

# Technologiebericht PoC GLAT

2019

## smartrail 4.0 - Technologiebericht PoC GLAT

Status	Final
Version	Version 1.00 (Version als Beilage für BAV Konzeptbericht)
Letzte Änderung	29. Januar 2020
Urheberrecht	Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.
Ablage	<a href="https://sbb.sharepoint.com/sites/glat/Freigegebene%20Dokumente/General/29_Machbarkeit%20(TP-E)/30_Technologiebericht/06_V_Ver%C3%B6ffentlichung">https://sbb.sharepoint.com/sites/glat/Freigegebene%20Dokumente/General/29_Machbarkeit%20(TP-E)/30_Technologiebericht/06_V_Ver%C3%B6ffentlichung</a>

# Inhaltsverzeichnis

1	Präambel .....	5
1.1	Autoren Technologiebericht.....	5
2	Gesamtsicht Technologie PoC GLAT.....	6
2.1	Zielsetzung .....	6
2.2	Ausgangslage .....	6
2.3	Ergebnisse und Erkenntnisse der Konzeptphase .....	7
3	Internationale Standardisierung.....	8
3.1	International abgestimmte und zertifizierbare Architektur .....	8
4	Funktionsprinzipien.....	10
4.1	Sicherheitslogik der Fahrerlaubnis (Movement Authority, MA) .....	10
4.2	Zuglänge / Zugintegrität.....	10
4.3	Ermittlung der Gleisbelegung (OTOD- und TTOD-Bereiche).....	11
4.4	Lokalisierung entlang einer bekannten Fahrstrasse.....	12
4.5	Always on, Always connected, Always localized.....	13
5	Infrastrukturbedarf .....	14
5.1	Ausgangslage und Zielsetzung .....	14
5.2	Systemannahmen.....	14
5.3	Einfluss auf Infrastrukturbedarf.....	15
5.4	Erkenntnisse und weiteres Vorgehen.....	17
5.5	Abschätzung der Anzahl Balisen für die Performanz der Ortung.....	17
6	Sensorik und Ground Truth .....	20
6.1	Ausgangslage der Multisensorik.....	20
6.2	Ground Truth .....	21
7	System Architektur.....	23
7.1	GLAT im Kontext von smartrail 4.0.....	23
7.2	System Architektur GLAT .....	23
7.3	Erwartungen und Anforderungen an Umsysteme .....	27
8	Messaufbau und Auswertungsplattform LocLab .....	29
8.1	Aufbau SBB Funkmesswagen «mewa12» .....	29
8.2	Eingesetzte Sensor Produkte .....	30
8.3	LocLab .....	30
8.4	Generierung der «Ground Truth» .....	33
9	Ergebnisse.....	36
9.1	Übersicht Messreihen .....	36
9.2	GNSS Abdeckung des SBB Gleisnetzes durch die vom Funkmesswagen erhobenen Daten 36	
9.3	Überprüfung GNSS Empfangscharakteristik anhand der Energiezähler GPS Daten.....	38
9.4	Relative Lokalisierung mit Trägheitsnavigation (IMU+ODO).....	43
9.5	Absolute Lokalisierung – Ermittlung der GNSS Genauigkeit und Präzision pro Sensor und Methode.....	53

9.6	GNSS «Lücken» entlang der Gleise.....	55
10	Weitere Lokalisierungsanwendung und Technologien.....	61
10.1	Zugende-Tag 1 .....	61
10.2	Zugende-Tag 2 .....	62
10.3	Visuelle Odometrie, Video Lokalisierung.....	64
11	Referenzen .....	69
12	Glossar .....	70

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Interface Architektur aus der RCA Beta Architektur (Stand 26.08.2019).....	8
Abbildung 4-1:	Illustration der OTOD- und TTOD-Bereiche.....	11
Abbildung 6-1:	GLAT Multisensorik.....	20
Abbildung 7-1:	Ausschnitt aus der RCA Architektur mit den in grün hervorgehobenen Fokusbereichen für GLAT .....	23
Abbildung 7-2:	Vereinfachte Darstellung der Positionsbestimmung im Kontext der funktionalen Architektur.....	24
Abbildung 7-3:	Exemplarischer GLAT System-Kontext (Schnittstellen anhand Komponentenmodell) 25	
Abbildung 7-4:	Vereinfachtes Format der Positionsdaten anhand des RCA Komponentenmodells ....	26
Abbildung 7-5:	Illustration einer Position im Knoten/Kanten-Modell .....	27
Abbildung 8-1:	Aufbau PoC Datenerfassung, SBB Telekommesswagen (www.railcom.org).....	29
Abbildung 8-2:	Funktioneller Aufbau der SBB Big Data Plattform «LocLab» .....	31
Abbildung 8-3:	Werkzeuge der SBB Big Data Plattform .....	32
Abbildung 8-4:	Semantik des GTG-Netzes .....	32
Abbildung 8-5:	Präzision GNSS/INS .....	34
Abbildung 9-1:	Abdeckung Messfahrten mit dem Funkmesswagen .....	37
Abbildung 9-2:	Strecke, Puffer und Messpunkte .....	39
Abbildung 9-3:	Beispiel-Histogramme der median Anzahl Satelliten für ausgesuchte Fahrzeugtypen. Die x-Achse ist die Anzahl empfangener Satelliten, die y-Achse die prozentuale Verteilung .....	40
Abbildung 9-4:	GPS+GLONASS Empfang entlang des Schweizer Bahnnetzes .....	41
Abbildung 9-5:	GPS+GLONASS Empfang - Ausschnitt.....	42
Abbildung 9-6:	Variation des Empfangs innerhalb kurzer Distanz in Olten Süd .....	42
Abbildung 9-7:	Ausgewertete Tunneldurchfahrten RQT .....	45
Abbildung 9-8:	Ausgewertete Tunneldurchfahrten M200 .....	45
Abbildung 9-9:	Ausgewertete Tunneldurchfahrten RQT und M200 .....	46
Abbildung 9-10:	Tunneldurchfahrten RQT als Stochastischer Prozess .....	47
Abbildung 9-11:	Fehler über Distanz Sensoren RQT/M200.....	48
Abbildung 9-12:	Modell des Fehlers RQT als Funktion der Länge des Tunnels.....	49
Abbildung 9-13:	Modell des Fehlers M200 als Funktion der Länge des Tunnels .....	49
Abbildung 9-14:	Fehler über die Zeit Sensoren RQT/M200.....	50
Abbildung 9-15:	Modell des Fehlers RQT als Funktion der Dauer der Tunneldurchfahrt.....	51
Abbildung 9-16:	Modell des Fehlers M200 als Funktion der Dauer der Tunneldurchfahrt.....	51
Abbildung 9-17:	Verteilungen der gemessenen Fehler (i.e. Genauigkeit) der einzelnen GNSS Sensoren/Methoden .....	54
Abbildung 9-18:	Box Whisker Darstellung der Länge der Lücken.....	58
Abbildung 9-19:	Messfahrt vom 07.08.2018, Detail Bellinzona.....	59
Abbildung 9-20:	Messfahrt vom 07.08.2018, Detail bei Staufen .....	60

Abbildung 10-1: ZET1 mit Modifikation der Exzentersicherung durch eine zusätzliche Rändelschraube ..... 61

Abbildung 10-2: SBB Cargo Flachwagen Versuchsaufbau ZET2 Version1 ..... 62

Abbildung 10-3: GNSS Empfangsdaten im Rangierfeld Güterbahnhof Muttenz ..... 63

Abbildung 10-4: GNSS, IMU und Odometrie fusionierte Datenauswertung im Rangierfeld Güterbahnhof Muttenz ..... 63

Abbildung 10-5: ZET2 Version2 auf Funkmesswagen mewa12 installiert ..... 64

Figure 10-6: The data acquisition system located in the control wagon. .... 65

Figure 10-7: Velocity plot derived from the absolute scale estimation using the template matching technique. The steps due to the pixel quantization show the necessity for sub-pixel processing (blue) compared to pixel-accurate method (red). .... 66

Figure 10-8: The train reference path (from Google Earth) from Ostermündingen to Thun is shown in red. The calculated path using the optical flow with essential matrix and absolute scale estimation is shown in blue..... 67

Figure 10-9: the pose calculation results for a given April tag when passing by with the measurement train are shown. The table shows the values for 9 consecutive image frames while the train covers a distance of approx. 5 m. .... 68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Anzahl Performanz-Balisen ..... 19

Tabelle 8-1: Sensor Produkte, Hersteller und Einsatzbereich ..... 30

Tabelle 9-1: Verfügbarkeit präziser Punkte (< 1 m) nach Sensoren und Methode ..... 55

Tabelle 9-2: Übersicht über Längen der GNSS Lücken ermittelt pro Sensor und Methode ..... 57

# 1 Präambel

Der „Technologiebericht PoC GLAT“ beschreibt den Status aller Aktivitäten, die in den letzten 18 Monaten durch die Beauftragung des Technologie PoC GLAT vom 6. Juni 2018 ausgelöst wurden.

Nach der Veröffentlichung des Zwischenberichtes [1] Anfang 2019 wurde auf Antrag der Projektleitung GLAT entschieden, den Fokus der Aktivitäten auf die Sensortechnologien: GNSS, IMU und Rad Odometrie sowie deren Fusion zu legen. Ein Technologiebericht für die ebenfalls untersuchten unterstützenden Technologien FOS und Video ist für das zweite Quartal 2020 in Auftrag gegeben worden.

Im Vergleich zum Zwischenbericht [1] sind im Technologiebericht viele der qualitativen Aussagen nun auf Basis von Messungen quantitativ ausgewertet und dargestellt. Der Bericht fokussiert auf die Fragestellung, ob und unter welchen Voraussetzungen eine technische und architektonische Machbarkeit des GLAT-Systems gegeben ist.

Zielpublikum/Adressat

Der Technologiebericht adressiert das Kernteam smartrail 4.0, das BAV und alle interessierten smartrail 4.0 Partner. Er wird dem Kernteam im Dezember 2019 präsentiert und dann auf <https://smartrail40.ch/> veröffentlicht.

## 1.1 Autoren Technologiebericht

Name	Firma	Funktion im Projekt GLAT	Mitarbeit in Kapitel
Urs Ackermann	SBB smartrail 4.0	Projektleiter GLAT und AWAP	1, 2.1, 2.2, 9.1
Simon Müller	IBM Schweiz AG	Systemarchitekt GLAT	3, 4, 6, 7, 8 ohne 8.4
Dr. Alex Brand	SBB smartrail 4.0	Programmleiter LCS	2.3 sowie diverse Ergänzungen Kap. 5-9
Stéphane Kaloustian	SBB smartrail 4.0	Architekt GLAT	3, 4, 5, 7, 9.3
Dr. Raoul R. Schild	Schild & Partner GmbH	Experte Lokalisierung (Technologie und System Design)	6, 8 ohne 8.3 9 ohne 9.3, 10.1, 10.2
Andreas Bomonti	SBB IT	Big Data Spezialist	8.3
Sebastian Ohrendorf-Weiss	SBB smartrail 4.0	Projektleiter GLAT	10 ohne 10.3
Dr. Christian Robl	M2C ExpertControl GmbH	Experte Lokalisierung, CENELEC	10.3
Dr. Daniele Capriotti	M2C ExpertControl GmbH	Video-Verarbeitung	10.3

## 2 Gesamtsicht Technologie PoC GLAT

### 2.1 Zielsetzung

Der Technologie PoC verfolgt folgende Zielsetzungen:

- Optimierung und Validierung der Positionsgenauigkeit mittels Kombination von unterschiedlichen Sensorfusionen auf einer Post-Processing Plattform in den Anwendungen On Board Unit (OBU) und Zug-Ende Tag (ZET) im Vergleich zur Trassentopographie.
- Aufbau einer Post-Processing Plattform für den PoC, die dann auch für die CENELEC Phasen genutzt werden kann.
- Erweiterung und Kombinierung der Lokalisierungs-Technologien GNSS, IMU, Odometrie, FOS und optischer Sensorik zur Optimierung der Abdeckung und Genauigkeit möglichst auf dem ganzen Streckennetz der Normalspurbahnen der Schweiz. Wobei die Resultate von FOS und der optischen Sensorik im April 2020 in einem eigenen Technologiebericht zusammengefasst werden.
- Optimierung und Validierung der Zugintegrität und sicheren Zuglänge durch das Post-Processing von On Board Unit mit Positionsdaten des Zug-Ende Tags von gleichen Messfahrten.
- Vorbereitung und Durchführung einer Ausschreibung und Vergabe für die CENELEC Phasen 1-4 LCS-GLAT. Die Ausarbeitung der Dokumente für Phase 1 bis 4 ist nicht Gegenstand des Technologie PoCs.

Zur Optimierung und Prüfung werden Messeinrichtungen aufgebaut und Messfahrten mit den unterschiedlichen Sensor-Technologien in den Anwendungen OBU und ZET durchgeführt. Zudem werden Messdaten von I-EN (Energie Verrechnungsdaten) in die Untersuchungen einbezogen.

In einem Post-Processing werden die Messresultate fusioniert und die Qualität der Resultate mit den gefahrenen Gleistopologie-Daten verglichen.

Ein extern und intern zusammengestelltes Lokalisierungs-Experten-Team definiert, plant und führt die Messfahrten durch und unterstützt die Fusionen, Analysen und Optimierungen.

Die Erkenntnisse werden dem Kernteam SR4.0 vorgestellt und fliessen kontinuierlich in den Anfang 2019 gestarteten CENELEC Prozess ein. Der Technologie PoC wird mit dem Ziel, die technischen Optimierungen und Validierungen zu unterstützen weitergeführt.

### 2.2 Ausgangslage

Lokalisierung ist im Bereich der Sicherungstechnik unverzichtbar. Heute wird die Lokalisierung streckenseitig mit Gleisfreimeldern, Balisen oder Lokalisierungstafeln für den Störfall sichergestellt. Der Nachteil davon sind die hohen Kosten dieser Aussenanlagen und hohe Reserven in der Belegung (suboptimale Nutzung der Trassenkapazität).

Für einen nächsten Schritt in der Bahnautomatisierung wird u.a. zentral sein, alles auf dem Gleis in Echtzeit „elektronisch“ sichtbar und steuerbar zu machen, jede Bewegung und Belegung zu beobachten und abzusichern sowie den „Faktor Mensch“ in den sicheren Prozessen zu reduzieren.

Im Projekt LCS-GLAT wurde per Ende 2017 ein umfangreiches Whitepaper erstellt basierend auf theoretischen Betrachtungen, Simulationen und ersten Messungen mit dem Ziel die streckenseitige Infrastruktur durch fahrzeugseitige Lokalisierungstechnologie zu ersetzen.

Die Messungen wurden Mitte 2018 mit dem Projekt Technologie PoC GLAT erweitert. Erste Resultate sind im Zwischenbericht [1] Anfang 2019 auf <https://smartrail40.ch/> veröffentlicht.

Diese Erkenntnisse bilden die Basis der hier vorgelegten PoC Phase.

## 2.3 Ergebnisse und Erkenntnisse der Konzeptphase

Für die **Lokalisierung** konnten im Vergleich zum BAV Zwischenbericht [1] (Stand Mitte 2018) über ein teilautomatisiertes Mess-Setup auf dem Telekom Messwagen substanziell mehr Messdaten mit der Sensorkombination Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Trägheitsnavigation (IMU, Inertial Measurement Unit) und Odometrie/Radsensor erfasst und ausgewertet werden. Verarbeitet und ausgewertet wurden die Daten auf der SBB Big Data Plattform und mittels eigens entwickelter Methoden und Verfahren.<sup>1</sup> Auf Basis der eigenen Erkenntnisse und weiterer ähnlicher Aktivitäten in Europa muss aber festgestellt werden, dass infolge nach wie vor offener Fragen (insbesondere zur Integritätsüberwachung der absoluten Positionsmessungen durch GNSS) der mögliche Beitrag von GNSS zu einer SIL 4 Lokalisierungsplattform für die Zugspitzenlokalisierung noch nicht geklärt ist. Es ist weitere Grundlagenarbeit notwendig, die unter anderem im Rahmen eines Horizon 2020 Projekts (EU Förderungsprogramm) zusammen mit der DB, der SNCF und industriellen Partnern ab Ende 2019 geleistet werden soll. Als Alternative zu GNSS bietet sich für die absolute Positionsmessung auch die optische Lokalisierung (Bildverarbeitung) an. Im Rahmen von Messfahrten mit alternativer Sensorik bestätigte sich ihr Potenzial. Es ist davon auszugehen, dass sie im Zeitraum ab 2030 eine entscheidende Rolle spielen wird, um die Ziele von smartrail 4.0 vollständig erreichen zu können. In Anbetracht der noch fehlenden Reife dieser Ansätze wird für den SR40 Rollout auf Einzelstrecken bis 2030 noch nicht mit primär zuggestützter Lokalisierung gerechnet. Eine Verbesserung der Sensorik auf dem Zug (bessere Odometrie) soll aber die Anzahl benötigter Positionierungs-Balisen im Vergleich zu heute reduzieren.

Für Moving-Block-Betrieb (ETCS Level 3) muss neben der genauen Lokalisierung der Zugspitze auch die Zugintegrität überwacht werden und die sichere Zuglänge bekannt sein. Für Triebzüge lässt sich die Aufgabe über einen Zugbus, für Züge mit Führerständen vorne und hinten mit der von ETCS Level 2 bekannten Lokalisierung lösen. Für Güterzüge, Bauzüge und Unterhaltsfahrzeuge steht eine noch zu entwickelnde zuggestützte Lokalisierungslösung im Vordergrund. Die SIL Anforderungen an die Zugintegrität wurden analysiert und aufgrund der Ergebnisse (SIL 2 oder kleiner) die Thematik der GNSS-basierten Zugende-Tags weiterverfolgt in den Varianten «mobiles, steckbares Zugende-Tag ZET1» und «fest integriertes Zugende-Tag ZET2». Erste Messungen mit einem «Messprototypen» wurden durchgeführt, auf deren Basis der Auftrag für ein integriertes Funktionsmuster erteilt wurde, um der Klärung der Machbarkeit näher zu kommen. Ziel ist, ab 2030 eine Lösung bereitstellen zu können.

In Summe ist die definitive Machbarkeit der zuggestützten Lokalisierung noch nicht geklärt, aber vielversprechende technische Ansätze wurden identifiziert. Die verbleibende Unsicherheit ist im Rahmen von SR40 insofern berücksichtigt, als die Planungsprämissen von einer graduellen Einführung dieser Technologien ausgeht und die Architektur von SR40 in der Zwischenzeit auch mit streckengebundener Lokalisierung bereits eine dichtere Zugfolge ermöglicht.

---

<sup>1</sup> Umgesetzt in Wolfram Mathematica 12.

### 3 Internationale Standardisierung

#### 3.1 International abgestimmte und zertifizierbare Architektur

Smartrail 4.0 hat sich das Ziel gesetzt, eine zertifizierbare Architektur zu definieren, die international abgestimmt und von der Industrie anerkannt ist. Um dieses Ziel zu erreichen, werden Anforderungen und Änderungswünsche, die sich aus smartrail 4.0 ergeben, in die internationalen Gremien eingebracht.

##### 3.1.1 RCA – Reference CCS Architecture

RCA ist eine Initiative von der ERTMS User Group (EUG) und EULYNX mit dem Ziel, eine harmonisierte und damit international interoperable Architektur für *Command and Control Systems (CCS)* zu definieren. Weitere Hintergrundinformationen zur RCA Initiative sind im *RCA White Paper*<sup>2</sup> beschrieben.

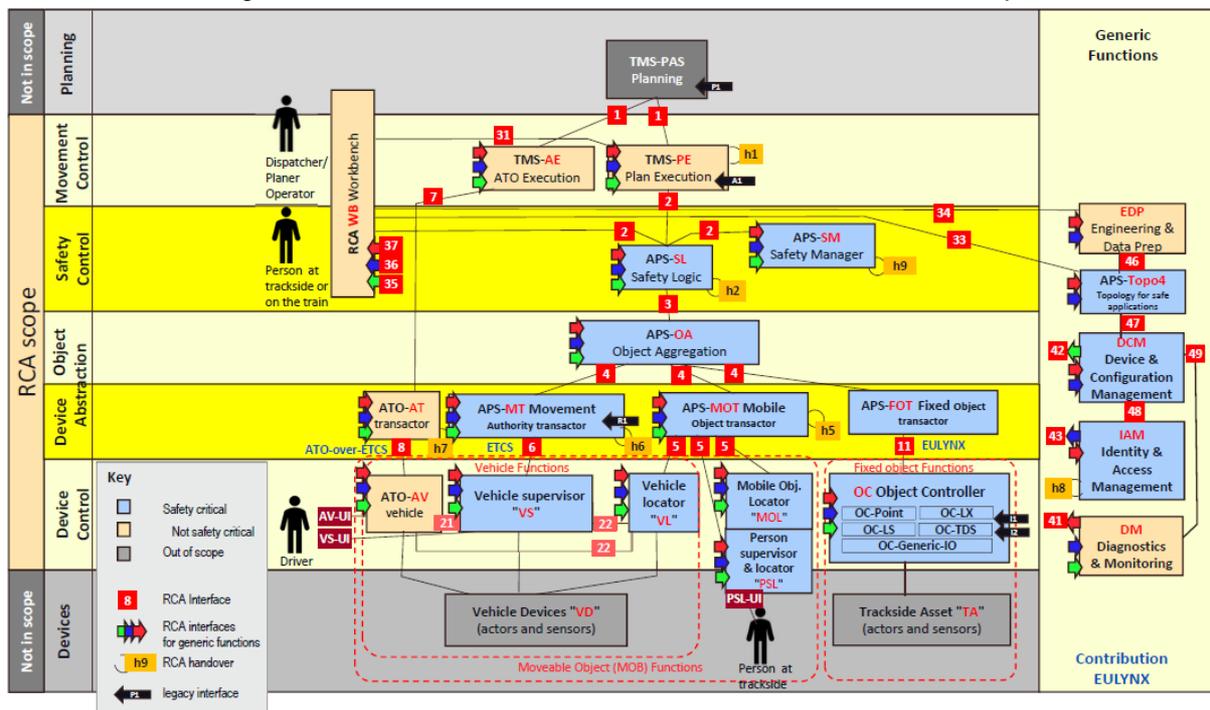


Abbildung 3-1: Interface Architektur aus der RCA Beta Architektur (Stand 26.08.2019)

##### 3.1.2 OCORA – Open CCS Onboard Reference Architecture

Das Ziel von OCORA bzw. des zugehörigen smartrail 4.0 Lösungsansatzes *CCS onboard application platform for trackside related functions (COAT)*<sup>3</sup> ist die Definition einer offenen, standardisierten Fahrzeugarchitektur für die fahrzeugseitig benötigten CCS Funktionen. CCS wiederum beschreibt alles was es braucht um Bewegungen sicher zu kontrollieren und Einschränkungen auf der Strecke zu bewältigen.

<sup>2</sup> <https://www.eulynx.eu/index.php/home2/37-reference-ccs-architecture-white-paper>

<sup>3</sup> [https://www.smartrail40.ch/index.asp?inc=programm/fahrzeugausruestung\\_coat.asp](https://www.smartrail40.ch/index.asp?inc=programm/fahrzeugausruestung_coat.asp)

### 3.1.3 TSI - Technical Specifications for Interoperability

Um die internationale Interoperabilität weiter zu verbessern bedarf es Anpassungen und Erweiterungen des ETCS Standards, die auch die Grundkonzepte von RCA und OCORA mitberücksichtigen. Die wichtigsten Änderungswünsche, die aktuell diskutiert werden sind:

- Funktionale Aufteilung der ETCS Onboard Unit in eine Lokalisierungs- und eine Überwachungseinheit, d.h. in RCA-Terminologie die Aufteilung in Vehicle Locator (VL) und Vehicle Supervisor (VS).
- Nutzung einer «Karte» für eine sichere und genaue Lokalisierung. Als «Karte» ist die Gleisnetz-Topologie basierend auf einem Knoten/Kanten-Model mit zusätzlichen Topografie-Schichten (z.B. Tunnelanfang/-ende, Brücke/Bahnübergang, Gradienten, Radien, Überhöhungen) zu verstehen.
- Evolution der ETCS Referenzierungsprinzipien, die in Baseline 3 exklusiv auf physischen Balisen beruhen, so dass in Zukunft auch andere Ortsreferenzen im Rahmen neuer Lokalisierungstechnologien verwendet werden können.

Die Änderungswünsche werden in der «Localisation Working Group» der ERTMS Users Group zwischen Bahnen und unter Berücksichtigung von RCA und OCORA Lokalisierungsaspekten abgestimmt. Dieser Prozess führt zu Änderungsanträgen für den nächsten TSI.

### 3.1.4 CLUG – Certifiable Localisation Unit with GNSS in the railway environment

Das Konsortiums CLUG setzt sich für das Projekt folgende Ziele:

- Definition der Missionsanforderungen einer Zugspitzenlokalisierungseinheit
- Definition einer zertifizierbaren Architektur, bestehend aus einem Koppelnavigationskern (Trägheitsplattform, Odometer), der als Orts-Referenz GNSS, Gleistopografie und Balisen verwendet. Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist die Reduktion der Anz. benötigten Balisen im Vergleich zu heute.
- Machbarkeitsnachweis einer Multi-Sensor Vorgehensweise
- Entwurf der Werkzeuge und Prozesse für die Zertifizierung einer onboard Lokalisierungseinheit Die SBB wird in Anforderungen, Architektur und nicht zuletzt in der Acquisition von Testdaten involviert sein.

