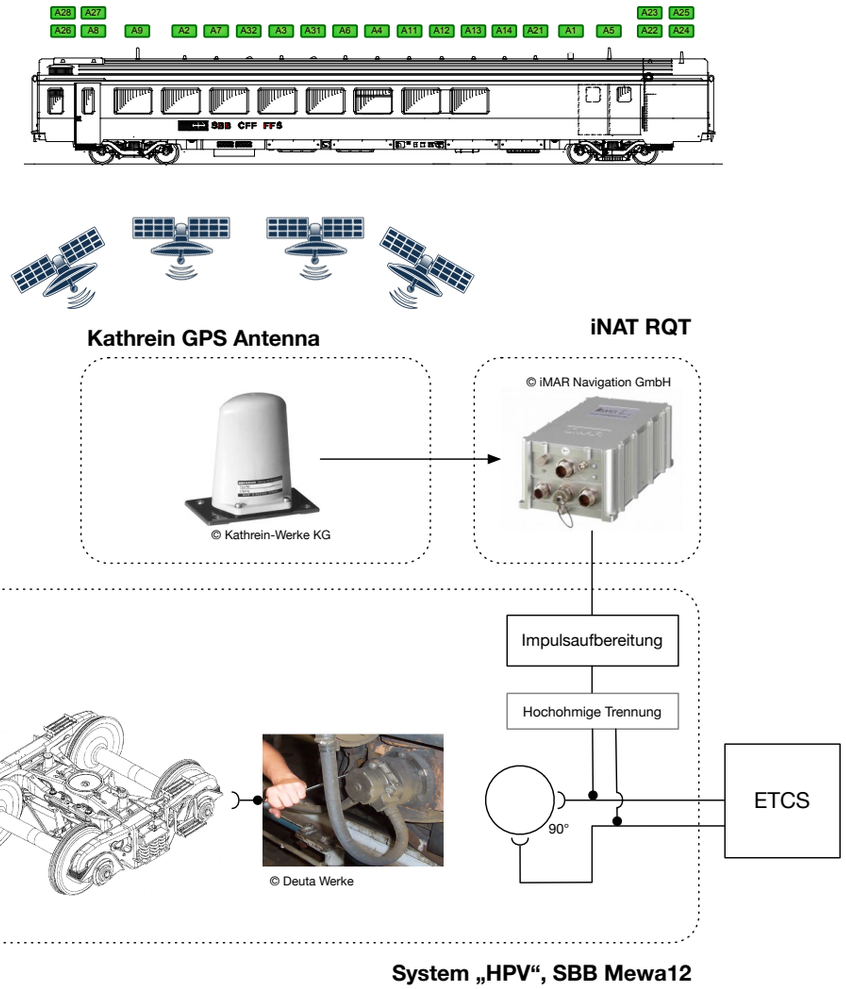
Zeit ohne GNSS, IMU in << Dead Reckoning >> (z.B. im Tunnel) [sec]

```
Zeit ohne GNSS d.h. im 'Dead Reckoning' → 2. [min]
Zurückgelegte Strecke → 3600. [m]
μ Fehler Lokalisierung M200 → 4.75979 [m] - mit einem - σ Lokalisierung M200 → 1.4984 [m]
μ Fehler Lokalisierung RQT → 5.2727 [m] - mit einem - σ Lokalisierung RQT → 1.45362 [m]
iNAT M200: Wahrscheinlichkeit [%] 10 Meter Grenze Gleis Längs (x) zu überschreiten → 0.0240
iNAT RQT: Wahrscheinlichkeit [%] 10 Meter Grenze Gleis Längs (x) zu überschreiten → 0.0570
```

Lokalisierungsfehler Gleis Längs (x) bei << Zeit ohne GNSS >>



Verteilung Lokalisierungsfehler [m] bei << Zurückgelegte(r) Strecke >>



Weg-Fehler kalibriert nur 0.2 ‰

Summary / Conclusions

- We developed procedures to derive train location system performance requirements (accuracy, reliability (RAMSS)) from Use Cases, Statistics and Norms.

- Based on «best practices» and analogies (or «lessons learned») from different application domains and current state of the art in railway (localisation) we suggest a multi-sensor system for safe train localisation.

- First (early) results from a feasibility study within the SBB SmartRail 4.0 programme are promising in terms of accuracies. It seems feasible to achieve the requirements derived.

- Challenges are the difficult environment (i.e. ground based), stringent requirements on safety (up to SIL 4) and operational constraints (e.g. MTBF). The current focus of work lies on better understanding of performances of different sensors and their combinations (i.e. fusion) on a large network and hence the development of a reliable and certifiable accuracy estimation for errors in 3D and the time domain.