## 4 Funktionsprinzipien

### 4.1 Sicherheitslogik der Fahrerlaubnis (Movement Authority, MA)

Das Grundprinzip der smartrail 4.0 Sicherheitslogik besagt, dass die Fahrt eines schienengebundenen Objektes nur für den Bereich der Genehmigung erlaubt und möglich sein darf. Das heisst, dass ein Fahrzeug seine Fahrerlaubnis (Movement Authority) autonom einhalten muss. Um dieses Grundprinzip zu erfüllen, beliefert der Vehicle Locator (VL) den Vehicle Supervisor (VS) mit Lokalisierungsinformationen (Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, etc.). Der VS stellt sicher, dass das Fahrzeug innerhalb seiner Fahrerlaubnis (MA) bleibt.

### 4.2 Zuglänge / Zugintegrität

Das Funktionsprinzip zur Zuglänge/-integrität sieht vor, dass die Zuglänge auch zukünftig, mit smartrail 4.0, durch den Lokführer eingegeben wird. Je nach technologischer Grundausstattung des Zuges wird die Länge und Integrität jedoch unterschiedlich validiert bzw. überwacht. Die Integrität kennt folgende Ausprägungen: unbekannt, Lokführer bestätigt, maschinell bestätigt, Integrität verloren.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird zwischen „intelligenten Zugkompositionen“ (z.B. P-Züge) und „Züge ohne eingebautes Bussystem“ (z.B. Cargo-Züge, Bauzüge) unterschieden.

Je nach Funktion, für welche die nachfolgend beschriebenen Ansätze zugelassen werden können, ergeben sich folgende Funktionsprinzipien:

1. Die **absolute Position** des Zuges wird anhand von bordseitigen Messungen aktualisiert.
2. Die **Länge** des Zuges wird anhand von bordseitigen Messungen aktualisiert.
3. Die **Integrität** des Zuges wird anhand von bordseitigen Messungen überwacht.

*Bemerkung: Ein Zug kann nicht nur eine sondern zwei Längen besitzen, d.h. nach vorne und nach hinten von der Lok aus gemessen. Die Funktionsweise und entsprechende TSI<sup>4</sup> Änderungsanträge werden in internationalen Gremien besprochen, ändern nach aktuellem Kenntnisstand aber nichts am aktuellen Konzept.*

#### 4.2.1 Intelligente Zugkomposition (z.B. Personen-Zug)

Es werden zwei Arten von intelligenten Zugkompositionen betrachtet:

- a) Die vom Lokführer eingegebene Länge wird gegen die technisch ermittelte Länge der Zugkomposition vor der Zugfahrt plausibilisiert, z.B. mit technischer Unterstützung von fahrzeugseitigen Systemen. Während der Zugfahrt überwacht das eingebaute Zugintegritätsüberwachungssystem (TIMS) die Integrität.  
*Anwendungsfall: Triebzug (im Regelbetrieb nicht trennbare, kurzgekuppelte Einheit)*  
**>> nur Integritätsüberwachung, keine Echtzeit-Überprüfung der Länge**
- b) Der Zug besitzt eine OBU pro Ende. Die Positionen beider Enden werden ans TIMS gemeldet, wodurch unter Einbezug geeigneter Regeln/Algorithmen und Topologie-Daten (z.B. Gleisgeometrie) die Zuglänge und die Integrität in Echtzeit plausibilisiert und überwacht werden. Je nach Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit einer sicheren Positionsbestimmung des Zuges entfällt das Bedürfnis an einer gleisseitigen Unterstützung der Zuglängen- bzw. Integritätsvalidierung.

<sup>4</sup> [https://www.era.europa.eu/activities/technical-specifications-interoperability\\_en](https://www.era.europa.eu/activities/technical-specifications-interoperability_en)

*Anwendungsfall: Pendelzug mit mehreren Führerständen, die zur Längenmessung beitragen*  
**>> Echtzeit-Überprüfung der Länge und Integrität**

#### 4.2.2 Zug ohne eingebautes Bussystem (z.B. Cargo-Zug, Bauzug)

Steht kein integriertes Bussystem zur Verfügung, das die Integrität der Zugkomposition überwachen kann bzw. ist «nur» eine OBU an der Zugspitze jedoch keine am Zugende vorhanden, so kann die Integritätsüberwachung durch temporär (TED) oder festmontierte Lokalisierungsmodule (TWD) sichergestellt werden. Ein Sensor-Mix ist einem rein auf GNSS-Ortung basierendem Lokalisierungsmodul vorzuziehen um auch bei fehlendem oder schlechtem Satellitenempfang die Gleisbelegungen hinter dem effektiven Zugende freigeben zu können. Im Rahmen dieses Technologieberichtes wird zwischen zwei Arten unterschieden.

- a) **Anbringbar (ohne feste Installation):** Prozessual am Ende des Zuges angebrachtes TED, ähnlich zu Funktionsmuster ZET1 (vgl. Kapitel 10.1), das virtuell mit der OBU der Zugspitze verbunden wird. Dadurch können die Zuglänge und Integrität, unter Einbezug geeigneter Regeln/Algorithmen und Topologie-Daten, in Echtzeit plausibilisiert und überwacht werden.  
**>> Echtzeit-Überprüfung der Länge und/oder Integrität**
- b) **Festmontiert:** TWD Lokalisierungsmodule werden permanent in Wagen verbaut, ähnlich zu Funktionsmuster ZET2 (vgl. Kapitel 0), wodurch der prozessuale Schritt zum Anbringen entfällt. Die Ausrüstung der gesamten europäischen Flotte (Cargo, Bauzüge, etc.) ist eher unwahrscheinlich im Hinblick auf den Zeithorizont bis 2040. Der Ansatz kann aber für Teilflotten interessant sein, insbesondere wo ähnliche Sensorik für die Automatisierung des Betriebs (z.B. bei SBB Cargo) in Prüfung ist.  
**>> Echtzeit-Überprüfung der Länge, Integrität oder Position eines jeden Wagens**

Weitere Optionen der Lok-seitigen Integritätsüberwachung wurden bisher nicht technologisch im Rahmen von smartrail 4.0 untersucht, da entweder die Fehleroffenbarungszeiten und mögliche Fehlerkennungen (false positives) der Technologien (z.B. Bremsleitungsdruck) oder der prozessuale Mehraufwand (z.B. temporäres Lokalisierungsmodul pro Wagen) nicht vielversprechend erschienen.

#### 4.3 Ermittlung der Gleisbelegung (OTOD- und TTOD-Bereiche)

Das Funktionsprinzip zur Ermittlung der Gleisbelegung sieht vor, dass die Gleisbelegung entweder vom Fahrzeug selbst oder in Kombination mit streckenseitiger Infrastruktur bestimmt wird. Erfolgt die Gleisfreimeldung ausschliesslich basierend auf Onboard Lokalisierungsinformationen, so handelt es sich um einen SR40 „**Onboard** Track Occupancy Detection (OTOD)“ Bereich. Wird zusätzlich auch (oder ausschliesslich) gleisseitige Infrastruktur für die Ermittlung der Gleisbelegung berücksichtigt, handelt es sich um einen „**Trackside** Track Occupancy Detection (TTOD)“ Bereich.

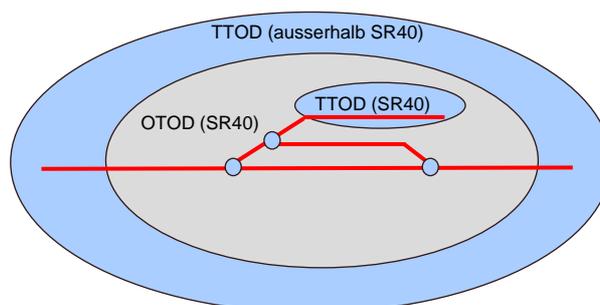


Abbildung 4-1: Illustration der OTOD- und TTOD-Bereiche

Der Vehicle Locator (VL) beliefert – entweder über den VS oder über den APS-MOT – den APS-OA mit Lokalisierungsinformationen, die zur Ermittlung der Gleisbelegung beitragen. Dies sind beispielsweise Position mit Vertrauensintervall, Geschwindigkeit, Länge, und Zugintegritätsstatus. APS-OA aggregiert die Lokalisierungsinformationen mit allenfalls vorhandenen streckenseitigen Daten (APS-FOT) und berücksichtigt die erteilte Bewegungserlaubnis (Movement Permission) von APS-MT um die Gleisbelegung zu ermitteln, zu erweitern und wieder freizugeben. Somit werden sowohl OTOD- wie auch TTOD-Bereiche vom selben Stellwerk gesichert.

#### 4.3.1 Trackside Track Occupancy Detection (TTOD)

TTOD ist der Bereich, der mittels Unterstützung streckenseitiger Infrastruktur (z.B. Gleisfreimelder) die Gleisbelegung erkennt. Die ausschliessliche Bestimmung der Gleisbelegung basierend auf streckenseitiger Infrastruktur entspricht dem heutigen Funktionsprinzip. Es soll zukünftig für Bereiche angewendet werden, wo keine sichere und genaue alleinige Onboard-Lokalisierung möglich ist oder eine Lokalisierungs-Initialisierung stattfinden muss (z.B. beim Verlassen des Rangierbereichs und Eintritt in einen OTOD Bereich).

#### 4.3.2 Onboard Track Occupancy Detection (OTOD)

OTOD ist der Bereich, in dem ausschliesslich mittels fahrzeugseitiger Infrastruktur die Belegung von Fahrzeugen auf dem Gleisnetz sicher und genau erkannt wird, indem die Position der Zugspitze und die validierte Länge in Kombination mit der überwachten Zugintegrität als Grundgrösse für die Gleisbelegung genutzt wird. Es entstehen nicht einfach Fahrzeuge im OTOD Bereich, sondern sie treten via TTOD ein. Als Eintrittsbedingungen in den OTOD Bereich muss

- a) das Gleis bekannt sein (z.B. Positionierung via Eurobalisen)
- b) das Fahrzeug identifiziert sein (z.B. Movement Permission für Fahrzeug erhalten)
- c) die Fahrzeuglänge zuverlässig validiert (z.B. zurückgelegter Weg zwischen der Zugspitze und der letzten Befahrung des GFMs ermitteln) und somit die Zugintegrität bestätigt sein

Ist mindestens eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, so darf die Fahrt in den OTOD Bereich nicht gewährt werden.

Die Onboard Lokalisierung wird eine in Echtzeit variierende Genauigkeit (Vertrauensintervall) vorweisen. Die Unverfügbarkeit bzw. die Degradation der Lokalisierungsperformanz in einem OTOD Bereich führt nicht zu Gefährdungen (Fail Safe Prinzip) sondern zu Kapazitätseinbussen, wenn Gleisbelegungen nicht wie geplant freigegeben werden können. Der Begriff der „Operationellen Verfügbarkeit“ unterscheidet sich in dem Sinne von den traditionellen RAM Begriffen.

Vereinen, Trennen und Wenden sind nur für Zugkompositionen erlaubt, die sowohl die Länge wie auch Zugintegrität selbst bestimmen können (vgl. Kapitel 4.2). Es gilt, dass die Summe der Längen der lokalisierten Zugkompositionen, die vereint oder getrennt werden, konstant bleiben müssen, damit keine Ausnahmebedingung in Bezug auf Sicherheit auftritt und auch weiterhin neue/aktualisierte Bewegungs- bzw. Fahrerlaubnisse ausgestellt werden.

Das Abstellen von nicht lokalisierten Einzelwagen in einem OTOD Bereich ist nicht erlaubt. Einzelwagen müssen daher in einem von streckenseitigen Gleisfreimeldeanlagen geschützten Bereich abgestellt werden.

Ein Fahrzeug im OTOD Bereich muss immer lokalisierbar sein, nicht zuletzt um ein ungewolltes Wegrollen zu detektieren und entsprechende Massnahmen einzuleiten (vgl. Kapitel 4.5).

### 4.4 Lokalisierung entlang einer bekannten Fahrstrasse

Die Lokalisierung des schienengebundenen Fahrzeuges wird beim Eintritt in den SR40 Bereich mit streckenseitiger Infrastruktur (z.B. Balisen) initialisiert, damit die gestellte Fahrstrasse mit der effektiven Gleisbelegung abgeglichen werden kann. Danach erfolgt die gleisgenaue Lokalisierung (Gleisselektivität) entlang einer bekannten Fahrstrasse. Die Architektur sieht die Möglichkeit vor, zukünftig die Gleisselektivität aus den fusionierten Sensor-Messungen zu etablieren. Wo dies mit den „neuen“ technologischen Lösungen (noch) nicht möglich ist, wird weiterhin auf Balisen gesetzt. Die Balisen dienen dazu, die absolute Gleisselektivität zu bestätigen, weil die relative Gleisselektivität, die durch die Kenntnis der eingestellten Fahrstrasse entsteht, nicht unbegrenzt lange als sicher (SIL4) gelten kann. Balisen sind auch in Anbetracht der Systemdegradation weiterhin von grossem Nutzen, so zum Beispiel, wenn das Fahrzeug nach einem Neustart der OBU seine Position nicht mehr garantieren kann, dienen zudem als Ortsreferenzen in Tunnels sowie – zumindest bis auf Weiteres – zur Sicherstellung einer minimalen Performance ausserhalb Tunnels.

#### 4.5 Always on, Always connected, Always localized

Das Grundprinzip sieht vor, dass die Onboard-Units eines schienengebundenen Fahrzeuges (bestehend aus VL und VS) im OTOD-Bereich stets im Modus „always on“ operieren, wobei sich jeweils nur eine pro Zug im Aktiv-Modus (leading) und die restlichen sich im Passiv-Modus (non-leading) befinden.

Die eindeutige Identifikation der Onboard-Units eines Zuges (z.B. ETCS NID\_ENGINE) werden zusammen mit der letzten Position auf dem Fahrzeug abgelegt, so dass bspw. im Fehlerfall bei einem Neustart der Onboard-Unit(s) eine Validierung der Position (auch vor der Überfahrt der nächsten Balisengruppe) vorgenommen werden kann.

Ein im TTOD abgestellter Zug soll, mit einer reduzierten Aufzeichnungsfrequenz, kontinuierlich seine aktuelle Position bestimmen, so dass auch ungewollte und unerlaubte Bewegungen detektiert (always localized) und dem Stellwerk automatisch mitgeteilt (always connected) werden können.

## 5 Infrastrukturbedarf

### 5.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Um den betrieblichen Nutzen der GLAT Lokalisierung abschätzen zu können, ist eine Vorhersage der zu erwartenden Performanz notwendig. Wo die Performanz aus betrieblicher Sicht nicht ausreichend ist, sollen je nach Anforderungsprofil Balisen oder traditionelle Gleisfreimeldemittel vorgesehen werden.

Da noch keine Abschätzung der erwartbaren Performanz eines als sicher qualifiziertes Zugnavigationssystems besteht, wird hier auf quantitative Aussagen verzichtet. Stattdessen werden Faktoren identifiziert, die Einfluss auf die gleisseitige Infrastruktur haben.

### 5.2 Systemannahmen

Im Folgenden werden Züge in Betracht gezogen, die gemäss Kapitel 4.3 in einem *OTOD Bereich* verkehren. Die sichere Länge der Züge ist à priori bekannt. Die Zuglängenintegrität wird kontinuierlich überwacht.

#### 5.2.1 Bordseitige Ausrüstung

##### 5.2.1.1 Datenquellen, Hardware und Dienste

Onboard Units verfügen über GNSS Empfänger, Balisenleser, IMU, Odometrie und Gleistopografie. Kommunikation und GNSS Augmentation sind vorhanden.

Die Datenquellen liefern unterschiedliche Beiträge mit unterschiedlichen Verfügbarkeiten zur Datenfusion. GNSS liefert einen Bezug auf ein absolutes Koordinatensystem, in der Form von PVT (Position, Geschwindigkeit, Zeit) oder von Pseudoentfernungen zu Satelliten. Der Balisenleser liefert bei Überfahrt einer Balise indirekt einen Bezug auf ein absolutes, gleisgenaues Gleisnetz-Referenzsystem. Die IMU liefert relative Bewegungsinformationen, die Koppelnavigation ermöglichen. Der Vergleich von IMU Daten mit Gleiseigenschaften aus der Karte ist eine zu prüfende Option, um das Gleis zu identifizieren (Gleisselektivität), die Position entlang des Gleises zu liefern oder die Weichenlage bei Überfahrt einer Weiche zu erkennen. Die Odometrie liefert mit relativen Bewegungsinformationen wie Geschwindigkeit dem Gleis entlang und zurückgelegtem Weg einen wesentlichen Beitrag zur Koppelnavigation. Die Gleistopografie der Karte dient zur Umrechnung zwischen Gleisnetz- und Satellitenreferenzsystem. Zudem sind Gleislängen, Balisenkoordinaten, Gleiseigenschaften mit der Karte gegeben, die in der Datenfusion eingesetzt werden können. Die verriegelte Fahrstrasse der Onboard Unit ist in geeigneter Form bekannt (siehe auch Kapitel 4.4) und zusammen mit der Karte in der Datenfusion berücksichtigt.

##### 5.2.1.2 Fusion

Die Datenfusion liefert die Position und die Geschwindigkeit der Zugspitze im Gleisnetz. Dies bedeutet:

- Ein identifiziertes Gleis, wenn die Gleisselektivität vorhanden ist.
- Die Position entlang des Gleises, entweder in Bezug auf einen Referenzpunkt oder im Referenzsystem der Karte.
- Das Vertrauensintervall der Position entlang des Gleises, in dem sich die Zugspitze mit einer definierten Wahrscheinlichkeit befindet.
- Die Geschwindigkeit, eventuell mit Vertrauensintervall.

Das Vertrauensintervall variiert in Echtzeit, abhängig von der Verfügbarkeit und von der Qualität der fusionierten Daten.

##### 5.2.1.3 CIF (Vertrauensintervall Prädiktions-Funktion)

Eine Vertrauensintervall Prädiktions-Funktion (nachfolgend CIF für Confidence Interval Function) ermöglicht unter Berücksichtigung der Sensoreigenschaften, der Dateneigenschaften, des Bewegungsprofils und der Anwendungsbedingungen eine Vorhersage des erwartbaren Vertrauensintervalls, deren Resultate im Traffic Management System zu Planungszwecken verwendet werden.

Der Begriff der CIF ist eine Erweiterung der im Subset-041 vorgegebenen «5m + 5% vom zurückgelegten Weg seit dem letzten LRBG». Die 5m + 5% beziehen sich auf eine Ortungstechnologie, die exklusiv Balisen und Odometrie nutzt. Sie werden als Prämisse für die Projektierung von Sicherungsanlagen genommen. Die CIF soll die erwartbare Performanz einer generischen, Sensorfusions-basierten Ortungstechnologie beschreiben.

Diese Funktion berücksichtigt zum Beispiel, dass in der planbaren Abwesenheit von GNSS Signalen und in der Abwesenheit von Balisen, das Vertrauensintervall mit der longitudinalen Drift der IMU + Odometrie Koppelnavigation wächst.

#### 5.2.1.4 Zugintegrität

Zur Überwachung der Zugintegrität sind Züge entweder mit einem TMS oder mit einem GNSS TED ausgerüstet, die eine berechenbare Trennungsdetektionszeit vorweisen.

### 5.2.2 Gleisseitige Ausrüstung

Wenn CIF und Anwendungsbedingungen bekannt sind, können potenzielle Lücken zwischen erwartbarer Ortungsperformanz und betrieblichen Bedürfnissen identifiziert werden. Um diese Lücken zu füllen, können Balisen oder Gleisfreimeldemittel projektiert oder bereits installierte benutzt werden.

### 5.2.3 Funktionsprinzip

In einem OTOD Bereich dienen gemäss Kap. 4 die Lokalisierungsinformationen hauptsächlich zwei Funktionen.

- Das Fahrzeug soll anhand von Lokalisierungsinformationen seine MA einhalten. Dafür werden Position, Vertrauensintervall und Geschwindigkeit der ETCS Überwachungsfunktion weitergeleitet.
- Gleise sollen anhand von Lokalisierungsinformationen – inklusive Zugintegrität - freigegeben werden können. Dafür werden Train Position Reports dem APS System geschickt, die Position, Vertrauensintervall, Länge und Integrität enthalten.

Die technische Kapazität des Schienennetzes ist stark von der Performanz beeinflusst, mit der diese Funktionen erfüllt werden.

Die Safety ruht auf dem Prinzip, dass die echte Position – zum Beispiel der Zugspitze – sich immer<sup>5</sup> innerhalb des Vertrauensintervalls befindet. Wenn das Vertrauensintervall grösser wird, als was das Traffic Management System angenommen hat, entsteht kein Safety Ereignis, sondern eventuell eine Verlangsamung oder eine Bremsung.

Das System ist gemäss Kapitel 4.5 “always on, always connected”. Ein Fahrzeug ist stets innerhalb einer MA.

## 5.3 Einfluss auf Infrastrukturbedarf

Für die Diskussion des Infrastrukturbedarfs wird zwischen nominellen und ausserordentlichen Bedingungen unterschieden. Nominelle Bedingungen bedeuten, dass alle Systeme wie erwartet funktionieren, und insbesondere, dass das Vertrauensintervall in Echtzeit gemäss CIF evolviert.

---

<sup>5</sup> mit nachgewiesener geringer Fehlerwahrscheinlichkeit

Ausserordentliche Bedingungen umfassen Zustände, in denen ein System nicht wie erwartet performt, dies auch ohne dass eine Gefährdung entsteht. In nominellen Bedingungen ist die geplante Kapazität vorhanden, wogegen in ausserordentlichen Bedingungen die Kapazität verringert werden kann.

Als Analogie, in Baseline 3 ETCS sind für die Ortung die Bedingungen nominell, wenn die 5 m+5 % eingehalten werden. Ansonsten sind sie ausserordentlich, was nicht notwendigerweise zu Gefährdungen führt, aber eventuell zu Kapazitätseinbussen.

### 5.3.1 Balisen

#### 5.3.1.1 Nominelle Bedingungen

##### Ortung dem Gleis entlang

GNSS, Balisen und Vergleich zwischen IMU und Gleiseigenschaften liefern die absoluten Ortungsinformationen. Wo keine von diesen Quellen verfügbar ist, werden Positionen und Geschwindigkeiten durch Koppelnavigation mit IMU und Odometrie gerechnet. Das Vertrauensintervall wächst in dem Fall mit der Zeit oder mit dem zurückgelegten Weg. Balisen sind deshalb an Orten zu projektieren, die so weit von einem guten GNSS Empfang und von eindeutig vergleichbaren Gleiseigenschaften sind, dass das Vertrauensintervall betrieblich nicht akzeptabel wird.

##### Gleisselektivität

Quellen der absoluten Gleisselektivität sind Balisen und optional der Vergleich von IMU Daten mit Gleiseigenschaften. In deren Abwesenheit verlässt sich das Ortungssystem auf eine zeitlich relative Gleisselektivität durch Kenntnis der gesetzten Fahrstrasse. Da der Bezug auf eine immer längere Historie auf die Dauer die Zuverlässigkeit der Gleisermittlung beeinträchtigen kann, soll die Gleisselektivität wiederkehrend bestätigt werden. Im Bedarfsfall sind hierzu Balisen notwendig.

#### 5.3.1.2 Ausserordentliche Bedingungen

Die folgenden Betrachtungen bilden keinesfalls eine vollständige Business Continuity Management Analyse. Die Unverfügbarkeit des gesamten Space Segments eines GNSS Systems wird zum Beispiel nicht diskutiert.

Als ausserordentliche Bedingungen wird die Verletzung der CIF diskutiert. Die CIF kann verletzt werden, wenn reale Bedingungen den angenommenen Anwendungsbedingungen nicht entsprechen, zum Beispiel wenn der GNSS Empfang schlechter ist als erwartet, oder wenn die Odometrie eine erkannte höhere Drift als erwartet aufweist.

Ausfall, Kaltstart des Ortungssystems und Train Trip sind in einem OTOD Bereich nicht vorgesehen. Sie sollten zukünftig als Degradationsfälle behandelt werden.

##### Ortung dem Gleis entlang

Bei einer Verletzung der CIF wächst das Vertrauensintervall stärker als geplant, und somit die virtuelle Belegung des Gleises. Unter Umständen führt das zu früheren Bremsungen oder zu langsamerem Fahren, wenn die Geschwindigkeitsüberwachung den Warn- oder Bremseinsatzpunkt zu früh trifft. Solange das Vertrauensintervall nicht abrupt springt, ist keine Vollbremsung notwendig. Wichtig ist in dem Sinne, dass das Ortungssystem durch seine Fusion (resp. Filterung) die Realität der Physik reflektiert, nämlich indem Variationen der Messdaten nicht zu physikalisch unmöglichen Variationen des Vertrauensintervalls führen. Wird die CIF aus betrieblicher Sicht zu oft in einem Ort verletzt, können Balisen installiert werden.

Ein anderer Effekt der CIF Verletzung kann sein, dass der Zug virtuell länger wird, als er tatsächlich ist, und dass Gleise hinter dem Zug nicht wie geplant freigegeben werden können. Sollte das in Knoten zu oft passieren und betrieblich unerträglich sein, helfen auf dem betroffenen Gleis entweder eine Balise (indirekt durch Reduktion des Vertrauensintervall) oder Gleisfreimeldemittel.

## Gleisselektivität

Die Verletzung der CIF kann einen geringen Einfluss auf die Gleisselektivität haben, wenn der Vergleich zwischen IMU und Gleiseigenschaften sporadisch als Bestätigung der Gleisselektivität vorgesehen war, und nicht verfügbar ist. Die Zuverlässigkeit der Gleisinformation sinkt, ohne dass eine Safety Reaktion notwendig wird.

### 5.3.2 Gleisfreimeldemittel

#### 5.3.2.1 Nominelle Bedingungen

CIF und Trennungsdetektionszeit des TIMS (bzw. des GNSS TED) bestimmen die virtuelle Belegung der Gleise durch einen Zug für Planungszwecke. Ist diese virtuelle Belegung nach vorne oder nach hinten so lang, dass die Freigabe einer Weiche systematisch problematisch ist, sollen Gleisfreimeldemittel projiziert werden. Beispiele sind kurze Überholgleise, kurze Abstellgleise, Weichen, die in Knoten am schnellsten freigegeben werden sollen, und Weichen sehr nah an einem Haltepunkt.

Wird ein GNSS TED zur Zugintegritätsüberwachung eingesetzt, ist die Verfügbarkeit dieser Funktion abhängig vom GNSS Empfang. In Zonen wo der Empfang voraussehbar ungenügend ist, in Tunnels und in Schluchten, sind Gleisfreimeldemittel vorzusehen. In der Abwesenheit von Gleisfreimeldemittel wird das Gleis hinter dem Zug nicht freigegeben, solange seine Integrität nicht neu bestätigt ist.

#### 5.3.2.2 Ausserordentliche Bedingungen

Wenn Vertrauensintervalle grösser als erwartet sind, können unter Umständen virtuell mehr Gleise als geplant belegt werden. Sporadisch kann das zu Blockaden führen, wenn Weichen und Kreuzungen nicht freigegeben werden können.

Bei einem tatsächlichen Zugintegritätsverlust (ungewollte Trennung) in einem OTOD Bereich wird angenommen, dass der hintere Teil des Zuges bremst. Da der TPR den Integritätsverlust dem Stellwerk meldet, werden ab Zeitpunkt der Meldung (unter Berücksichtigung der Fehleroffenbarungszeit) keine Gleisabschnitte mehr freigegeben, die zwischen dem letzten bekannten Zugende und der Zugspitze liegen. Beide Zugteile sind in der MA. Prozessual müssen dann nach Abschleppen und Räumen die Gleise freigegeben werden.

## 5.4 Erkenntnisse und weiteres Vorgehen

Die effiziente Nutzung des Ortungssystems erfordert die Kenntnis einer Vertrauensintervall Prädiktionsfunktion (CIF), die eine genaue Vorhersage des sicheren Vertrauensintervalls ermöglicht. Ist diese Funktion zu konservativ – ermittelt sie tendenziell zu grosse Vertrauensintervalle – ist nicht die optimale Kapazität planbar. Ist sie zu optimistisch, kann die Durchführung des Fahrplans durch Bremsungen beeinträchtigt werden.

Das Funktionsprinzip bedingt, dass die Gleisselektivität wiederkehrend bestätigt wird. Wie oft dafür Balisen eingesetzt werden, soll noch eruiert werden.

Eine vertiefte Analyse der möglichen Degradationen des Ortungssystems und deren Wirkungen ist notwendig, um technische und prozessuale Rückfallebenen zu dimensionieren.

Sind CIF und betriebliche Erwartungen bekannt, wird eine Schätzung der für den Betrieb in nominellen Bedingungen einzuplanenden Infrastruktur in einem GIS Modell möglich.

## 5.5 Abschätzung der Anzahl Balisen für die Performanz der Ortung

In diesem Kapitel wird die Anzahl notwendiger Balisen unter Annahmen der Charakteristiken des Ortungssystems abgeschätzt. Ein äusserst vereinfachtes statistisches Modell nutzt die Karte des GNSS

Empfangs (Kapitel 9.3) und eine Karte der medianen Zuggeschwindigkeiten auf Streckenabschnitten, die auf stark filterten Energiezählerdaten basiert. Der GNSS Empfang bestimmt Streckenabschnitte, wo eine GNSS Position verfügbar wird. Die Geschwindigkeiten bestimmen die betrieblichen Bedürfnisse an die Lokalisierungsgenauigkeit. Betriebliche Bedürfnisse werden mit den GNSS Positionsverfügbarkeiten in örtliche Korrespondenz gebracht, und eine Anzahl Balisen wird statistisch ermittelt, die notwendig wären, um die betrieblichen Bedürfnisse bei ungenügender GNSS Verfügbarkeit zu erfüllen. Dabei wird die angenommene Performanz der Funktion Odometrie berücksichtigt, ohne Annahme zu den Odometer-Technologien.

### 5.5.1 Annahmen und Einschränkungen

<b>Annahme/Einschränkung</b>	<b>Begründung/Diskussion</b>
<b>Es werden exklusiv Performanz-Balisen gerechnet</b>	Der Balisenbedarf lässt sich zwischen <i>strukturellen</i> und <i>Performanz</i> Balisen aufteilen. Strukturelle Balisen sind zum Beispiel für die Bestimmung der Gleisselektivität oder als Degradationsminderung bzgl. Rückfallebene einzuplanen. Sie können nicht anhand eines einfachen Streckennetzmodells geplant werden. Als «Worst Case»-Anzahl für die strukturellen Balisen könnten zwei pro Weiche angenommen werden. Die Anzahl struktureller Balisen ist gleich, ob mit oder ohne GNSS geortet wird, weil davon ausgegangen wird, dass die Gleisselektivität nicht von GNSS kommt. Performanz-Balisen dienen hingegen dazu, die Lokalisierungsgenauigkeit dem Gleis entlang zu erhöhen. Natürlich würden sich in einer realen Projektierung strukturelle und Performanz-Balisen überschneiden, so dass die Gesamtanzahl an Balisen kleiner sein würde, als die Summe der zwei Mengen. Aktuell sind im Business Case für smartrail 4.0 etwa 17'000 Balisen hinterlegt (grob pro 500 m eine). Wie viele davon als Strukturbalisen notwendig sind und wie viele dann den hier kalkulierten Performanz-Balisen entsprechen, muss zu einem späteren Zeitpunkt vertieft werden, wenn ein geeignetes Modell für die Strukturbalisen vorliegt.
<b>Eine einzelne Balise genügt als Stützpunkt</b>	Insbesondere wird angenommen, dass die Fahrtrichtung vom Lokalisierungssystem ermittelt wird, ohne systematisch Balisengruppen zu brauchen.
<b>Eine Strecke besteht aus zwei Gleisen</b>	Die Kartendaten für diese Auswertung basieren auf dem Streckennetz (nicht Gleisnetz). Daher kann nicht feiner gerechnet werden. Das SBB Netz besteht aus ein-, zwei- und mehrspurigen Abschnitten, im Schnitt besteht eine Strecke aus etwas mehr als zwei Gleisen.
<b>Vertrauensintervall 10m oder 1s.</b>	Die vom Betrieb erwünschte Breite des halben Vertrauensintervalls der sicheren Ortung entspricht 10m unter 36 km/h, 1 Sekunde Fahrt darüber hinaus (bis 70m bei 250 km/h). Dies entspricht den nicht-funktionalen Anforderungen von smartrail4.0 für die meisten betrieblichen Anwendungsfälle. Wenn lokal höhere Anforderungen an die Genauigkeit bestehen, muss dies entweder mit zusätzlichen Balisen oder mit GFM gelöst werden.
<b>Einschränkungen bzgl. des im Kap. 9.4 analysierten Netzes</b>	Da das Streckennetz als Basis dient und nicht das Gleisnetz, ist die Auflösung der Daten beschränkt. Tunnels wurden nicht berücksichtigt, weil infolge fehlenden GNSS Empfangs auch keine Geschwindigkeiten abgeleitet werden konnten.

### 5.5.2 Parameter

Name	Bedeutung
<b>odo_drift</b>	Odometrie-Drift. Zunahme des <u>sicheren</u> Vertrauensintervalls in Prozent des zurückgelegten Wegs. Hier werden 0.5%, 2% und 5% genutzt. Die 5% entsprechen der ERTMS Spezifikation.
<b>balise_acc</b>	Hier werden die 1 m «location reference accuracy for vital purposes» des <i>SUBSET-036 FFFIS for Eurobalise</i> mit jeweils 1 m und 4 m Installationsungenauigkeit addiert. So ergeben sich 2 und 5 m. Entspricht dem ETCS Q_LOCACC.
<b>min_sats</b>	Minimale Anzahl sichtbare Satelliten, um eine sichere GNSS Position zu rechnen. Hier ist wichtig zu erwähnen, dass die Anzahl Satelliten in der Karte des GNSS Empfangs als Breite der Himmelsicht zu interpretieren ist. Wenn die durchschnittliche Anzahl zu erwartender Satelliten bei freier Himmelssicht 20 (GPS+GLONASS) beträgt, entsprechen die vorgeschlagenen 10 und 12 empfangenen Satelliten einer 50% respektive 60% Himmelssicht. Da die weiter zu erforschenden RAIM Algorithmen eine geringe DOP und daher eine breite geometrische Konfiguration verlangen, ist diese Betrachtung wichtiger, als die der reinen «Anzahl Beobachtungen nötig um das Gleichungssystem zu lösen».
<b>gnss_acc</b>	Sicheres halbes Vertrauensintervall (gem. Abschnitt 5.3) der GNSS Position. 5 m und 10 m werden betrachtet, die im Vergleich zum EGNOS Safety-of-Life Service sehr ambitioniert sind.

Im Modell werden folgende Vertrauensintervall-Funktionen (CIF) ohne respektive mit GNSS genutzt, um die halbe Breite des Vertrauensintervalls zu rechnen:

- $balise\_acc + odo\_drift * Distanz\ zu\ letzter\ Balise$
- $\min \left( \begin{matrix} balise\_acc + odo\_drift * Distanz\ zu\ letzter\ Balise \\ gnss\_acc + odo\_drift * Distanz\ zu\ letztem\ genuegendem\ Empfang \end{matrix} \right)$

### 5.5.3 Ergebnisse und Feststellung

odo_drift	balise_acc	Anzahl Performanz-Balisen				
		Ohne GNSS	mit GNSS, min_sats = 12		mit GNSS, min_sats = 10	
			gnss_acc = 5 m	gnss_acc = 10 m	gnss_acc = 5 m	gnss_acc = 10 m
0.5%	2 m	2026	181	592	39	455
2%	2 m	8104	1096	2677	322	1963
5%	2 m	20259	3520	7225	1136	5135
0.5%	5 m	2674	239	890	55	718
2%	5 m	10698	1437	3934	432	3043
5%	5 m	26744	4635	10475	1532	7887

Tabelle 5-1: Anzahl Performanz-Balisen

Mit aller Zurückhaltung und unter den aufgelisteten Annahmen kann anhand dieser Resultate die Aussage gewagt werden, dass die Einführung einer nicht gleisselektiven GNSS Ortungstechnologie auf Fahrzeugen zu einer maximalen Ersparnis von in etwa 25000 Balisen führt. Diese Ersparnis nimmt fast linear mit der Odometrie-Performanz ab. Mit einer stabilen 2% Odometrie (odo\_drift) und einem Baliseninstallationsfehler von 1m (balise\_acc = 2m) wäre diese Ersparnis auf geschätzte 8104 Balisen ohne GNSS reduziert.

## 6 Sensorik und Ground Truth

### 6.1 Ausgangslage der Multisensorik

Im Zwischenbericht [1] wurden in den Kapiteln 2 – 7 unterschiedliche Sensortechnologien beschrieben und erste qualitative Messergebnisse erläutert. In den folgenden Kapiteln werden die in Abbildung 6-1 dargestellten Lokalisierungstechnologien als Teil einer Multisensorik-Anwendung betrachtet. Die Abbildung 6-1 illustriert die grundlegenden Zusammenhänge der eingesetzten Technologien und deren Kombination.

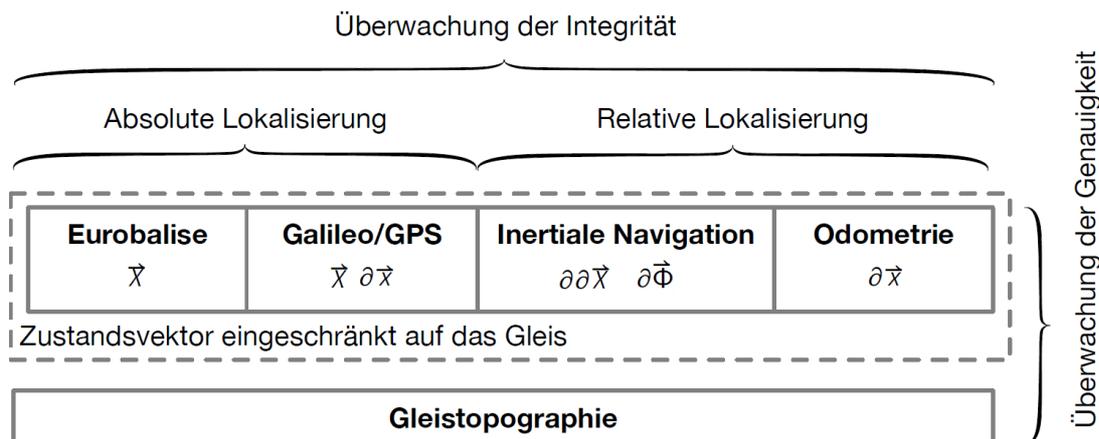


Abbildung 6-1: GLAT Multisensorik

Technologien wie Eurobalisen und GNSS (z.B. Galileo, GPS) erlauben eine absolute Lokalisierung. Inertiale Navigation und Odometrie erlauben eine relative Lokalisierung zwischen bekannten Orten. Die Gleistopografie durch die Randbedingung der Gleisgebundenheit der Anwendung bildet das Fundament einer Lokalisierung. Durch Kombination der Sensorik inkl. der Gleistopografie soll eine Überwachung der Genauigkeit und Integrität der Lokalisierung realisiert werden.

- **Eurobalisen**, sind ortsfeste Lokalisierungspunkte ähnlich «Funkfeuern» in der Nautik mit einer definierten Qualität der Lokalisierung<sup>6</sup>.
- **GNSS** beschreibt «global» verfügbare Lokalisierungssysteme, mit einer nominell definierten Qualität der Lokalisierung und Geschwindigkeitsmessung (im Doppler Verfahren), die örtlich und zeitlich stark von den Gegebenheiten der Anwendung abhängt.
- **Inertiale Navigation** bedeutet grundsätzlich relative Lokalisierung ab einem bekannten Ort. Die Qualität der relativen Lokalisierung hängt von den benutzten Sensortypen (MEMS, RLG, etc.) und den Bedingungen der Anwendung ab. Es werden Beschleunigungen und Drehraten gemessen über die, durch Integration, die Geschwindigkeit des Systems und dessen Lage im Raum (Bewegungsrichtung, Neigung) bestimmt werden kann.
- **Odometrie** (von altgriechisch ὁδός hodós „Weg“ und μέτρον métron „Mass“ – also „Wegmessung“) erlaubt eine relative Messung des zurückgelegten Weges entlang einer definierten Trajektorie. Die Qualität der relativen Lokalisierung hängt von der eingesetzten Sensorik und deren Messfehler in Bezug auf die Feststellung der Ortsänderung ab (z.B. Schlupf). Bei der Rad-Odometrie im Bahnverkehr wird über eine Messung der Drehrate des Rades auf eine Geschwindigkeit entlang des Gleises geschlossen.

<sup>6</sup> vgl. Kapitel 2.2, D5.3 EGNSS Target Performances to meet railway safety requirements, Satellite Technology for Advanced Railway Signalling, 30/04/17

- Die **Gleistopografie** als digitale Projektion der gleisseitigen Infrastruktur definiert die Trajektorie, entlang der sich die Züge weitestgehend translatorisch bewegen, sowie deren Eigenschaften im Raum (z.B. Krümmung, Überhöhung und Gradient).

Durch Kombination der genannten Sensoren mit der Gleistopografie lassen sich aufgrund der physikalischen Überbestimmtheit die Zustandsgrößen (Position, Richtung, Geschwindigkeiten, usw.) ermitteln als auch Methoden zur Bestimmung der Genauigkeit und Integrität ableiten.

## 6.2 Ground Truth

Als «Ground Truth»<sup>7</sup> im SR40 Kontext wird die «Wahrheit» oder «exakte Referenz» über die effektiv befahrenen Gleisabschnitte sowohl örtlich als zeitlich<sup>8</sup> verstanden. Sie wird zur Ermittlung von Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit verschiedener (Lokalisierungs-)Sensoren und deren Kombinationen (Multisensorik) genutzt. Das Ziel ist, die durch die Sensorik bestimmten Positionen, zeitlich und örtlich, anhand der «Ground Truth» zu validieren. Weitere Details zur Generierung der «Ground Truth» finden sich im Kapitel 8.4.

Im Rahmen des Technologie PoC basiert die «Ground Truth» auf:

- a) vom Stellwerk eingestellten, gesicherten Fahrweg (Fahrstrasse) um die effektiv befahrenen Gleisabschnitte zu rekonstruieren
- b) Geometrisch exakt vermessener Gleistopografie, und
- c) einer Kombination von Sensortechnologie mit eigens entwickelten Verfahren zur Überprüfung der Qualität.

### 6.2.1 Fahrwegermittlung mit Daten aus dem Stellwerk/Leittechnik

Der Fahrweg eines Zuges (im PoC des Messwagens) wird a posteriori anhand der operativen Daten aus den Systemen der SBB Zugsicherung eruiert und definiert die chronologische, örtliche Abfolge der Gleisabschnitte und damit verbundenen Eigenschaften. Umgelegt auf GLAT ist der Fahrweg eine Akkumulation der a priori «ETCS Movement Authorities» durch das Stellwerk für den jeweiligen Zug.

### 6.2.2 Gleistopografie

Die Gleistopografie ist die digitale Abbildung der Infrastruktur als eine geometrische Abfolge von Punkten und Linienzügen. Darin «abgebildet» ist der Fahrweg als chronologische Abfolge durchfahrener Linienzüge und der damit verbundenen Abfolge von dreidimensionalen Gleiseigenschaften (Radien, Überhöhungen und Gradienten).

Im Gegensatz zur Lokalisierung in der (Aero-)Nautik bewegen sich Objekte d.h. Fahrzeuge/Züge eindimensional entlang von Schienen und einem meist zentral vorgegebenen Fahrweg. Der Fahrweg, wenn vorgegeben, ist nur eine Kombination von Gleisobjekten zeitlich und örtlich eindeutig definiert. Unter der Voraussetzung einer richtigen Abbildung der realen Gegebenheiten definiert eine digitale Abbildung der Schiene d.h. Gleistopografie, eindeutig die Messgrößen von Sensoren, die sich fest angebracht auf einem Fahrzeug entlang der Infrastruktur zeitlich und örtlich bewegen. Durch das Zusammenwirken von Sensoren und Gleistopografie ist der Ort der Fahrzeuge/Züge zeitlich und örtlich definiert. Fehler der

---

<sup>7</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Ground\\_truth?section=5#Geographical\\_information\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_truth?section=5#Geographical_information_systems)

<sup>8</sup> Die zeitliche Komponente wird im Folgenden in der Regel nicht betrachtet. Sie wird insbesondere dann kritisch, wenn ein Abgleich zwischen Fahrzeug und streckenseitiger Infrastruktur in einer Art und Weise notwendig wird, die eine Zeitsynchronisation erfordert.

Sensoren oder der Gleistopografie ergeben zeitlich und örtliche Unsicherheiten, die es bei GLAT durch betriebliche Massnahmen zu kompensieren d.h. abzusichern gilt.

Der örtliche Fehler der aktuell für die Auswertungen zur Verfügung stehenden Gleistopografie liegt im Bereich von 10-20 cm (1 Sigma Standardabweichung) bei unterstellter Normalverteilung und einer Auflösung von ca. 10 m in der Punktefolge<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Basis sind die Daten aus der DfA (Datenbank fester Anlage).

## 7 System Architektur

### 7.1 GLAT im Kontext von smartrail 4.0

In smartrail 4.0 und im speziellen für GLAT kommen die *Open CCS Onboard Reference Architecture (OCORA)*<sup>10</sup> und die *Reference CCS Architecture (RCA)*<sup>11</sup> zur Anwendung.

Das System GLAT umfasst im Kontext von smartrail 4.0, illustriert anhand der RCA Architektur, die nachfolgend in grün markierten Komponenten (MOT, VL, MOL). Die rote Komponente *Person supervisor & locator (PSL)* wird aktuell nicht prioritär behandelt und wird daher auch nicht weiter ausgeführt. Obwohl RCA eine funktionale Sicht darstellt, beschreibt die Grenze zwischen MOT und VL/MOL den sogenannten „air gap“, d.h. die Unterteilung in streckenseitig (trackside) [MOT] und fahrzeugseitig (on-board) [VL/MOL].

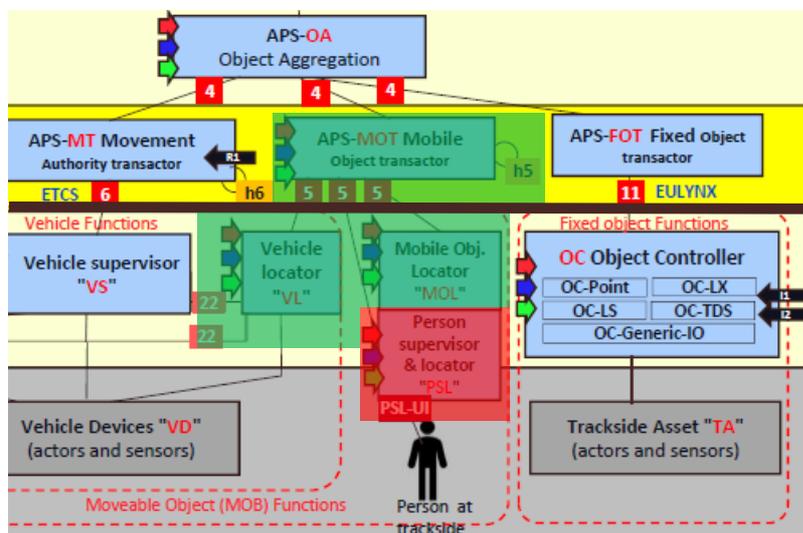


Abbildung 7-1: Ausschnitt aus der RCA Architektur mit den in grün hervorgehobenen Fokusbereichen für GLAT

### 7.2 System Architektur GLAT

Vorbemerkung: GLAT befindet sich aktuell in der Phase 1/2 gemäss der CENELEC Norm EN 50126. Die Beschreibungen sind vorläufig und werden nach detaillierter Analyse der Anforderungen evolvieren.

#### 7.2.1 Funktionale Architektursicht der Positionsbestimmung

Die zentrale Aufgabe von GLAT ist die Lokalisierung von Fahrzeugen (VL), mobilen Objekten (MOL), sowie, im Endausbau, Personen in Gleisnähe (PSL). Je nach eingesetztem Sensor-Mix kommen unterschiedliche Sensorik-Ausgangsgrössen zur Anwendung. Ein Odometer liefert den zurückgelegten Weg (1D-Navigation) als relative Grösse, wohingegen die Satelliten-Navigation eine absolute Position im 3D-Raum liefert (3D-Navigation). Um beliebige Sensortypen (Odometer, IMU, GNSS, Balisen, etc.) für die Sensorfusion berücksichtigen zu können, ist ein Zusammenspiel zwischen der 1D- und 3D-Navigation unerlässlich. Die Abbildung 7-2 illustriert, dass unter Berücksichtigung von zusätzlichen Eingabeparametern eine Umrechnung zwischen der 1D-Navigation und der 3D-Navigation möglich ist, so dass eine Position entlang eines Gleises wie auch die Position im 3D-Raum ermittelt werden kann.

<sup>10</sup> <https://smartrail40.ch/index.asp?inc=partner.asp>

<sup>11</sup> [https://ertms.be/workgroups/ccs\\_architecture](https://ertms.be/workgroups/ccs_architecture)

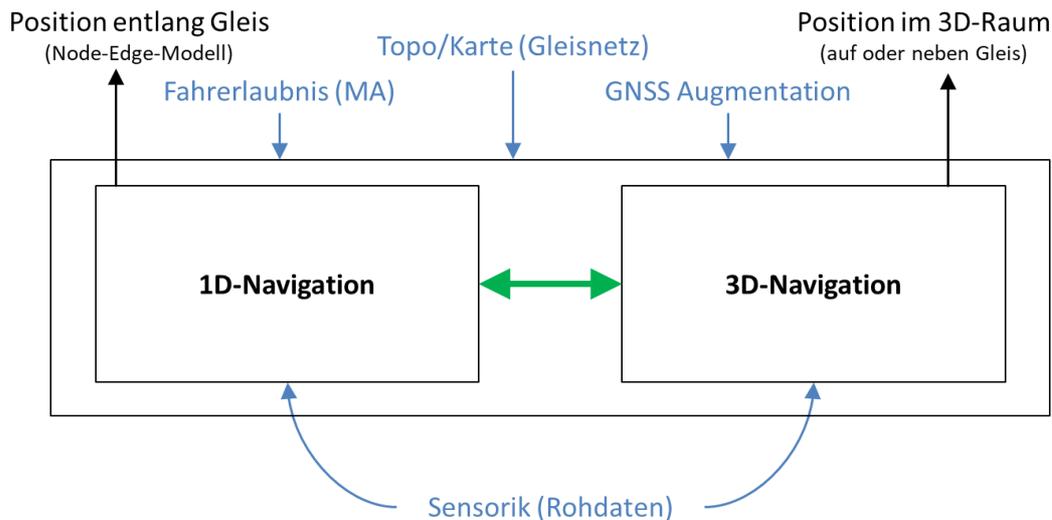


Abbildung 7-2: Vereinfachte Darstellung der Positionsbestimmung im Kontext der funktionalen Architektur

Beispiel: Beim Überfahren einer Balise, z.B. beim Eintritt in den OTOD-Bereich, wird die genaue Position des Fahrzeuges bestimmt (unter der Annahme, dass die Position der Balise vorgängig im 3D-Raum vermessen wurde). Das Fahrzeug bewegt sich weiter. Die Trägheitsnavigation (IMU) zeichnet Bewegungen (und Geschwindigkeit) im 3D-Raum auf, die in Abhängigkeit der Gleiseigenschaften, in einem geographischen Bereich festgelegt durch die Fahrerlaubnis (MA), eine Position auf dem Gleisnetz bestimmen lässt. Die ermittelte Position auf dem Gleisnetz lässt sich unter Berücksichtigung der topografischen Gleisnetzdaten in eine Position im 3D-Raum umrechnen.

Die gleisgenaue Lokalisierung (Gleisselektivität) ist ein zentrales Anliegen einer sicheren Lokalisierung. Diese wird heutzutage durch das Befahren von Eurobalisen ermittelt bzw. bestätigt. Unter der Annahme, dass zukünftig weniger Balisen genutzt werden (vgl. Kapitel 5), müssen andere Technologiekomponenten diese Funktion abdecken können. Nach aktuellem Wissensstand reicht der bisher untersuchte Sensor-Mix (vgl. Kapitel 9) nicht aus, um kontinuierlich eine gleisgenaue Position bestimmen zu können, ohne die gestellte Fahrstrasse (Fahrerlaubnis, MA) zu berücksichtigen. Die Architektur soll jedoch so konzipiert werden, dass zukünftig auch ohne die Information der Fahrerlaubnis (MA) eine gleisgenaue Lokalisierung möglich ist – nämlich dann, wenn eine oder mehrere Sensortechnologien dies ermöglichen.

## 7.2.2 Modellbasiertes Systems Engineering (MBSE)

Das SR40 Gesamtsystem wie auch das GLAT-System wird ganzheitlich basierend auf einem modellbasiertem System Engineering Ansatz beschrieben. In einer ersten Phase wird das GLAT-System als eine Art «Black Box» betrachtet. Die Komponenten mit direktem Datenaustausch (Schnittstellen) zum GLAT-System sind in der Abbildung 7-3 in einem System Kontext Diagramm anhand der RCA funktionalen Architektur visualisiert. Die blauen Bereiche stellen Aktoren/Systeme dar, die grünen Boxen sind als Funktionen zu verstehen. Die Vollständigkeit der Aktoren/Systeme hängt vom Reifegrad der RCA Architektur ab.

Das logische System GLAT (zentrale blaue Box) besteht aus dem fahrzeugseitigen Vehicle Locator (VL) und dem zentralisierten APS Mobile Object Transactor (MOT). Im Rahmen einer Vereinfachung wurde auf die Visualisierung des Mobile Object Locator (MOL) und Person Supervisor & Locator (PSL) verzichtet.

Das System interagiert fahrzeugseitig mit Funktionen wie bspw. der ETCS Überwachungsfunktion und einer Zugintegritätsfunktion (TIMS) oder benötigt Karten in Form von sicheren Topographie- und

Topologie-Daten (Topo4). All diese Funktionen sind unter dem Akteur «Vehicle (COAT)» zusammengefasst. Des Weiteren greift das Fahrzeug auf Sensordaten zu, die eine Lokalisierung erst ermöglichen. Dieser Akteur ist als «Vehicle Devices VD» illustriert.

Die zentralisierte Komponente des logischen Systems GLAT, der sogenannte APS-MOT Mobile Object Transactor, interagiert mit dem APS-OA Object Aggregation, dessen Hauptfunktion es ist, die fahrzeug- und streckenseitigen Lokalisierungsinformationen zu aggregieren, so dass Fahrzeugpositionen und Gleisbelegungen sicher ermittelt werden können. Der Akteur «SR 40» ist stellvertretend für alle Abnehmer von nicht-sicherheitsrelevanten Lokalisierungsinformationen zu verstehen.

Sowohl die zentralisierte Komponente (APS-MOT) als auch die fahrzeugseitige Komponente (VL) benötigen generische Funktionen, wie bspw. ein autorisierter/authentisierter Zugriff (IAM) oder auch Diagnose und Monitoring (DM) Funktionalitäten. Diese Funktionen sind unter dem Akteur «Generic Functions» zusammengefasst.

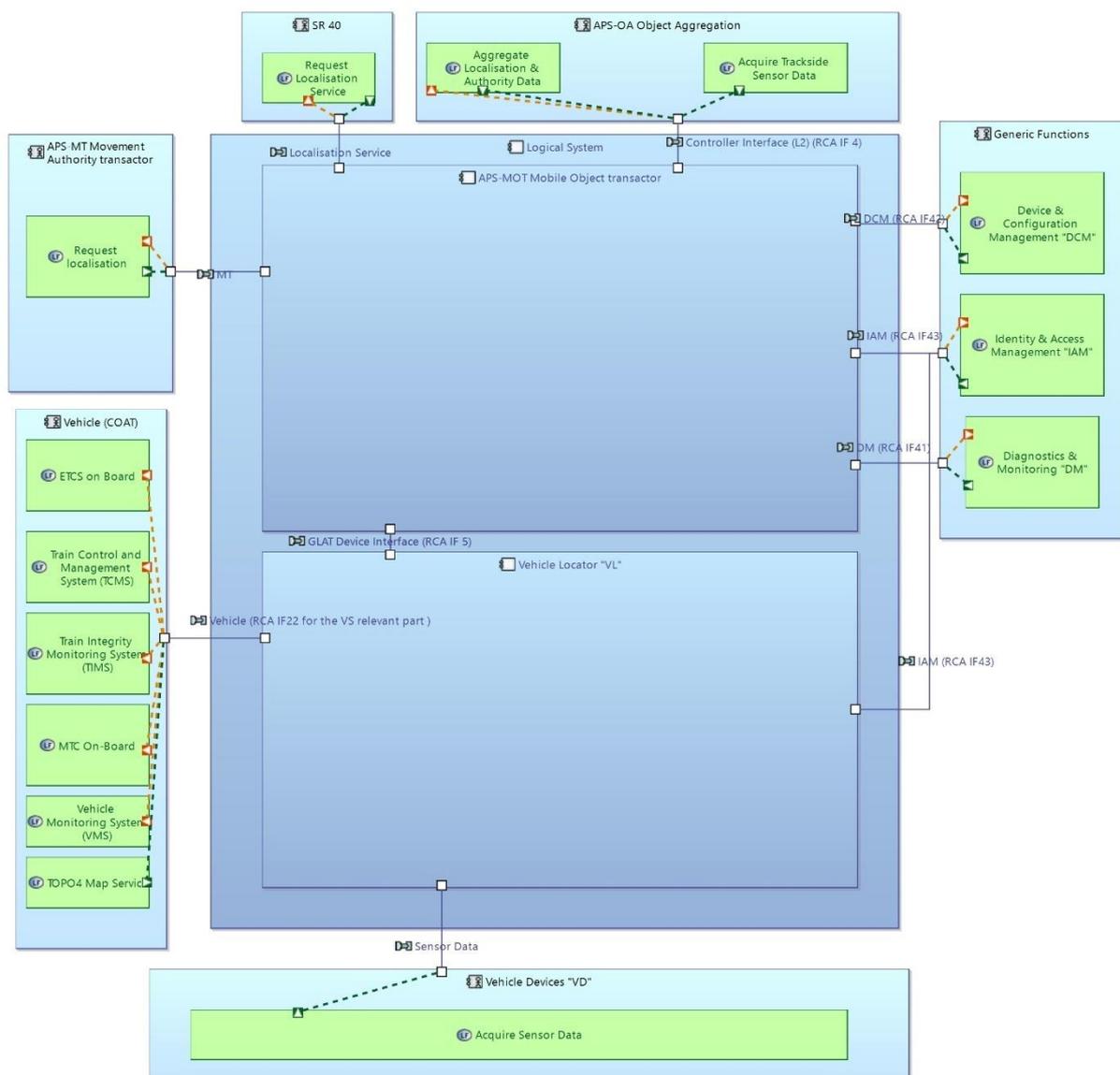


Abbildung 7-3: Exemplarischer GLAT System-Kontext (Schnittstellen anhand Komponentenmodell)

### 7.2.3 Was liefert GLAT

GLAT liefert Onboard Lokalisierungsinformationen, aufbereitet durch die Vehicle Locator (VL) Funktion. Für die nach ETCS standardisierten Schnittstellen ist der Train Position Report (TPR) [Message 136] und der SoM Position Report [Message 157] relevant. Die Struktur wird im Rahmen der TSI Änderungsanträge geprüft und insofern erweitert, dass die Spezifikation Balisen-unabhängig genutzt werden kann.

Aus funktionaler Sicht stellt GLAT folgende Lokalisierungsinformationen zur Verfügung:

- Anfangsposition des Zuges (+Vertrauensintervall)
- Plausibilisierung der sicheren Zuglänge (+Vertrauensintervall)
- Geschwindigkeit (+Vertrauensintervall)
- Fahrtrichtung
- Zuverlässigkeit der Info<sup>12</sup> (garantierter SIL-Level)

Je nach funktionaler RCA Komponente sind die Anforderungen ans Format der Position unterschiedlich. Gemäss heutiger ETCS-Spezifikation wird die Position basierend auf der Identität der letzten Balisen-gruppe (NID\_LRBG) und der berechneten Distanz zur Frontposition des Zuges (D\_LRBG) bestimmt. Zukünftig soll die Referenzierung auch unabhängig von Balisen möglich sein. Dies wird im Rahmen des TSI-Änderungsantrages für die Schnittstelle 22 behandelt. Ob die Positionsdaten mittels einem Train Position Report (TPR) weiterhin über die bestehende Schnittstelle 6 (VS nach APS-MT) gesendet werden oder eine neue Schnittstelle 5 etabliert wird, ist Teil von RCA-/OCORA-Diskussionen.

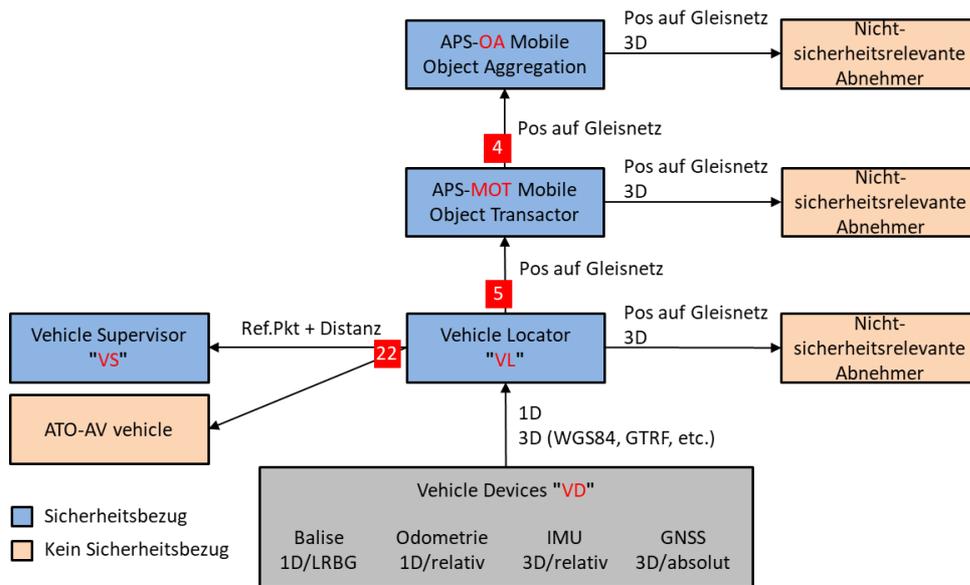


Abbildung 7-4: Vereinfachtes Format der Positionsdaten anhand des RCA Komponentenmodells

Unter der Annahme, dass Topo-Daten fahrzeugseitig zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 7.3) wandelt der Vehicle Locator (VL) im Rahmen der Sensorfusion die 1D und 3D Daten in eine eindeutige Position auf dem Gleisnetz um (in SR40 auch BNT-Gleisnetz-Referenzmodell genannt). Die Abbildung 7-5 veranschaulicht dies anhand eines Beispiels.

<sup>12</sup> Die Qualität der Lokalisierung in Bezug auf die Vertrauensintervalle wird in unterschiedliche Anforderungsprofile unterteilt. Bei einer hohen SIL sind die Vertrauensintervalle (Puffer) entsprechend grösser. ATO hat aus heutiger Sicht keine Anforderungen an eine «sichere» Lokalisierung, im Gegensatz zu VS.

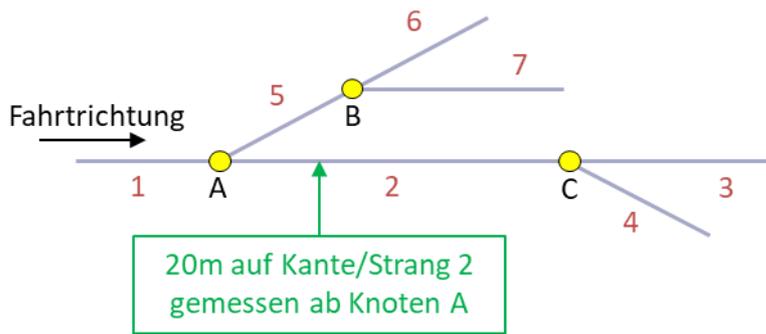


Abbildung 7-5: Illustration einer Position im Knoten/Kanten-Modell

Die empfangenen Lokalisierungsinformationen können weiteren, nicht-sicherheitsrelevanten, Systemen ausserhalb des RCA-Kontextes bereitgestellt werden, z.B. dem fahrzeugseitigen Personeninformationssystem. In welchen Formaten die Position benötigt wird, ist von Fall zu Fall zu klären. Wichtig hierbei zu verstehen ist, dass die Positionsinformationen auf dem Knoten/Kanten-Modell basieren, d.h. es wird die aufs Gleisnetz projizierte Position bspw. in 3D-Koordinaten des entsprechenden Koordinatensystems umgewandelt. Rohdaten einzelner Sensoren (z.B. GNSS) stehen nicht für Abnehmer zur Verfügung.

Die bereits bekannten Abnehmer von fahrzeugseitig ermittelten Lokalisierungsinformationen (VL) sind der Vehicle Supervisor (VS), der neben der bekannten Funktionalität gemäss ETCS-Spezifikation zusätzlich auch MTC (Manoeuvre Traffic Control) umfasst, und Automatic Train Operation (ATO).

### 7.3 Erwartungen und Anforderungen an Umsysteme

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Konnektivität ist je nach Anwendungsfall mit der notwendigen Bandbreite, Verfügbarkeit und Service-Level Kategorie vorhanden.
- Die Kommunikation mit Umsystemen erfolgt über verschlüsselte Kanäle (PKI-Infrastruktur, Identity & Access Management).
- Die Weichenlage ist bekannt, d.h. die Fahrerlaubnis (Movement Authority) wird dem VL via dem VS zur Verfügung gestellt.
- Sichere Topo-Daten werden sowohl streckenseitig wie (teilweise) auch fahrzeugseitig zur Verfügung gestellt. Die Gleistopologie (BNT-Gleisnetz-Referenzmodell) bildet hierbei die Basis. Weitere Schichten (nicht abschliessend) sind:
  - Gleiseigenschaften (Radien, Gradienten, Überhöhungen, Weichen, etc.)
  - Balisen-Koordinaten
  - Topografie (GNSS 3D nach 1D Mapping)
  - Bauwerke (Tunnel, Bahnübergänge)
  - Fahrleitungsmasten
- Damit streckenseitige Lokalisierungsinformationen mit fahrzeugseitigen zeit- und punktgenau fusioniert werden können, wird ein systemweiter Zeitstempel<sup>13</sup> oder eine Zeit-Synchronisationslogik benötigt.
- Fahrzeug/OBU Identifikation ist bekannt (z.B. NID\_ENGINE) und wird GLAT zur Verfügung gestellt.
- Die sichere Zuglänge ist vorbestimmt (z.B. Eingabe durch Lokführer) und wird von GLAT vorerst «nur» plausibilisiert.

<sup>13</sup> Um die Aggregation von fahrzeugseitigen und streckenseitigen Informationen zu vereinfachen, benötigt APS-OA eine zwischen APS und Fahrzeug (z.B. auf Basis von T\_TRAIN) synchronisierte Zeit.

- Zugintegritätsüberwachungssystem (TIMS) ist für Personenverkehrszüge (z.B. Triebzüge) vorhanden, die auf dem SR40 Netz fahren dürfen.
- Die Endposition des Zuges wird durch APS-OA berechnet, da auch streckenseitige Infrastruktur (z.B. GFM) und die befahrene Topografie berücksichtigt werden muss.
- Bei Nutzung von GNSS wird eine Augmentation-Information zur Systemintegrität und zum Atmosphärenzustand benötigt. Der Kanal muss standardisiert werden (z.B. per Funk).
- Die Positionsabstände zwischen den Lokalisierungs-Sensoren und der effektiven Zugspitze (bzw. Zugende) sind parametrierbar und werden beim Einbau der Sensorik entsprechend konfiguriert und auf Korrektheit überprüft.
- Lokalisierungs-Sensordaten (VD) werden über die COAT-Plattform dem VL zur Verfügung gestellt
- Positionsinformationen, die zwischen APS-OA und MOT ausgetauscht werden, basieren auf dem BNT-Gleisnetz-Referenzmodell (Knoten/Kanten-Modell). Ob ermittelte Positionen/Bereiche neben dem Gleis (z.B. Person Supervisor & Locator (PSL)) als ein gerichteter Abstand zu einer Kantenposition oder als 3D-Koordinaten geliefert werden ist noch zu definieren.

## 8 Messaufbau und Auswertungsplattform LocLab

### 8.1 Aufbau SBB Funkmesswagen «mewa12»

Die folgende Grafik zeigt den im Rahmen des PoC realisierten Messaufbau unter Nutzung des Funkmesswagens der SBB ([www.railcom.org](http://www.railcom.org)).

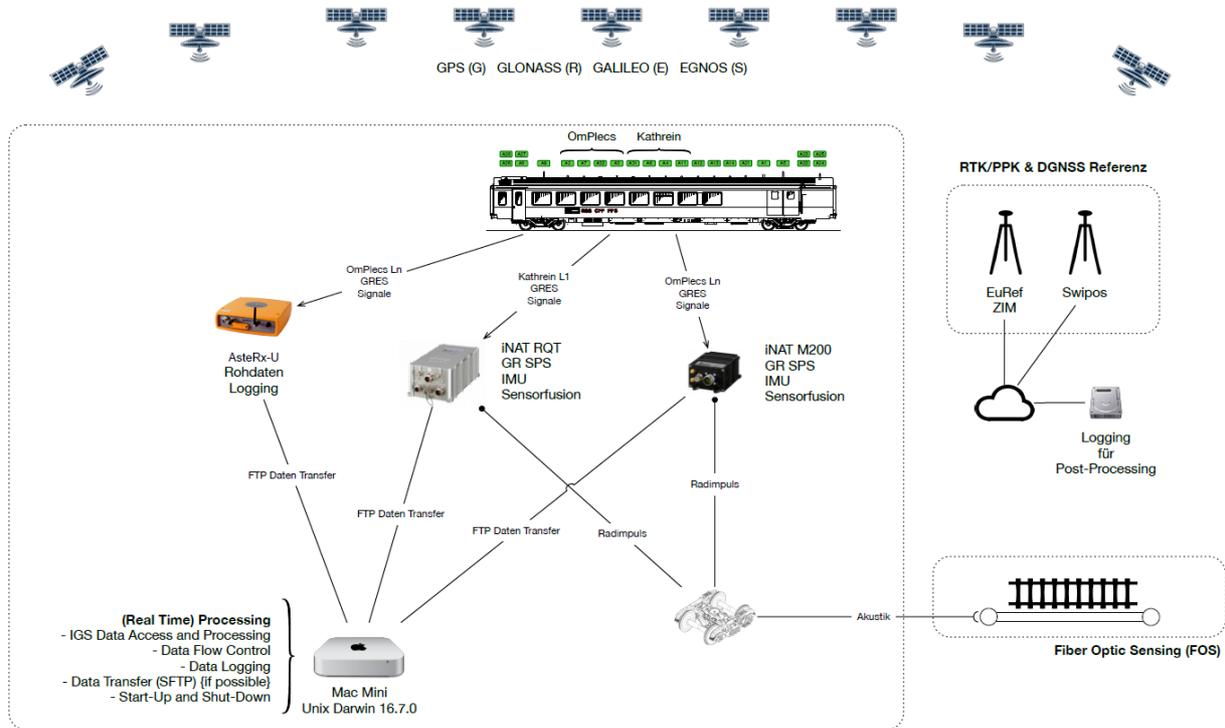


Abbildung 8-1: Aufbau PoC Datenerfassung, SBB Telekommesswagen ([www.railcom.org](http://www.railcom.org))

Der Funkmesswagen «mewa12» ist für die eigentlichen Messaufgaben im Telekom-Bereich mit jeweils einer leistungsstarken «Ring-Laser (RLG)» basierten und einer «mikromechanischen (MEMS)» GNSS/IMU/Odometrie Trägheitsnavigationsplattform ausgestattet. Die darin verwendeten Technologien zur Fusion von Sensoren sind im folgenden Dokument beschrieben: [https://www.imar-naviga-tion.de/downloads/papers/iMAR\\_Railway-Surveying\\_Inertial-Sensors-Systems\\_2016.pdf](https://www.imar-naviga-tion.de/downloads/papers/iMAR_Railway-Surveying_Inertial-Sensors-Systems_2016.pdf). Zusätzlich wurde ein Multi-Frequenz AsteRx GNSS Empfänger der Firma Septentrio verbaut.

Im Rahmen des PoC werden diese Produkte/Systeme genutzt und dahingehend konfiguriert, dass sie permanent (Roh-)Daten aufzeichnen und auf einem PoC-Rechner zwischenspeichern. Die Verarbeitung der erfassten Daten erfolgt einerseits in «Echtzeit» in den Empfängern und in einer Nachverarbeitung (Post-Processing) unter Einsatz speziell konfigurierbarer Werkzeuge mit primärem Fokus auf die Software-Bibliothek RTKLIB (siehe: <http://www.rtklib.com>).

Für die Verarbeitung und Auswertung der Daten aus dem Funkmesswagen wird in zwei Schritten vorgegangen:

- Methoden, Prozesse und Modelle werden in einem experimentellen Schritt mit Wolfram Mathematica entwickelt, und
- in der SBB Big Data Umgebung implementiert um für eine batch-orientierte, automatisierte Verarbeitung zur Verfügung zu stehen. Die Ziele, der Funktionsaufbau und weitere relevante (Referenz-) Daten der Big Data Plattform «LocLab» sind im Kapitel 8.3 im Detail erläutert.

## 8.2 Eingesetzte Sensor Produkte

Die eingesetzten Sensor-Produkte, die Messdaten für diesen Technologie PoC aufgezeichnet haben sind in der Tabelle 8-1 beschrieben, wobei auch Messungen ausserhalb der Funkmesswagens durchgeführt wurden.

Hersteller	Produkt	Beschreibung / Einsatzbereich	Aufgezeichnete Messdaten
iMAR	<a href="#">iNAT-RQT-4003</a>	Ring Laser Gyro (RLG) basiertes INS/GNSS System	38 Mio <sup>14</sup>
iMAR	<a href="#">iNAT-M200</a>	MEMS basiertes INS/GNSS System	35 Mio <sup>14</sup>
Septentrio	<a href="#">AsteRx-U</a>	Multi-Frequenz GNSS Empfänger	38 Mio PVT <sup>14</sup> 11.5 Mio EGNOS <sup>14</sup>
Emlid	<a href="#">Reach RS+</a>	ZET1: mobiles, steckbares Zugende-Tag 1	80'000, 2 Messtage 2 Züge (pro Zug 2x ZET1)
iMAR	<a href="#">iNAT-M200-FLAT</a>	ZET2: fest integriertes Zugende-Tag 2. Miniatur MEMS basiertes INS/GNSS System, verbaut im Radachsenmodul.	2,7 GByte Rohdaten, 1 Messtag, 1 Zug
Diverse	Diverse	Energie-Daten: Consumer-grade GNSS Sensoren	15.7 Milliarden «Zeit, geographische Position, Anzahl empfangene Satelliten» Messpunkte <sup>15</sup> davon 13.2 Milliarden für die Auswertung nutzbar.

Tabelle 8-1: Sensor Produkte, Hersteller und Einsatzbereich

## 8.3 LocLab

### 8.3.1 Ziele

LocLab ist ein Daten- und Analyse-Labor für die Lokalisierung auf der SBB Big Data Plattform (vgl. Kapitel 8.3.4) und dient den folgenden Zielen:

- Datenhaltung der Sensordaten
- Vereinheitlichung und Transformation der Sensordaten
- Verknüpfung der Messdaten mit Topografie- und Zuglaufdaten
- Datenexporte für andere Systeme

### 8.3.2 Funktionaler Aufbau

Der funktionale Aufbau der «LocLab» Plattform ist in Abbildung 8-2 illustriert und nachfolgend beschrieben.

<sup>14</sup> Im Zeitraum von Juli 2018 bis Oktober 2019 mit einer Abtastfrequenz von 1 Hz

<sup>15</sup> Im Zeitraum von Januar 2016 bis April 2019

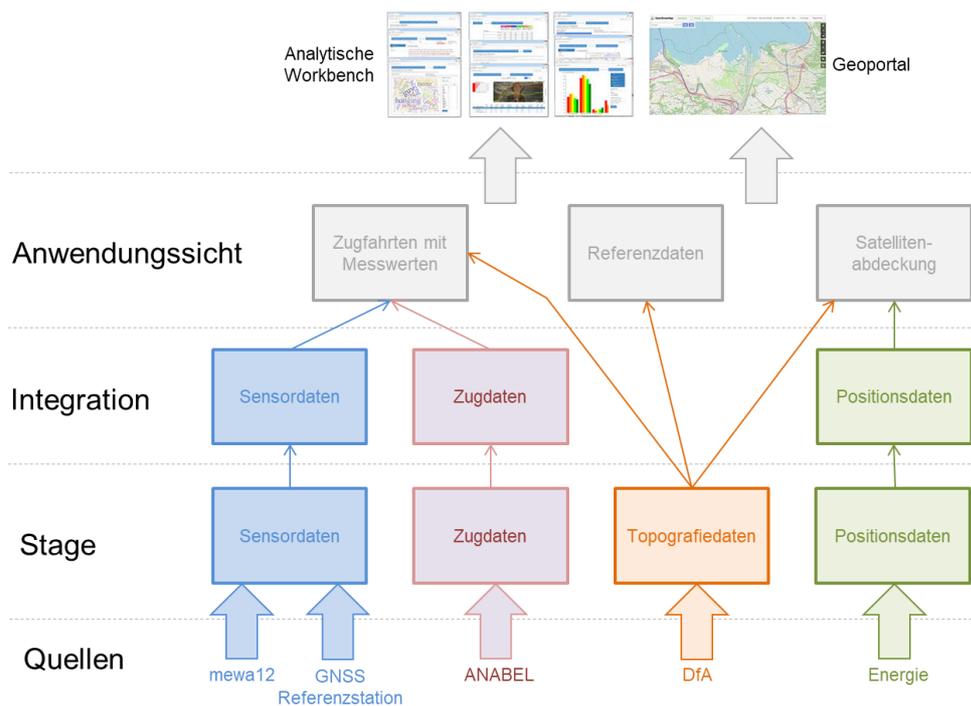


Abbildung 8-2: Funktioneller Aufbau der SBB Big Data Plattform «LocLab»

- **Stage**  
In diesem Layer werden die Daten von den Quellsystemen übernommen und wo notwendig vorverarbeitet, z.B. Daten entpacken, Konvertierung von Binär- zu Textformaten, Anreichern mit GNSS Referenzstationsdaten (Augmentation).
- **Integration**  
In diesem Layer werden die Daten transformiert, wenn nötig interpoliert und vereinheitlicht, z.B. einheitliche Namensgebung für semantisch identische Attribute, Vereinheitlichung des Koordinaten-Referenzsystems (LV95), Einheitenbereinigung (m/s statt km/h).
- **Anwendungssicht**  
Dieser Layer stellt die fertig verarbeiteten und zusammengeführten Daten für Analyse- oder Visualisierungszwecke bereit. Dies kann innerhalb der SBB Big Data Plattform oder auf anderen Systemen wie der SBB Geo-Plattform oder explorativen Workbenches wie z. B. Wolfram Mathematica erfolgen.

### 8.3.3 Datenquellen

Das Lokalisierungslabor wird aus unterschiedlichen Datenquellen gespeist:

- Sensordaten Funkmesswagen mewa12 (siehe Kapitel 8.1)
- Positionsdaten von Energie (siehe Kapitel 9.3.3)
- Gleistopografiedaten (siehe Kapitel 8.3.5)
- Zuglaufdaten (siehe Kapitel 8.3.6)

### 8.3.4 SBB Big Data Plattform

Die zur Verfügung stehenden Werkzeuge der SBB Big Data Plattform, basierend auf Cloudera Data Hub, sind in der Abbildung 8-3 veranschaulicht.

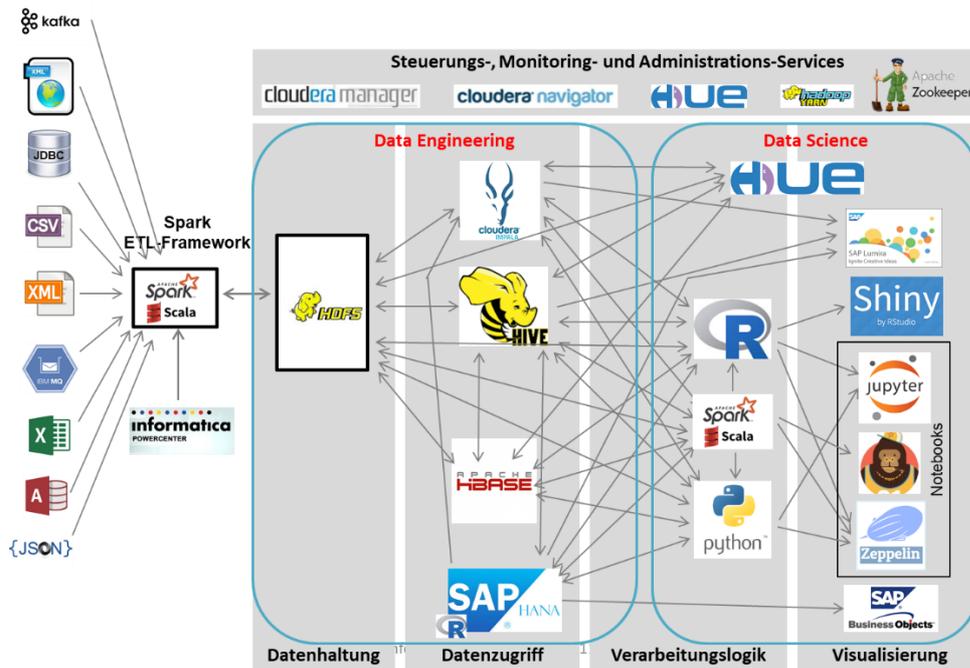


Abbildung 8-3: Werkzeuge der SBB Big Data Plattform

### 8.3.5 Gleistopografie-Daten

LoCLab verwendet das GTG-Netz zur Abbildung der Sensordaten auf die Gleistopografie. Das GTG-Netz verfolgt den Grundsatz, die abstrakte Gleistopografie (Topologie und Geometrie der bestehenden Gleisanlagen) vom physisch eingebauten Material strikt zu trennen. Das GTG-Netz wird aus dem SBB System DfA (Daten feste Anlagen) bereitgestellt.

Ein GTG-Strang (Netzelement) repräsentiert Gleiskanten, welche sich immer von einem Weichenpunkt zu einem Weichenpunkt resp. Gleisendpunkt erstrecken. Darin enthalten sind ca. alle 10m geometrische Stützpunkte.

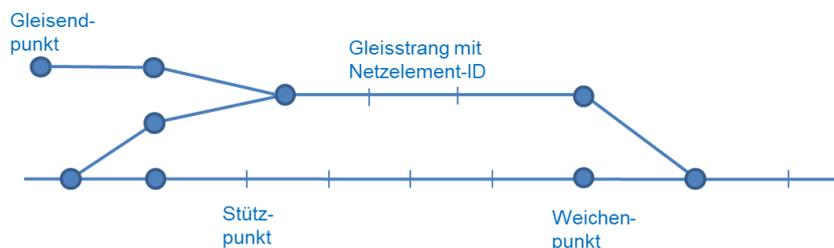


Abbildung 8-4: Semantik des GTG-Netzes

### 8.3.6 Zuglaufdaten

Als Basis für die Zuordnung der Messdaten zu einem Zuglauf und dem GTG-Netz (siehe Kapitel 8.3.5) werden Daten aus der Anwendung ANABEL verwendet. ANABEL aggregiert Fahrzeugstammdaten, Fahrplan, Formationen, Topologie-/grafie und Zugfahrtdaten zu einem konsistenten Datensatz. Die Grundaufgabe von ANABEL umfasst das Reporting zu folgenden Themenbereichen:

- Fahrbahnbelastung

- Instandhaltung: Teilschritt für die präventive Instandhaltung
- Lärmsanierung: Deckung der Anforderungen BAV an das Projekt Lärmsanierung SBB
- Gefahrgut: Aufzeigen der Gefahrgutströme (Stoffnummer, Tonnage) auf dem SBB-Streckennetz

In einem 1. Schritt wird über die eindeutige Fahrzeugnummer des Messwagens bestimmt, in welchen Zugläufen der Messwagen verkehrt. Alle Messdaten ausserhalb der jeweiligen ersten Abfahrtszeit und letzten Ankunftszeit eines Zuglaufes werden verworfen. Danach werden die einem Zug zugeordneten Messpunkte pro Sensor und gleicher Sekunde auf den nächstliegenden GTG-Abschnitt projiziert und so über die Netzelement-ID dem GTG-Netz zugeordnet. Dabei können «Abweichungen» oder «keine Zuordnungen» entstehen, welche wie folgt kategorisiert werden können:

- Fehler aufgrund der Zeitsynchronisierung
- Messfehler aufgrund Sensorinitialisierung
- Fehlender oder falscher Gleisabschnitt

Der Grund für die Wahl von ANABEL ist, dass dieses System das einzige (uns bekannte) SBB System ist, welches die örtlichen und zeitlichen Positionen der Zugläufe bereits korreliert liefert. Es ist allerdings zu prüfen, ob bessere Daten zur Verfügung stehen.

## 8.4 Generierung der «Ground Truth»

Gemäss Abschnitt 6.2 wird als «Ground Truth»<sup>16</sup> im SR4.0 Kontext die «Wahrheit» oder «exakte Referenz» im Sinne der Position eines Bezugspunktes (z.B. Drehzapfen des vordersten Drehgestells einer zu lokalisierenden Lokomotive oder hier des Funkmesswagens) über die effektiv befahrenen Gleisabschnitte verstanden. Sie wird zur Ermittlung von Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit verschiedener (Lokalisierungs-)Sensoren und deren Kombinationen (Multisensorik) genutzt.

Quer zu den Gleisen lässt sich die Ground Truth aus der Kombination der Gleistopographie und der Zuglaufdaten gemäss Kapitel 8.3.6 ableiten. Bei korrekten Zuglaufdaten entspricht der Fehler gemäss Kapitel 6.2.2 dem Fehler der Gleistopografie, also 10-20 cm (1 Sigma Standardabweichung). Längs zu den Gleisen fehlt zurzeit eine von GNSS unabhängige, geeignete Referenz. Als Behelfslösung für die Ermittlung des Fehlers längs und quer zum Gleis wird die vorhandene Sensorik auf dem Funkmesswagen mit einem Post-Processing ausgewertet.

Die genaueste Sensorkombination hierzu am Funkmesswagen bildet das [iMAR RQT System](#)<sup>17</sup>. Die Kombination einer «Ring Laser Gyro» basierten «Inertial Measurement Unit (IMU)» mit der im Funkmesswagen weitestgehend schlupffreien und exakt kalibrierten Rad-Odometrie ermöglicht eine sehr genaue und verlässliche relative Lokalisierung entlang des Gleises.

In der vorgenommenen Auswertung wird die Genauigkeit des RQT GNSS durch «post-processing» der GNSS Rohdaten mit den Methoden «Post-Processed Kinematic (PPK)» (einer a posteriori Variante von [«Real Time Kinematic \(RTK\)»](#)) und [«Differential GNSS \(DGNSS\)»](#) wesentlich verbessert.

Unter Miteinbeziehen des RQT lässt sich eine Präzision und «Pseudo-Genauigkeit» für PPK und DGNSS ableiten. Dabei wurde die folgende Vorgehensweise gewählt<sup>18</sup>:

<sup>16</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Ground\\_truth?section=5#Geographical\\_information\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_truth?section=5#Geographical_information_systems)

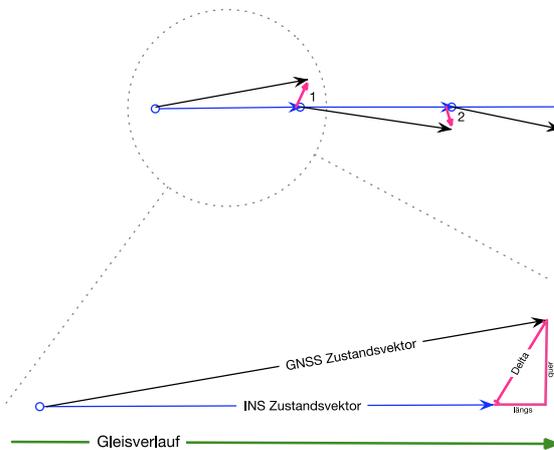
<sup>17</sup> smartrail 4.0: Zwischenbericht [1] Technologie PoC Lokalisierung, Arbeitsbericht, Version 1.2 vom 18. Januar 2019 - Kapitel 2.2.2 Aufbau Datenerfassung PoC, Abbildung 2-1: Aufbau PoC Datenerfassung, SBB Telekommesswagen ([www.railcom.org](http://www.railcom.org)) und Abbildung 2-3: untersuchte Technologien und Algorithmen im Bereich GNSS

<sup>18</sup> Entwickelt von Dr. Raoul R. Schild, Schild & Partner GmbH

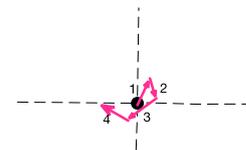
- Das RQT System – als «Inertial Navigation System (INS)» - erlaubt anhand genauer RLG Gyroskope und Beschleunigungssensoren sowie der kalibrierten Odometrie des Funkmesswagens eine exakte Bestimmung der Ortsänderung. Die Messreihen im Funkmesswagen wurden mit 1 Hz, d.h. pro Sensor 1 Punkt pro Sekunde, aufgezeichnet.
- Anhand der GNSS Punktfolge wird der relative Abstand und die Richtungsänderung zwischen zwei Punkten ermittelt. Dabei werden Abstände zwischen der GNSS Antenne und dem RQT System sowie kinematische Vorgänge zwischen Drehgestell und Wagenkasten (Ausdrehen) in Kurven berücksichtigt.
- Der Vergleich zwischen dem relativen Abstand und Richtungsänderung der GNSS Punktfolge mit der Ortsänderung der RQT Systems ergibt einen relativen Fehler zwischen GNSS und RQT. Dieser relative Fehler wird jeweils pro Punktfolge berechnet. Die Abbildung 8-5 Präzision GNSS/INS illustriert das Prinzip.

### Verlauf GNSS / INS Zustandsvektor

Dynamische Situation entlang des Fahrweges



Transformierte statische Situation um fiktive «wahren» Ort



Der INS Zustandsvektor ermöglicht eine Rücktransformation von GNSS Fehlern um eine fiktive statische Position.

Wenngleich diese statische Position mit dem Fehler von INS beaufschlagt ist, kann der GNSS Fehler annähernd ermittelt werden. Der INS Fehler ist pro Zeittakt gut eine Größenordnung kleiner als der GNSS Fehler.

Aus der Verteilung der GNSS Fehler um die fiktive, statische Position ergibt sich bei ausreichend großer Stichprobe eine fiktive GNSS Genauigkeit längs und quer zum Gleis.

Abbildung 8-5: Präzision GNSS/INS

Der relative Fehler pro GNSS Punkt gibt Aufschluss über die Präzision<sup>19</sup> der GNSS Messung in dieser Zeitperiode in diesem Ort. Mittels Rücktransformation der dynamischen GNSS Messreihen anhand des Geschwindigkeitsvektors des RQT, i.e. die relative Ortsänderung zwischen RQT Punkten, lässt sich der relative Ortsfehler der Punktfolgen von GNSS in eine quasi statische Betrachtung um einen fiktiven «wahren» Ort überführen. Daraus kann mit der Kenntnis, dass GNSS Punkte untereinander korreliert sind und einen sogenannten «random walk» um den wahren Ort ausführen, die Genauigkeit von GNSS für alle betrachteten Punkte approximiert werden. Voraussetzung dafür ist, dass das betrachtete System keinem Bias unterliegt. Dazu werden die relativen Fehler einer Submessreihe, d.h. Punktfolgen ohne Unterbrechungen, kumuliert. Es ergibt sich ein «random walk» pro GNSS Submessreihe. Pro GNSS Submessreihe wird die Standardabweichung, wobei eine Normalverteilung der GNSS Fehler unterstellt wird, ermittelt und die Submessreihe um den Mittelwert korrigiert. In der Abfolge werden nur ausreichend lange Submessreihen betrachtet. Der absolute Fehler wird als «pseudo-absoluter» Fehler bezeichnet, weil es sich nach dieser Vorgehensweise um einen statistisch ermittelten Wert handelt. Die zugrunde liegenden Annahmen und Randbedingungen werden im Rahmen von Veröffentlichungen und Konferenzen sowie in Diskussionen mit Fachexperten überprüft. Daher sind die folgenden Ergebnisse und Fehlerwerte als vorläufig zu betrachten<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> Siehe: <https://de.wikipedia.org/wiki/Präzision>

<sup>20</sup> Es handelt sich um eine Hypothese im wissenschaftlichen Sinne, die anhand von Daten und diversitären Ansätzen zu überprüfen ist.

Nach dieser Vorgehensweise ergibt sich für RQT GNSS L1 PPK:

- relative Fehler 1 Sigma: 0,10 Meter quer und 0,10 Meter längs zur Fahrtrichtung
- pseudo-absolute Fehler 1 Sigma: 0,20 Meter quer und 0,20 Meter längs zur Fahrtrichtung.

Für RQT GNSS L1 DGNSSS ergibt sich:

- relative Fehler 1 Sigma: 0,21 Meter quer und 0,20 Meter längs zur Fahrtrichtung
- pseudo-absolute Fehler 1 Sigma: 0,23 Meter quer und 0,23 Meter längs zur Fahrtrichtung.

Während der relative Fehler d.h. Präzision pro GNSS Punkt geschätzt werden kann, lässt sich der pseudo-absolute Fehler d.h. Genauigkeit von GNSS Punkten mit der dargestellten Methode nur in der Gesamtheit für den betrachteten Sensor und die Methode statistisch approximieren. D.h. es wird eine Aussage zum erwarteten Fehler unter bestimmten Randbedingungen getroffen. Für den absoluten Fehler pro Punkt ist keine Aussage möglich.

Erwähnenswert ist, dass die Fehler quer und längs zur Fahrtrichtung sowohl bei der relativen als auch bei der pseudo-absoluten Betrachtungsweise annähernd gleich sind. Unter der noch zu prüfenden Voraussetzung, dass der pseudo-absolute Fehler als Mass für die Genauigkeit hinzugezogen werden kann, wäre ein denkbarer Ansatz, die Genauigkeit zu untersuchender Sensorkombinationen aufgrund der mit Zuglauf und Gleistopographie gerechneten Ground-Truth quer zum Gleis auszuwerten und die entsprechende Auswertung auch als gültig für die Abweichungen in der Längsposition zu betrachten.

Hinsichtlich der geschätzten Präzision und «Pseudo-Genauigkeit» liegen die ermittelten Werte im Rahmen der Technologie und Ergebnissen in anderen Anwendungen. Bei PPK ist zu bemerken, dass die Referenzdaten der EuREF Station Zimmerwald bei Bern entstammen und sich daraus je nach Betrieb des Funkmesswagen eine sehr lange Basislinie (> 100 km) ergeben kann. Neben den schwierigen Empfangsbedingungen entlang Teilen des SBB Netzes führt das dazu, dass bei PPK fast ausschliesslich «floats» und nur sehr wenige «fixes» zu beobachten waren<sup>21</sup>.

Für die Berechnung der «gerechneten Ground Truth» für die Auswertungen in Kapitel 9 (insbesondere Abschnitte 9.5 und 9.6) wird als Basis das iMAR RQT System mit dem oben beschriebenen Verfahren und die so pro Punkt ermittelte Präzision herangezogen. Liegt diese unterhalb eines Schwellwertes, im Falle dieser Auswertung entsprechend der ETCS Balisen Spezifikation definiert als 1 m, werden die Punkte als präzise klassifiziert, vorausgesetzt es liegen drei Punkte in Folge mit einer Präzision geringer als der Schwellwert vor. Diese validen GNSS Ortsfolgen bilden «Stützpunkte», zwischen die die inertial ermittelte Trajektorie des iMAR RQT ausgleichend gelegt wird. Die inertielle Trajektorie wird dabei im Rahmen des Ausgleichs um den Ortsfehler am ersten und letzten Stützpunkt proportional korrigiert.

Generell ergibt sich damit die Randbedingung, dass alle vorgenommenen Auswertungen und Ergebnisse bei denen die «gerechnete Ground Truth» als Referenz dient, mit einer Unsicherheit zu interpretieren sind (Kombinationen von Topografiefehler und GNSS Fehler).

Die Korrektheit der «gerechneten Ground Truth» wird automatisch anhand der digitalen Gleistopografie pro Punkt und dessen Eigenschaften (Gleiskrümmung, Überhöhung und Gradient) verifiziert<sup>22</sup>. Dadurch wird zusätzlich auch die Richtigkeit des Fahrweges i.e. Zuglaufdaten (siehe 8.3.6) geprüft. Dieses Verfahren dient der zurzeit bestmöglichen Verifikation der gerechneten Ground Truth als Basis für die Auswertungen.

---

<sup>21</sup> Siehe: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/RTK\\_Fundamentals](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/RTK_Fundamentals)

<sup>22</sup> Entwickelt von Dr. Raoul Schild, Schild & Partner GmbH

## 9 Ergebnisse

### 9.1 Übersicht Messreihen

Die folgenden Auswertungen wurden für diesen Bericht vorgenommen:

- 9.2 GNSS Abdeckung des SBB Gleisnetzes durch die vom Funkmesswagen mewa12 erhobenen Daten: in diesem Kapitel wird dargestellt, dass die durchgeführten Messungen mittels SBB Funkmesswagen das Gleisnetz abdeckt und demzufolge valide, erste aber noch nicht abschliessende Aussagen in Bezug auf die Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität der betrachteten Sensoren und deren Kombination getätigt werden können.
- 9.3 Überprüfung der GNSS Empfangscharakteristik anhand der Energiezähler GNSS Daten: in diesem Kapitel wird mit Hilfe eines sehr grossen Umfanges an GNSS Daten aus dem Bereich Energiemanagement der SBB die Empfangbarkeit von GNSS Signalen am Schienennetz überprüft. Die Ergebnisse lassen mit hoher Signifikanz auf die Verfügbarkeit von GNSS schliessen und sind komplementär zu den Messungen mit dem SBB Funkmesswagen.
- 9.4 Relative Lokalisierung: Ableitung der Genauigkeit einer Trägheitsnavigation (IMU+ODO) ohne GNSS) in Abhängigkeit von Distanz und Zeit für die Systeme RQT und M200. In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Trägheitsnavigation die heutige Odometrie verbessern kann.
- 9.5 Absolute Lokalisierung: Ermittlung der GNSS Genauigkeit und Präzision pro Sensor und Methode in Bezug zur «ground truth» (Genauigkeit) bzw. in Bezug zur Trägheitsnavigation (Präzision). In diesem Kapitel wird die Leistungsfähigkeit von GNSS am Gleisnetz erörtert.
- 9.6 Ermittlung von Bereichen in Länge mit einer GNSS Qualität unter einem definierten Schwellwert (GNSS «Lücken»). Es wird gezeigt, dass Bereiche mit eingeschränkter GNSS Empfangs- und Leistungsfähigkeit zu überbrücken sind. Es wird erörtert, inwieweit das durch relative Lokalisierung potentiell möglich ist.

Die Reihenfolge der Auswertung und Darstellung folgt der Logik bei der Synthese eines Systems ausgehend von bewährter zur neuen Technologie. Aufbauend auf der bewährten und heute eingesetzten Technologie (Rad-)Odometrie wird die Kombination Trägheitsnavigation mit Rad-Odometrie zur relativen Lokalisierung evaluiert. Danach werden Genauigkeit und Präzision von GNSS sowie deren Verfügbarkeit erörtert.

Die kombinierten Ergebnisse der Auswertungen liefern eine quantitative Basis für einen technologischen Vergleich von Technologien anhand Genauigkeit/Präzision, Verfügbarkeit bei überprüfter Integrität.

### 9.2 GNSS Abdeckung des SBB Gleisnetzes durch die vom Funkmesswagen erhobenen Daten

Seit Mitte 2017 werden mit dem SBB Funkmesswagen - kurz mewa12, wobei «12» für 2012 dem Jahr der Inbetriebnahme steht - GNSS und Daten der Trägheitsnavigation systematisch für Zwecke der Evaluierung der Lokalisierung aufgezeichnet.

Während anfangs Messungen nur tageweise durchgeführt werden konnten, wurde ab Juli 2018 die Erhebung der Daten automatisiert. Von der Erhebung der Daten über eine Vorverarbeitung bis zur

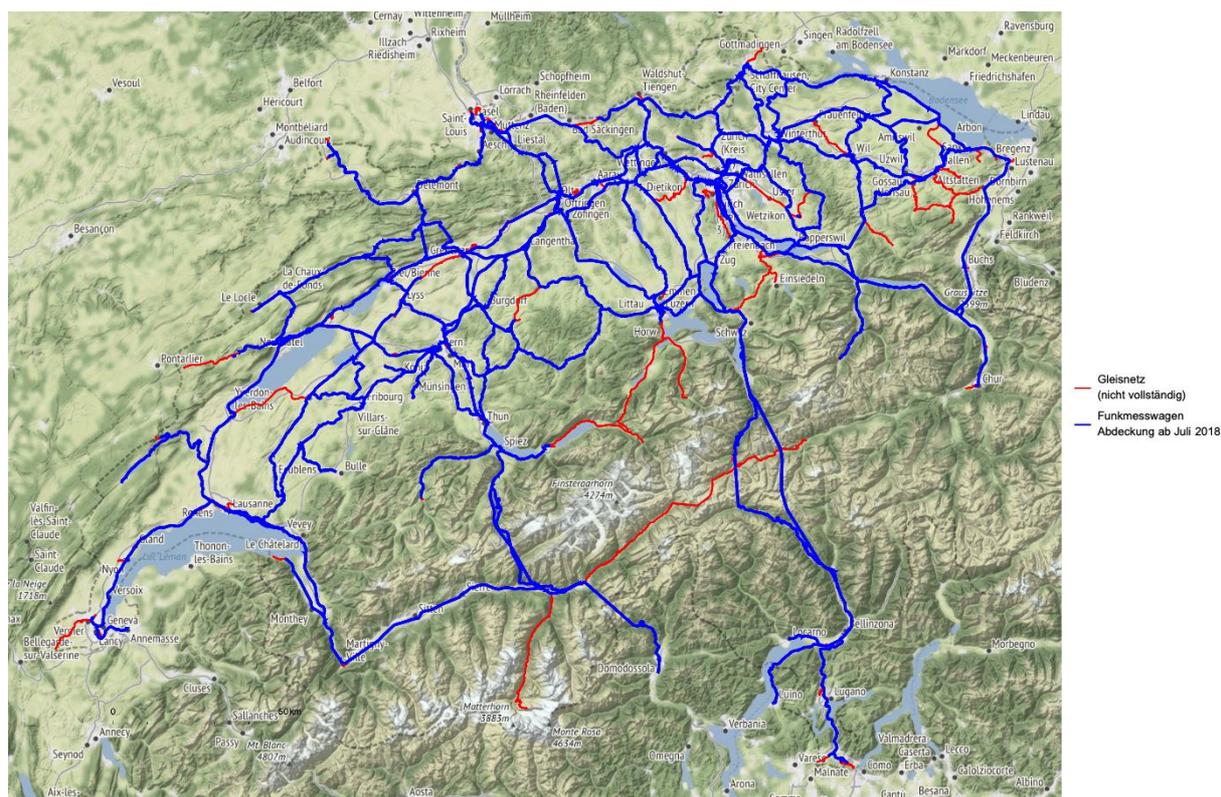
Bereitstellung der Daten im Rahmen einer «Big Data» Anwendung genannt «LocLab» wurden die Schritte fortlaufend automatisiert.

Während Juli 2018 bis Ende August 2019 wurde im Zuge der Funkvermessungsarbeiten aber auch während Überstellungsfahrten annähernd das gesamte Gleisnetz der SBB AG sowie von einzelnen Partnern befahren. Die Aufzeichnung von Daten erfolgt permanent 24/7 d.h. auch während des Stillstands des Funkmesswagens, wobei diese stationär aufgezeichneten Daten aktuell nicht näher ausgewertet werden.

Interessant für weitere Analysen sind dabei die Rohdaten des [AsteRx-U Empfängers](#), der Rohdaten sehr detailliert von allen verfügbaren GNSS i.e. GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU aufgezeichnet.

Insgesamt sind im Rahmen der Messungen ab Juli 2018 weit über 500 GByte Daten und pro Sensor jeweils mehr als 30 000 km zurückgelegter Strecke vorhanden (33 936,8 km beim RQT System), dies entspricht ca. 1700 Zugfahrten.

Die Abbildung 9-1 Abdeckung Messfahrten stellt die befahrenen Strecken dar. Alle wesentlichen Strecken auf der Südwest / Nordost und Nord / Süde Achse wurde mindestens einmal, die Hauptstrecken meist mehrmals befahren.



**Abbildung 9-1: Abdeckung Messfahrten mit dem Funkmesswagen**

Die gesamte Topographie der Schweiz reichend von offenem Gebiet mit guter Empfangssituation nördlich der Alpen, die relevanten Passabschnitte Löschberg und Gotthard mit engen Tälern als auch der südliche Teil der Alpen das Wallis und das Tessin wurden abgedeckt.

Die Empfangssituation für GNSS wird durch verschiedene Effekte beeinflusst, darunter

- den durch die Messantenne in Abhängigkeit von Topographie und festen Bauten «sichtbaren» Himmel, der zusammen mit den Umlaufbahnen der Satelliten determiniert, wie viele Satelliten im besten Fall (ohne temporäre Hindernisse) an einem bestimmten Ort empfangen werden können
- diverse weitere, primär temporäre Effekte wie Schnee, Nässe, Störungen (EMV, Jamming, Spoofing), Laub usw.

Die Auswertungen in Kapitel 9.4 erlauben eine Ableitung der Himmelsicht, die zusammen mit der Kenntnis der Umlaufbahnen die Berechnung der an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit höchstmögliche Anzahl sichtbarer Satelliten erlaubt.

Generell besteht eine Korrelation zwischen der Zahl der sichtbaren Satelliten und der Genauigkeit, wobei diese aber nur schwach ausgeprägt ist und stark von den Eigenschaften, Algorithmen und Empfangssensibilität der Empfänger abhängt. In professionellen Anwendungen mit hohen Anforderungen an Genauigkeit wird neben einer Anzahl von mindestens 6 Satelliten (vgl. [Receiver Autonomous Integrity Monitoring \(RAIM\)](#)) vor allem eine geringe «[dilution of precision \(DOP\)](#)» verlangt.

Für die nachfolgenden Auswertungen ist die Datengrundlage der betrachteten Sensoren aufgrund der guten Abdeckung des SBB Netzes durch den Funkmesswagen im Grundsatz gegeben. Die temporären Effekte wurden allerdings nicht systematisch analysiert.

## 9.3 Überprüfung GNSS Empfangscharakteristik anhand der Energiezähler GPS Daten

### 9.3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Um den betriebliche Nutzen der GLAT Lokalisierung schätzen zu können, ist eine erste Prognose der zu erwartenden Verfügbarkeit im Sinne der Himmelsicht von GNSS notwendig.

Darauf aufbauend könnte ggf. auf die zu erwartende Lokalisierungsgenauigkeit geschlossen werden.

### 9.3.2 Datenanalyse

Anzahl und räumliche Konfiguration der empfangenen Satelliten üben Einfluss auf die Positionsbestimmung aus. Diese zwei Merkmale sind in Echtzeit in den sogenannten DOP (Dilution of Precision) Werten zusammengefasst. DOP Werte variieren mit der Zeit, weil Satelliten sich kontinuierlich bewegen, und mit dem Ort, weil die Sicht zum Horizont und die Signalverbreitung von der Topografie abhängen. In diesem Kapitel wird ein Ansatz entwickelt, um die örtliche Abhängigkeit des Satellitenempfangs entlang des Schweizer Bahnnetzes statistisch zu charakterisieren.

### 9.3.3 Daten

Um eine verursachergerechte Verrechnung des Bahnstroms zu ermöglichen, wird seit 2013 die SBB Flotte mit Energiezählern ausgerüstet, die zusätzlich zum Stromverbrauch auch Positionen aus einem GNSS Empfänger aufnehmen. Diese Analyse stützt sich auf die von den Energiezählern aufgenommenen Positionen der Fahrzeuge und Anzahl empfangener Satelliten.

Die berücksichtigten Daten stammen aus 723 Fahrzeugen von 27 Fahrzeugtypen. Sie wurden von 2016 bis 2019 aufgenommen. Insgesamt besteht der Input der Analyse aus 13.2 Milliarden «Zeit, geographische Position, Anzahl empfangenen Satelliten» Messpunkte.

Die GNSS Empfänger, die in den Energiezählermodulen oder in der Fahrzeugplattform eingebaut sind, sind aus der Perspektive der Messgenauigkeit Consumer-grade Geräte. Sie besitzen oft keine Aussenantenne und sind auf Kosten der Genauigkeit optimiert. Messpunkte fallen nicht genau auf das Gleis

sondern «in die Nähe». Für diese Analyse ist «die Nähe» eines Objektes ein 50m Puffer um dieses Objekt herum.

### 9.3.4 Methode

Das Streckennetz wird in 100m Abschnitte dividiert. Auf beiden Seiten jedes Abschnittes wird quer zum Gleis ein 50m Puffer erzeugt. Messpunkte die in den Puffer fallen werden dem Abschnitt zugeordnet. Die aufwändigen Berechnungen erfolgen in der LocLab Big Data Plattform.

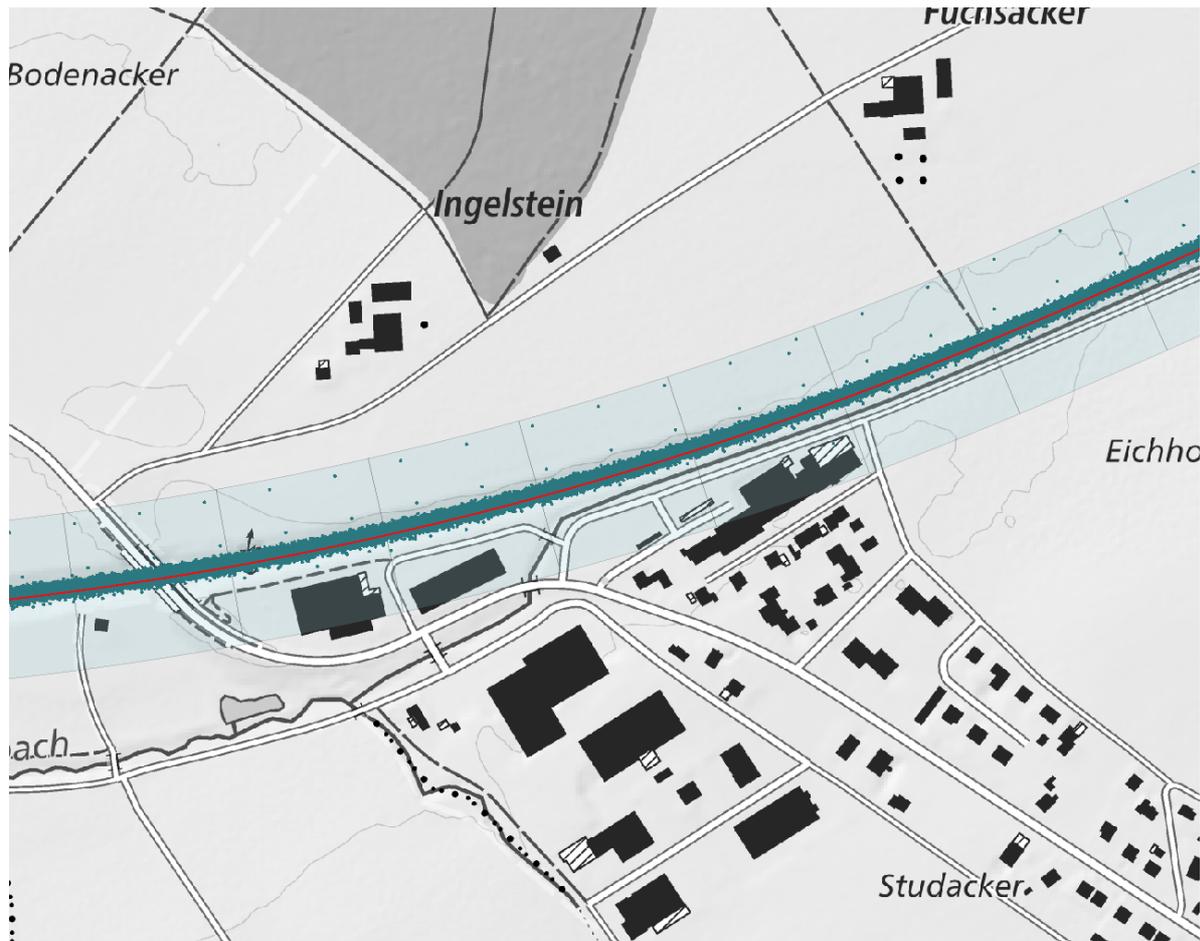


Abbildung 9-2: Strecke, Puffer und Messpunkte

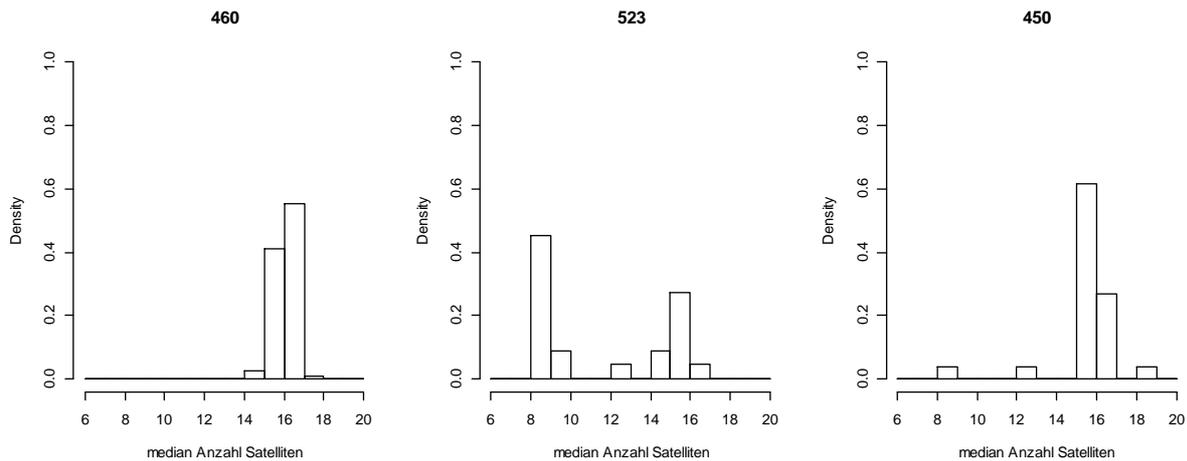
Da detaillierte Hardware wie Software Konfigurationen der Empfänger und der Antennen nicht systematisch bekannt sind, ist eine Plausibilisierung der Daten erforderlich. Sie erfolgt in drei Schritten: Ausfilterung der grob fehlerbehafteten Fahrzeuge, Analyse der Homogenität der Fahrzeugtypen, Zuordnung der Fahrzeuge in GPS-fähig oder GPS+GLONASS-fähig.

### 9.3.5 Ausfilterung der Grobfehler

Neun Fahrzeuge lieferten systematisch null oder eine negative Anzahl Satelliten. Sie werden von der Analyse ausgeschlossen.

### 9.3.6 Intra-Fahrzeugtyp Homogenität

Um die Homogenität innerhalb der Fahrzeugtypen zu beurteilen wird ein Histogramm pro Fahrzeugtyp erzeugt, das die Häufigkeitsverteilung der medianen Anzahl Satelliten jedes Fahrzeugs abbildet. Abbildung 9-3 zeigt Beispiele von diesen Histogrammen für die Fahrzeugtypen Re 460, RABe 523 und Re 450. Aufgrund der Abbildung 9-3: Beispiel-Histogramme der median Anzahl Satelliten für ausgesuchte Fahrzeugtypen. Die x-Achse ist die Anzahl empfangener Satelliten, die y-Achse die prozentuale Verteilung. lässt sich ableiten, dass der Fahrzeugtyp Re 460 eine homogene Gruppe, der Fahrzeugtyp RABe 523 eine inhomogene Gruppe und der Fahrzeugtyp Re 450 eine homogene Gruppe mit Ausnahmen darstellt.



**Abbildung 9-3: Beispiel-Histogramme der median Anzahl Satelliten für ausgesuchte Fahrzeugtypen. Die x-Achse ist die Anzahl empfangener Satelliten, die y-Achse die prozentuale Verteilung.**

Resultierend sind 20 Fahrzeugtypen homogen, davon 16 GPS+GLONASS und 4 GPS; 6 Fahrzeugtypen mit GPS+GLONASS sind homogen mit Ausnahmen; 1 Fahrzeugtyp ist ursprünglich inhomogen (RABe 523) und wird in der Folge in zwei homogene Subgruppen unterteilt.

### 9.3.7 Unterteilung zwischen GPS und GPS+GLONASS fähige Fahrzeuge

Um die einzelnen Fahrzeuge als GPS oder GPS+GLONASS fähig zu qualifizieren werden als Referenzgruppe Fahrzeuge genommen, die homogenen Fahrzeugtypen zugeteilt werden können. Somit ergeben sich zwei Referenzgruppen von Fahrzeugen: eine für GPS und eine für GPS+GLONASS, deren Empfangsverhalten als musterhaft für GPS (resp. GPS+GLONASS) Empfang betrachtet wird.

Folgend wird jedes Fahrzeug neu gegen diese zwei Referenzgruppen getestet. Dieses Mal wird nicht nur das globale Verhalten (Median Anzahl empfangener Stelliten auf dem ganzen Netz) eines Fahrzeugs betrachtet, sondern sein lokales Verhalten. Ein Fahrzeug wird der GPS Gruppe zugeordnet, wenn sein lokales Empfangsverhalten auf Streckenabschnitten statistisch dem der GPS Referenzgruppe gleicht. Kriterien sind ähnliche 1, 5, 50, 95 und 99% Perzentile, wobei das 50% Perzentil (Median) ein höheres Gewicht bekommt. Basierend auf dieser Auswertung werden 64 Fahrzeuge der GPS Gruppe und 608 der GPS+GLONASS Gruppe zugeteilt. Fahrzeuge die nicht so zugeteilt werden können werden nicht weiter betrachtet. Von den 13.2 Milliarden Messpunkte und 723 Fahrzeugen sind 12.3 Milliarden Messpunkte und 672 Fahrzeuge für die weitere kartografische Analyse brauchbar.

### 9.3.8 Erkenntnisse/Ergebnisse

Die Resultate der Analyse sind in Abbildung 9-4 kartiert. Dieselbe Karte ist auf dem Geoportal sowie in einem PDF Anhang mit höherer Auflösung verfügbar. Der Signifikanz halber wird auf eine Aussage für Streckenabschnitte verzichtet, wenn die befahrende Flotte aus weniger als drei unterschiedlichen Fahrzeugen besteht, oder wenn weniger als 150 Messpunkte vorhanden sind.

Das 5%-Perzentil der Anzahl empfangenen Satelliten ist auf einer Farbskala abgebildet. 95% der Fahrzeuge empfangen statistisch mehr Satelliten als den abgebildeten Wert. Die Dicke des umliegenden grauen Strichs weist auf die Anzahl berücksichtigten Messpunkten in einem 100m Abschnitt.

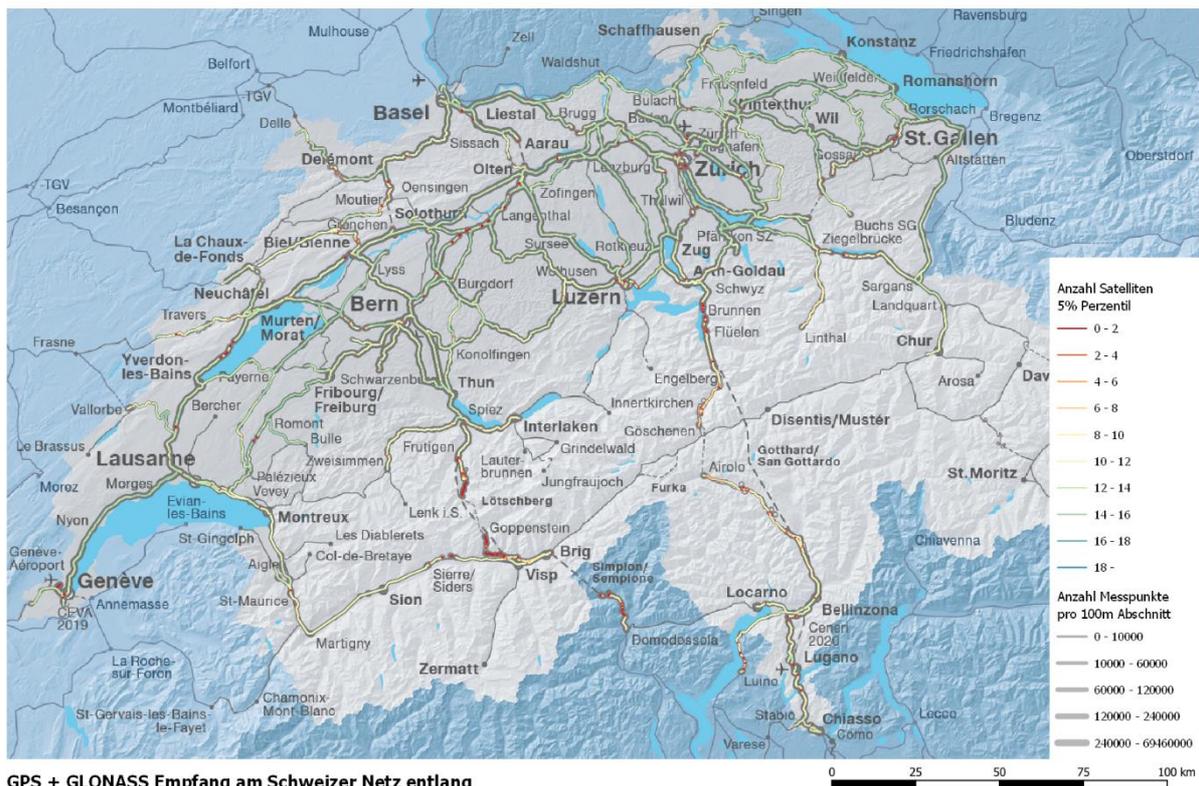


Abbildung 9-4: GPS+GLONASS Empfang entlang des Schweizer Bahnnetzes

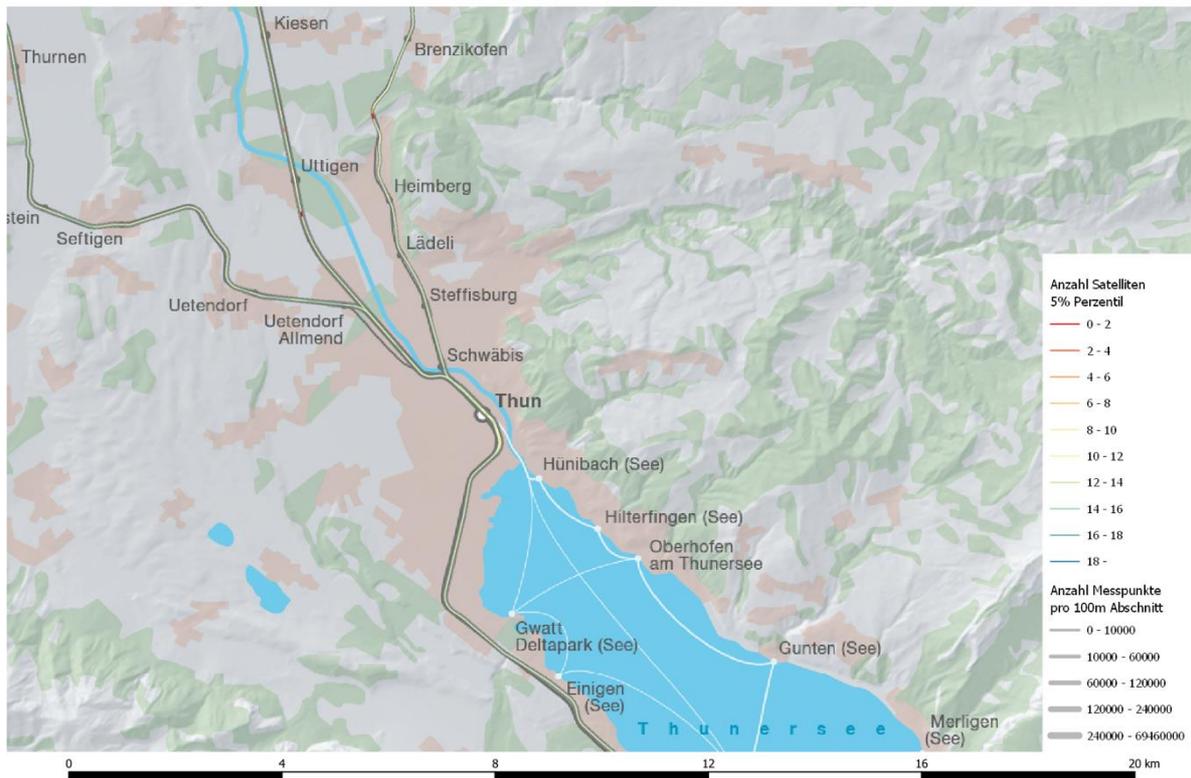


Abbildung 9-5: GPS+GLONASS Empfang - Ausschnitt

Regional betrachtet sehen, mit einem Median von 14, die Strecken des Mittellands am meisten Satelliten. Jura-Strecken folgen mit Median 13 Satelliten. In den Alpen werden entlang der Bahnstrecken median 11 Satelliten empfangen.

Auf lokaler Ebene führen ein- oder beidseitig von Hindernissen resp. Objekten gesäumte Streckenabschnitte zu einem Rückgang der empfangenen Satelliten. Ein Beispiel wird in Abbildung 9-6 gezeigt. Innerhalb 400m variiert die Anzahl empfangenen Satelliten zwischen 11 mit einseitiger Mauer und 14 mit offener Himmelsicht.

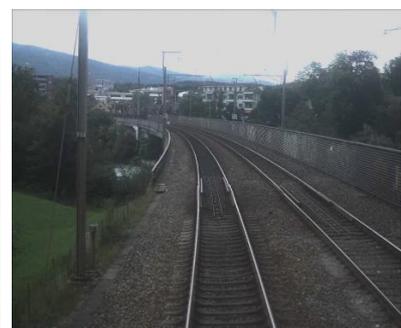
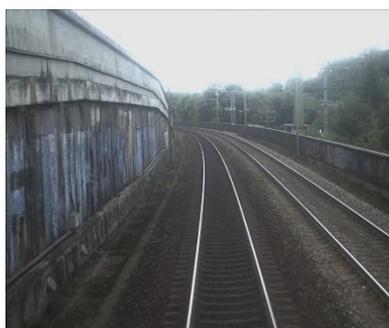
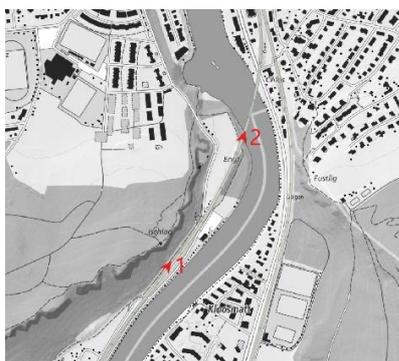


Abbildung 9-6: Variation des Empfangs innerhalb kurzer Distanz in Olten Süd

Ein Artefakt der Analysemethode ist, dass die in der Werkstatt abgestellten Fahrzeuge die Statistik der Streckenabschnitte beeinflussen können. Dieser Effekt tritt nur sporadisch auf und hat auf die allgemeine Statistik einen minimalen Einfluss.

### 9.3.9 Vorschlag weiteres Vorgehen

Diese Analyse wurde auf 100 m Streckenabschnitten durchgeführt. Die Annahme, die diese Wahl gelenkt hat, ist, dass ein GNSS-gestütztes Zugnavigationssystem in der Lage sein sollte, mindestens 100 m ohne Signal zu überbrücken. Wenn der Einfluss der GNSS-Signalverfügbarkeit auf Genauigkeit, Verfügbarkeit und Integrität des Navigationssystems besser bekannt ist, könnten folgende Analysen in Betracht gezogen werden:

- Suche nach längeren GNSS-signalarmen Streckenabschnitten, die überbrückt werden müssen.
- Kartografische Darstellung der erwartbaren GNSS-Ortungsgenauigkeit.

Dafür muss vorzugsweise die Fahrtrichtung in Betracht gezogen werden.

Für die obige Analyse wurden die Anzahl empfangener Satelliten und nicht die Anzahl der von den Positionierungsalgorithmen effektiv genutzten Satelliten verwendet. Wenn die Anforderungen der Algorithmen an die Anzahl empfangener Satelliten sowie deren Geometrie bekannt sind, wird man über die Auswertung der Energiezählerdaten hinausgehen müssen, um die Positionsverfügbarkeit und Genauigkeit vorherzusagen. Es bieten sich neben Messfahrten hierzu folgende Möglichkeiten an, die eventuell zwecks Extrapolation mit der vorliegenden Analyse in Übereinstimmung gebracht werden könnten:

- Simulatives «Ray-Tracing» des Signals anhand der Topografie, des Höhenmodells, und eines Signalausbreitungsmodells.
- Korrelation mit den von einer Dachkamera aufgenommenen Masken (sichtbarer Himmel).

Nicht zuletzt wurde bisher die (zeitliche) Konstellationsabhängigkeit in der Analyse nicht berücksichtigt. Da das statische Stationieren jedes Punktes des Bahnnetzes für die Dauer eines komplette Konstellationszyklus nicht möglich ist, bieten sich nur simulative Methoden an, um die Verfügbarkeit der Satellitensignale an einem gegebenen Ort zu einem gegebenen Zeitpunkt vorherzusagen.

## 9.4 Relative Lokalisierung mit Trägheitsnavigation (IMU+ODO)

Im Kapitel 9.3 wurde anhand der GNSS Empfangscharakteristik dargelegt, dass es GNSS-signalarme Streckenabschnitten gibt. Es kann davon ausgegangen werden, dass in diesen Bereichen keine oder keine zuverlässige absolute Lokalisierung mit GNSS möglich ist. Diese Bereiche können mit relativer Lokalisierung überbrückt werden.

In der heutigen [Bahnsicherungstechnik ETCS wird zwischen Eurobalisen relativ entlang des Fahrweges lokalisiert](#). Dazu bedient man sich der Methode der «Odometrie» (von altgriechisch ὁδός *hodós* „Weg“ und μέτρον *métron* „Mass“ – also „Wegmessung“). Technisch werden dabei Systeme wie etwa eine Rad-Odometrie, Radarsystem u.a. eingesetzt<sup>23 24</sup>.

Im Rahmen bisheriger Analysen zur Machbarkeit der Lokalisierung für smartrail 4.0 wurde die Kombination der Rad-Odometrie mit der Technologie und den Methoden der Trägheitsnavigation als eine der vielsprechenden Möglichkeiten zur Verbesserung der relativen und absoluten Lokalisierung identifiziert. Im Zwischenbericht [1] wird im Kapitel 4.2 auf Basis wissenschaftlicher Arbeiten der letzten Jahre festgestellt, dass sich durch Kombination der Rad-Odometrie mit einer leistungsstarken Trägheitsnavigation der Fehler der Rad-Odometrie deutlich verbessern lässt. Der durch angetriebene Achsen bedingte

---

<sup>23</sup> vgl. Kapitel 3.4.4, Systemtechnik des Schienenverkehrs, Jörn Pacht, 8. überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, 2016

<sup>24</sup> ETCS-Crashkurs, Technologie, Strategie und Umsetzung von ETCS in der Schweiz und in Europa, Michelle S. Roth, Schweizerische Bundesbahnen AG, Februar 2018

Schlupf kann durch Einsatz entsprechender Algorithmen weitestgehend eliminiert werden. Diese Verbesserungen wurden durch Kombination mit nur einem Rad-Odometer und einer IMU erzielt<sup>25</sup>.

Im Funkmesswagen wurde zur Vermessung der Funktechnik des Gotthard Basistunnels (GBT) exakt kalibrierte Rad-Odometrie mit Trägheitsnavigation kombiniert, um unabhängig von der reinen Odometrie kombiniert mit der Gleistopografie, den geographischen Ort der Messungen zu bestimmen. Dazu wurden Systeme von iMAR (RQT und M200) beschafft und für die Anwendung der Bahntechnik angepasst<sup>26</sup>. Anhand dieser hochwertigen Trägheitsnavigationssysteme wird die Leistungsfähigkeit der Kombination Rad-Odometrie mit der Technologie und Methoden der Trägheitsnavigation evaluiert.

In weiterer Folge wird in den Begriff Trägheitsnavigation die Rad-Odometrie subsummiert d.h. es ist die Kombination der beiden Systeme gemeint.

Es wird im Rahmen von ETCS davon ausgegangen, dass der Fehler der Lokalisierung entlang des Fahrweges von einer (Euro-)Balise zur nächstfolgenden als Funktion der zurückgelegten Strecke linear maximal  $\Delta d = \pm (5 \text{ m} + 0.05 \cdot d)$  zunimmt. Auf einer Strecke von einem Kilometer bedeutet das einen Fehler von 55 Metern. Für die Geschwindigkeitsmessung ist der Fehler mit  $\Delta v = \pm 2 \text{ km/h}$  für  $v < 30 \text{ km/h}$ , darüber lineare Zunahme auf maximal  $\pm 12 \text{ km/h}$  für  $v = 500 \text{ km/h}$  definiert<sup>27</sup>. Aufgrund des heutigen Stands der Technik fordert die SBB bei Odometrie-Neubeschaffungen eine relative Genauigkeit von  $\pm 0.02d$ .

Die mittels RQT und M200 aufgezeichneten Daten ermöglichen eine Evaluierung der erreichbaren Genauigkeit einer Trägheitsnavigation bei Einsatz von zwei unterschiedlichen Technologien für die Kreiselssysteme. Beim RQT kommen sehr genaue [Ring Laser Kreisel](#) zum Einsatz, beim M200 mikromechanische Inertialsensoren auf [MEMS Basis](#). Je besser das Kreiselssystem desto genauer kann die Lage des Systems im Raum bestimmt werden, was wiederum die Genauigkeit und den Fehler über Länge und Zeit verringert. Das RQT System weist nach dem Durchfahren des GBT mit knapp 60 km Länge typischerweise einen Fehler längs zum Gleis von 16.22 Metern (95%) auf, das entspricht einem proportionalen Fehler von 0.03%.

Bei der Ableitung der Genauigkeit der Trägheitsnavigation werden Tunneldurchfahrten unterschiedlicher Länge und Dauer auf Fehler in Abhängigkeit von zurückgelegter Distanz und Zeit längs zum Gleis untersucht. Dabei wurde das folgende Verfahren entwickelt:

- mittels dem beschriebenen Verfahren zur Ermittlung der «gerechneten ground truth» wird der jeweils letzte und erste verfügbare GNSS Stützpunkt vor und nach der Tunneldurchfahrt orthogonal auf den bekannten Gleisstrang projiziert und die Länge der Strecke anhand der Gleistopografie ermittelt.
- der letzte und erste verfügbare GNSS Stützpunkt vor und nach der Tunneldurchfahrt wird mit dem letzten und ersten Punkt der Trägheitsnavigation zeitlich synchronisiert (GPS Zeit). Es wird die Länge der Tunneldurchfahrt anhand der chronologischen Abfolge der Punkte der Trägheitsnavigation und der reinen Rad-Odometrie, die ebenfalls zeitsynchron ist, angenähert. Die sich ergebenden Differenzen am Tunnelende bilden die angenäherten Fehler der jeweils verglichenen Systeme: Gleisstrang versus Trägheitsnavigation und Gleisstrang versus Rad-Odometrie.

<sup>25</sup> A localization algorithm for railway vehicles based on sensor fusion between tachometers and inertial measurement units, M Malvezzi, G Vettori, B Allotta, L Pugi, A Ridolfi and A Rindi, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F Journal of Rail and Rapid Transit, May 2014

<sup>26</sup> INS/GNSS/Odometer Data Fusion in Railway Applications, C. Reimer, E. L. v. Hinüber, iMAR Navigation GmbH, Symposium Inertial Sensors & Systems Karlsruhe / Germany, 09/2016

<sup>27</sup> vgl. Folie 51, ETCS-Crashkurs, Technologie, Strategie und Umsetzung von ETCS in der Schweiz und in Europa, Michelle S. Roth, Schweizerische Bundesbahnen AG, Februar 2018

Die folgende Abbildung 9-7 und Abbildung 9-8 zeigen die ausgewerteten Tunneldurchfahrten jeweils für das RQT und das M200 System. Entlang der Hauptstrecken wurden Tunnel oft mehrmals in beiden Richtungen durchfahren.

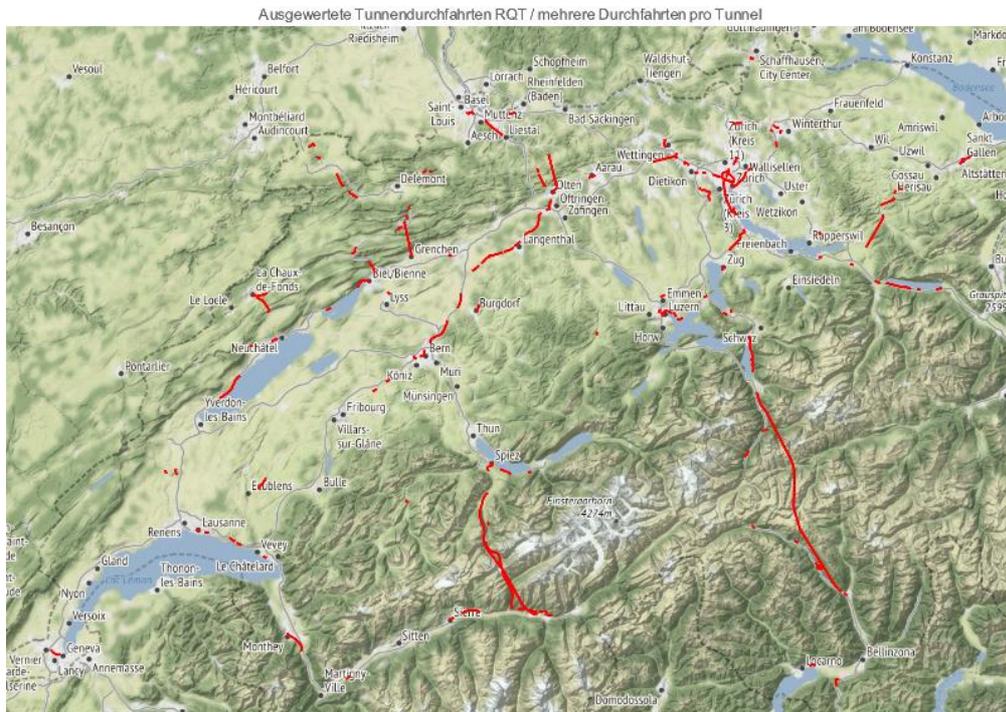


Abbildung 9-7: Ausgewertete Tunneldurchfahrten RQT

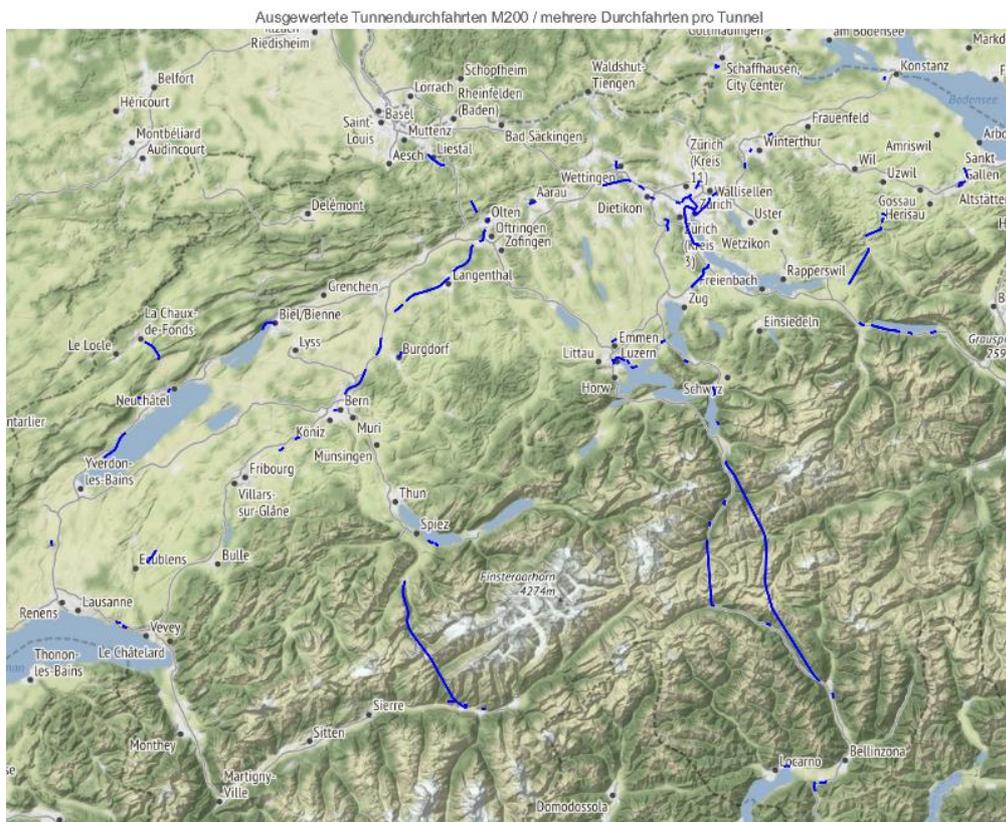
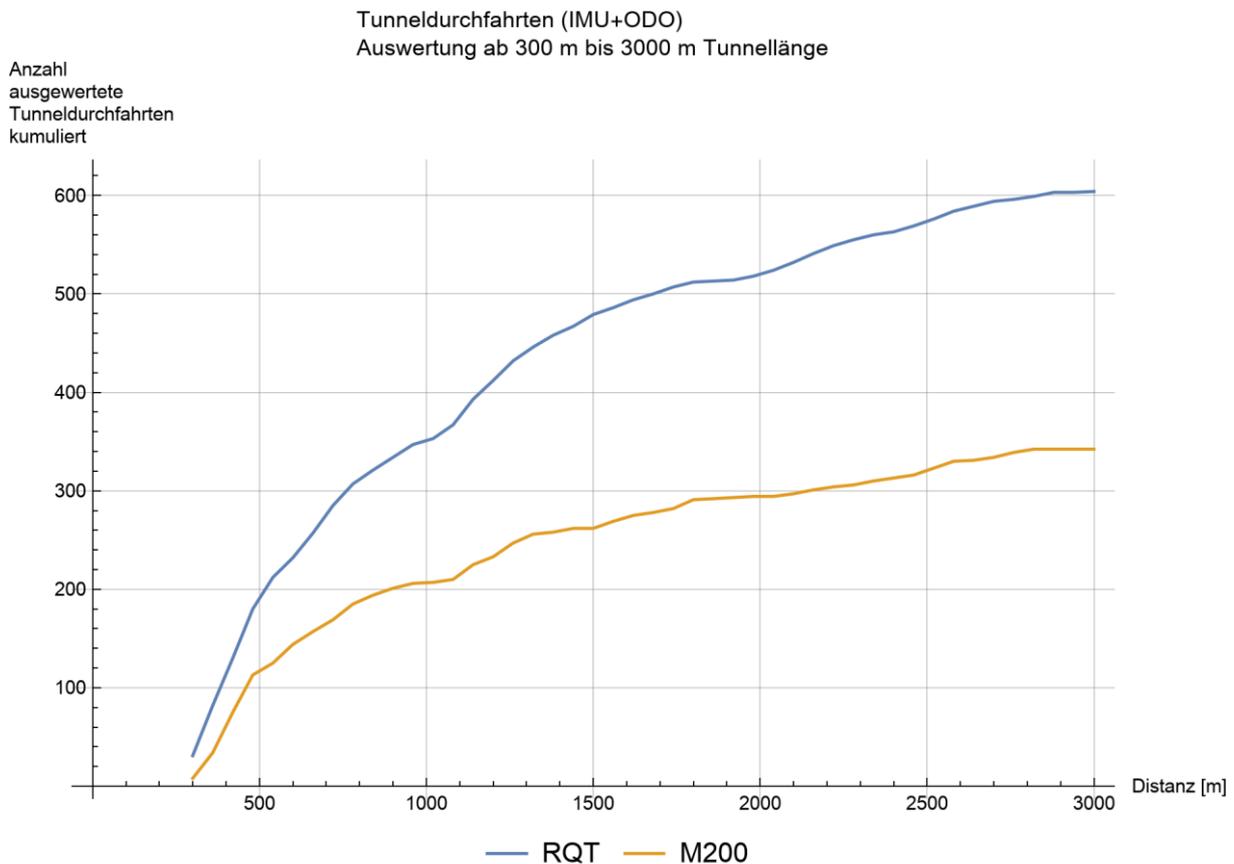


Abbildung 9-8: Ausgewertete Tunneldurchfahrten M200

Die Datenmenge des RQT ist umfangreicher, weil das M200 als «hot standby» für das RQT relativ neu im Einsatz ist und operativ weniger verfügbar war. Die folgende Abbildung 9-9 illustriert diesen Umstand als Anzahl der ausgewerteten Tunneldurchfahrten kumuliert als Funktion der Länge der Tunnel.



**Abbildung 9-9: Ausgewertete Tunneldurchfahrten RQT und M200**

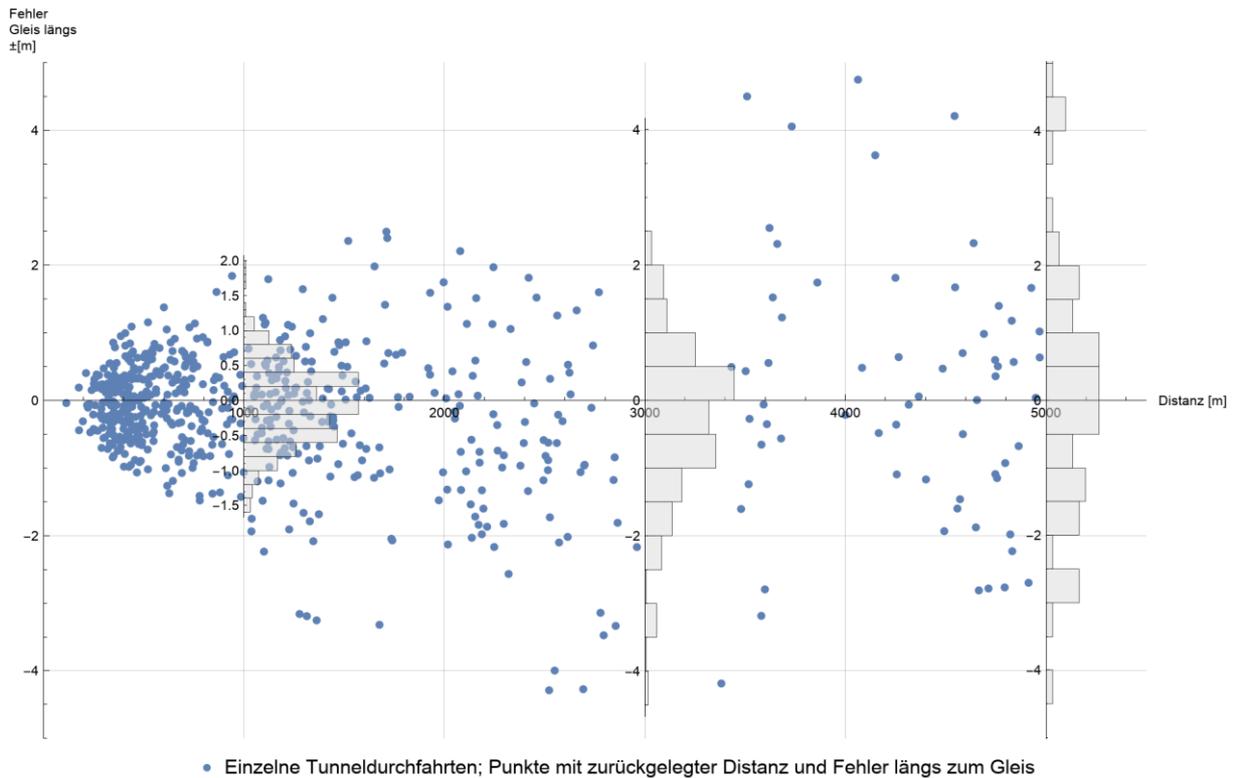
Die Abbildung 9-10 zeigt die Anzahl der ausgewerteten Tunneldurchfahrten als Funktion von Fehler und zurückgelegter Distanz. Jeder Punkt entspricht einer Tunneldurchfahrt. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass dem Fehler über der Distanz offenbar ein [stochastischer Prozess](#) zugrunde liegt, der über die Eigenschaften der Trägheitsnavigation in Interaktion mit der Fahrdynamik und dem Gleissystem entsteht. Wichtig ist, dass die Fehler für finite zurückgelegte Distanzen einer Verteilung folgen, für die eine Standardabweichung ermittelt werden kann<sup>28</sup>.

In der Abbildung werden die Verteilungen als Histogramme für die Distanzen 1000, 3000 und 5000 Meter dargestellt, wobei die im jeweiligen Histogramm enthaltenen Punkte einem finiten Abschnitt von jeweils 1000 Meter d.h. 0 bis 1000 m, 2000 bis 3000 m und 4000 bis 5000 m entstammen.

<sup>28</sup> vereinfachend wird eine Normalverteilung der Grundgesamtheit der Fehler angenommen.

**Tunneldurchfahrten iNAT RQT (IMU+ODO)**

⇒ Darstellung der Punkte als Funktion der Länge der Durchfahrt und gemessenem Fehler am Ende des Tunnels längs zum Gleis.  
 ⇒ Histogramme zeigen die Verteilung der gemessenen Fehler jeweils für spezifische Intervalle der Durchfahrtslänge  
 i.e. 0 bis 1000 m, 1000 bis 3000 m und 3000 bis 5000 m.

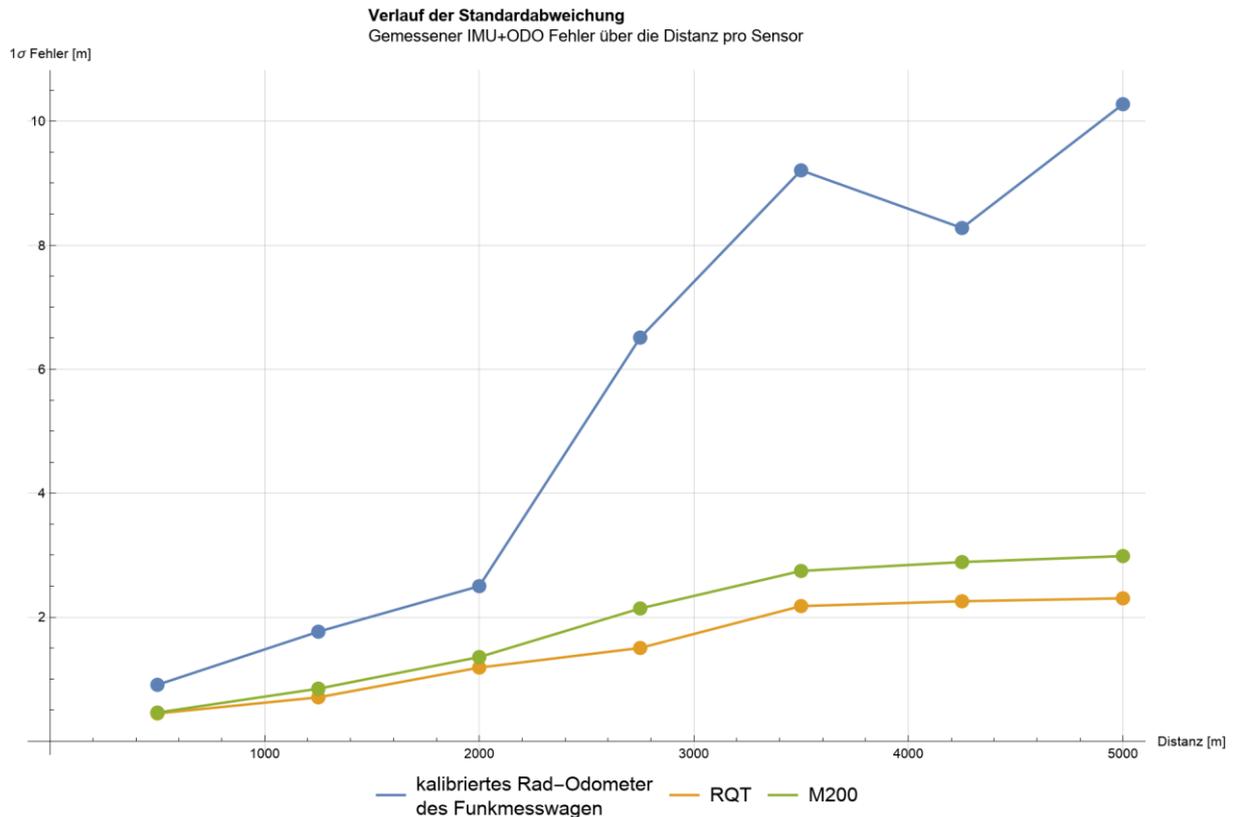


**Abbildung 9-10: Tunneldurchfahrten RQT als Stochastischer Prozess**

Aus den vorliegenden Daten der Tunneldurchfahrten wird ein Modell für Fehler der Trägheitsnavigation abgeleitet. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- die Daten der Tunneldurchfahrten werden für jeweils Zeit und Distanz in finite Abschnitte unterteilt («binning»). Um die Eigenschaften des stochastischen Prozesses anzunähern, werden die finiten Abschnitte möglichst klein gehalten.
- Pro finiten Abschnitt wird die Standardabweichung der Fehler gebildet.
- Somit gibt es pro finiten Abschnittsdistanz bzw. Zeit eine Standardabweichung der Fehler. Aufbauend darauf wird ein Modell für den Verlauf der Standardabweichungen der Fehler ermittelt.
- Die Ergebnisse werden pro Sensor RQT/M200 für den Verlauf über Distanz und Zeit in Diagrammen dargestellt. Daraus kann der Fehler der Trägheitsnavigation für eine bestimmte Distanz oder Zeit abgegriffen und mit einem Vertrauensintervall berechnet werden.

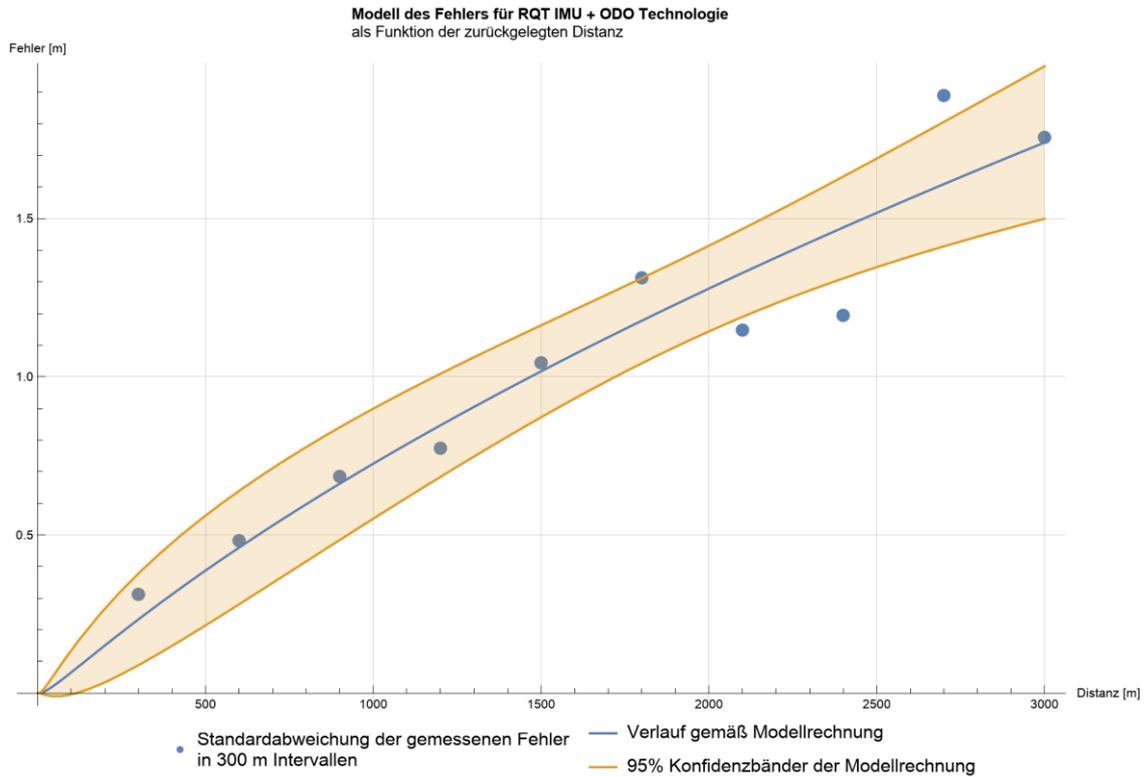
Die Abbildung 9-11 stellt die Standardabweichungen der Fehler für die Sensoren Odometrie M200, RQT und M200 entlang des Gleises als Funktion der zurückgelegten Distanz dar. Für die Standardabweichungen wurden finite Abschnitte mit 750 Meter beginnend bei 300 m Länge gebildet. Jeder Punkt entspricht somit der Standardabweichung der Fehler für die letzten 750 m zurückgelegte Distanz.



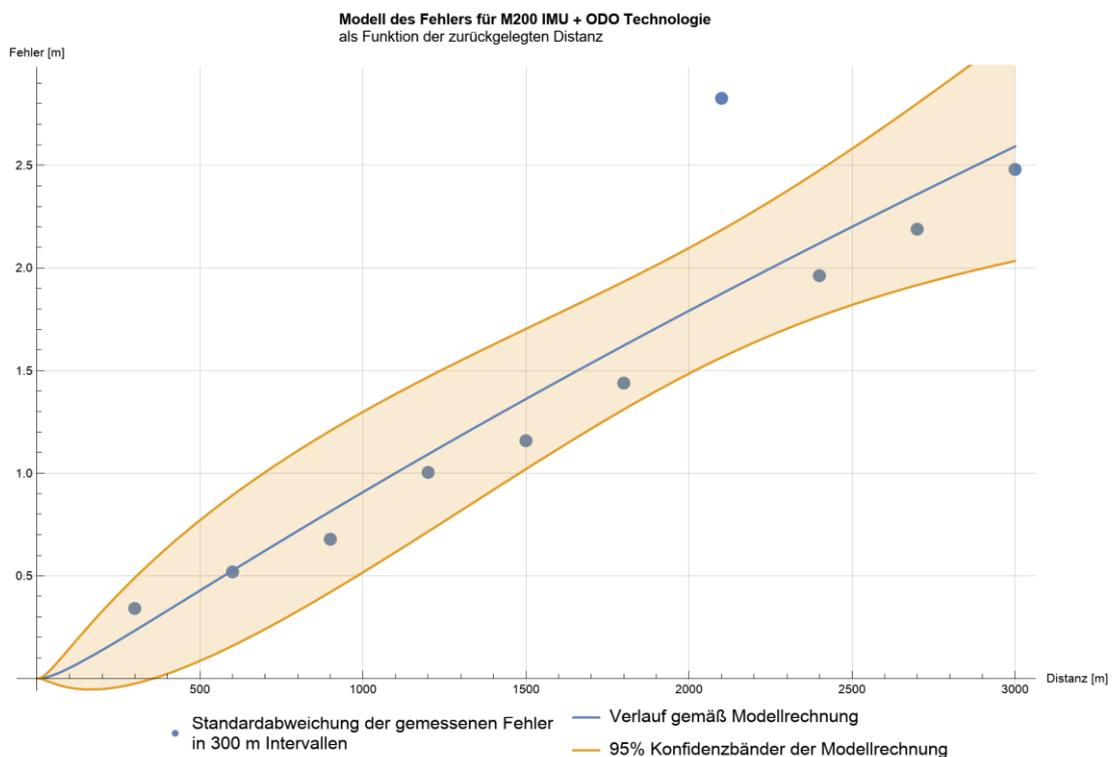
**Abbildung 9-11: Fehler über Distanz Sensoren RQT/M200**

Bis zu einer Distanz von etwa 1000 Metern (1 km) liegen die 1 Sigma Fehler von RQT und M200 ca. gleichauf mit einem etwas grösseren Fehler beim kalibrierten Rad-Odometer des Funkmesswagen. Mit zunehmender Distanz wird der Fehler beim Rad-Odometer deutlich grösser. Das RQT zeigt den flachsten Fehlerverlauf über die Distanz. Aus dem Diagramm folgt, dass die Trägheitsplattformen von RQT und M200 (beide jeweils gestützt durch die Rad-Odometrie) – bei unterschiedlicher Technologie – im Vergleich zur reinen Rad-Odometrie zu einer deutlichen Verringerung des Fehlers (etwa um den Faktor 2) über die Distanz führen.

In den folgenden beiden Abbildungen wird jeweils das für M200 und RQT abgeleitete Modell des Fehlers über die Distanz dargestellt. Bei der Ableitung des Modells wurden Standardabweichungen für finite Abschnitte mit 300 Meter gebildet und als blaue Punkte dargestellt. Die blaue Linie ergibt sich aus dem abgeleiteten Modell für den Verlauf der Standardabweichungen der Fehler. Die orangenen Linien bzw. Bereiche bilden das Vertrauensintervall für das Modell.



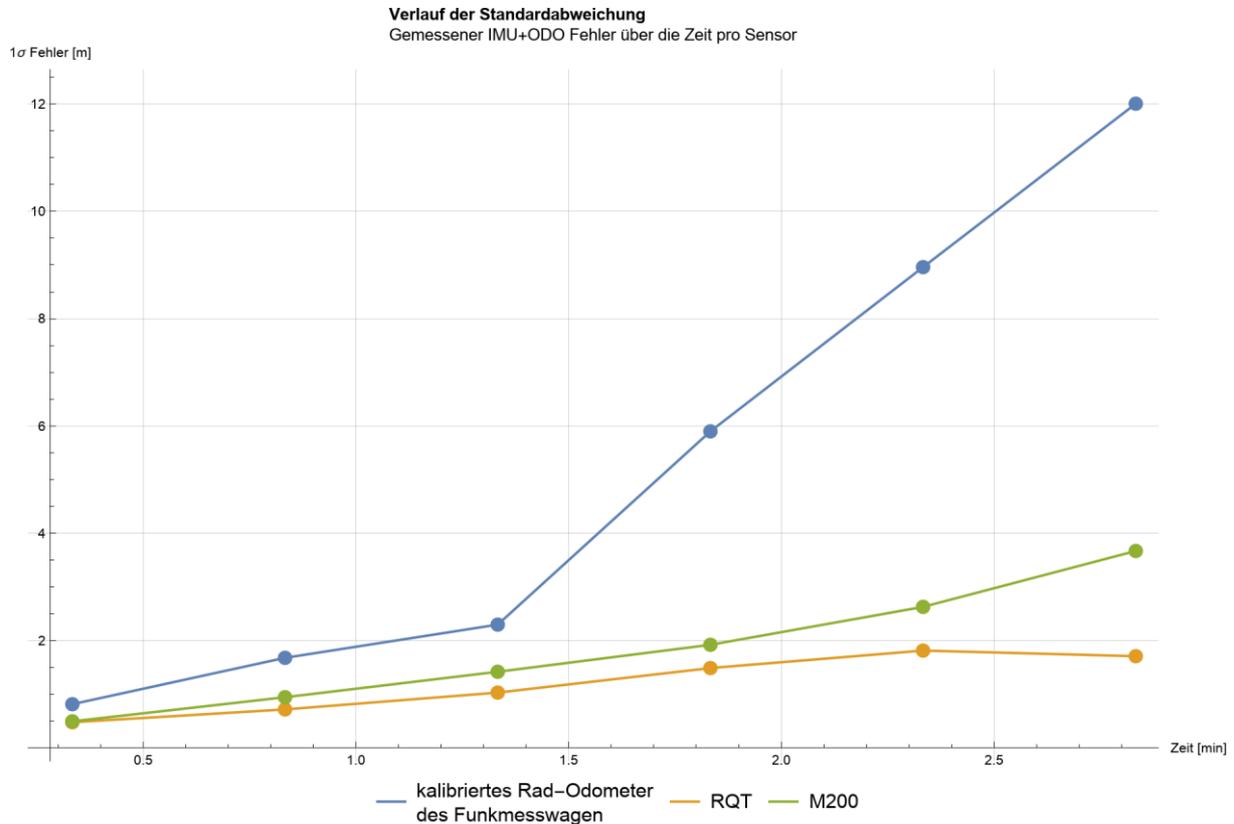
**Abbildung 9-12: Modell des Fehlers RQT als Funktion der Länge des Tunnels**



**Abbildung 9-13: Modell des Fehlers M200 als Funktion der Länge des Tunnels**

Der Fehler der Trägheitsnavigation hängt nicht nur von der zurückgelegten Distanz, sondern auch von der Zeitdauer, in der das System «frei schwingt», ab.

Analog dem Vorgehen beim Fehler über die Distanz werden in der Abbildung 9-14 die Standardabweichungen der Fehler für die Sensoren kalibrierte Rad-Odometrie des Funkmesswagens sowie RQT und M200 (beide jeweils gestützt durch die kalibrierte Rad-Odometrie) entlang des Gleises als Funktion der Zeit dargestellt.



**Abbildung 9-14: Fehler über die Zeit Sensoren RQT/M200**

Es zeigt sich in Bezug auf die Verläufe der Fehler einzelner Technologien ein ähnliches Bild wie beim Verlauf über die Distanz.

Unterstellt man eine mittlere Geschwindigkeit von 30 m/s oder 108 km/h so werden Tunnel bis 1000 m innerhalb von knapp über 33 Sekunden durchfahren. Auf den Hauptstrecken NBS und auch GBT wird deutlich schneller bis ca. 56 m/s gefahren.

Relevant ist der Fehler über die Zeit insbesondere bei langsamen Fahrten, im Falle des Funkmesswagens oft mit Stillstand im Tunnel für Messungen der Funkabdeckung.

Die analoge Ableitung eines Modells für den Fehler über die Zeit erfolgt in den folgenden beiden Abbildungen. Es handelt sich dabei um Verläufe der Fehler über die Zeit mit den Sensoren in Bewegung. Ein Fehler bei längerem Stillstand kann daraus nicht abgeleitet werden d.h. eine Extrapolation über die 3 min hinaus ist nicht zulässig. Berücksichtigt man die oben erwähnten betrieblichen Durchschnittsgeschwindigkeiten, verhalten sich die Fehler über Distanz und Zeit ähnlich.

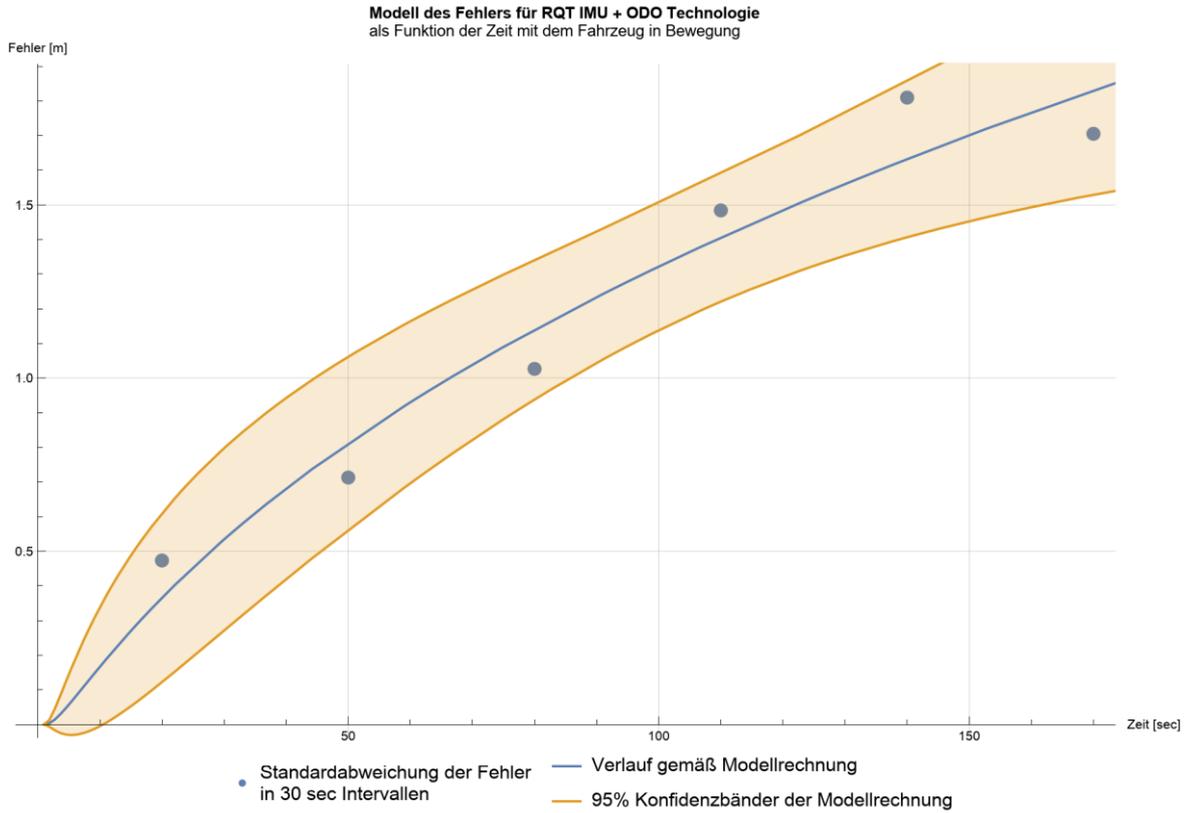


Abbildung 9-15: Modell des Fehlers RQT als Funktion der Dauer der Tunneldurchfahrt

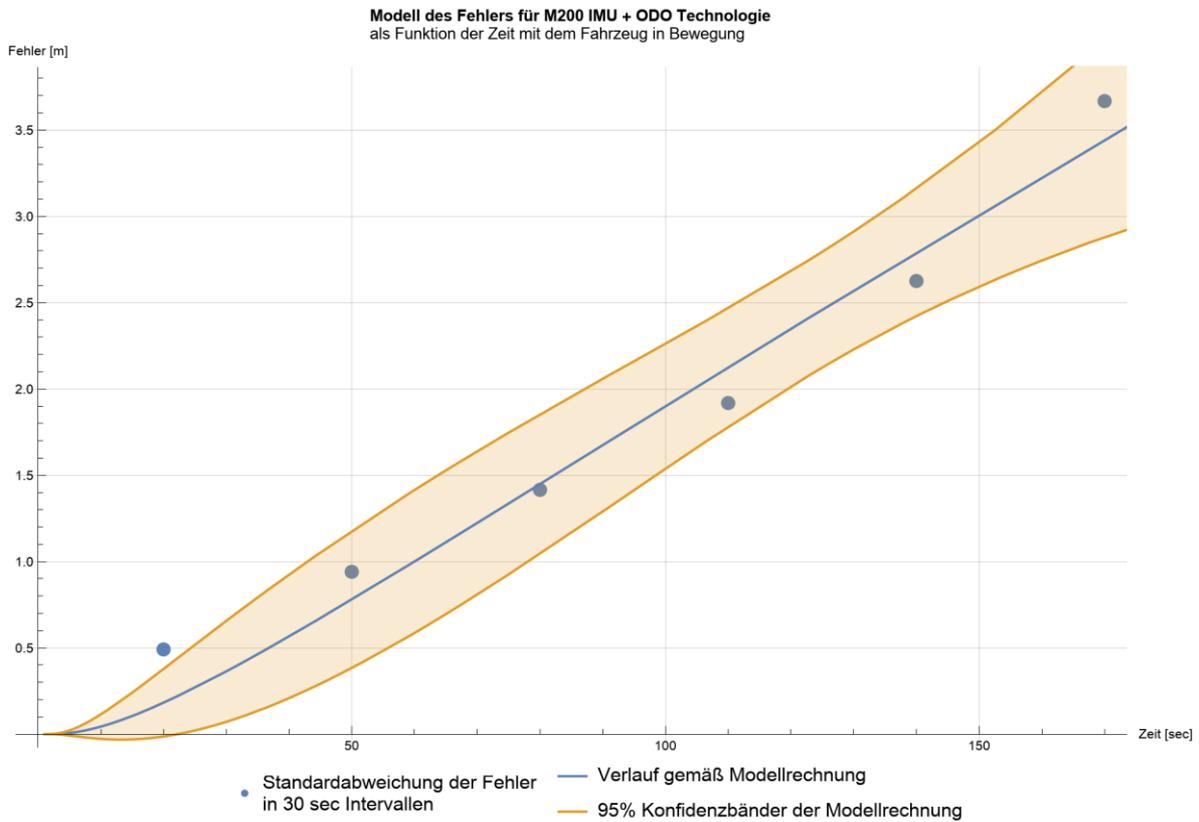


Abbildung 9-16: Modell des Fehlers M200 als Funktion der Dauer der Tunneldurchfahrt

Die Modelle für den Fehler über Distanz wurde jeweils über einen eingeschränkten Datensatz in Bezug auf die in den Abbildungen dargestellten oberen und unteren Grenzen für Distanzen ermittelt. Nichtsdestotrotz ergibt eine Überprüfung der aus dem Modell abgeleiteten Fehler für lange Distanzen i.e. 30 km und 50 km im Falle von RQT ein weitgehend konsistentes Ergebnis im Vergleich zu den von iMAR im Zuge der Implementierung des RQT Systems im Funkmesswagen beim GBT beobachteten Werten<sup>29</sup>.

Es sei an diese Stelle erwähnt, dass der Fehler einer Trägheitsnavigation nicht nur von der Länge der zurückgelegten Distanz und der Zeit abhängt, sondern von vielen weiteren Faktoren wie Grössen und Verläufe der Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, Kurven sowie generell von der Anwendung und den damit verbundenen Faktoren wie Massen, Vibration, Stösse, Bewegungen entlang bestimmter Achsen usw. Wie eingangs erwähnt, wurden RQT und M200 in Bezug auf die Methodik der Trägheitsnavigation u.a. dem Modell der Sensorfusion, das einem klassischen Ansatz mit Bewegungsgleichungen nach Newton folgt, bereits auf die Besonderheiten der Anwendung Bahntechnik angepasst.

Basierend auf den Messungen und Auswertungen lässt sich feststellen, dass:

- mittels Trägheitsnavigation (d.h. IMU mit Rad-Odometrie) gegenüber der reinen, sehr gut kalibrierten Rad-Odometrie am Funkmesswagen eine Verbesserung des Fehlers längs zum Gleis um ca. einen Faktor 2 zu beobachten ist, und
- das M200 mit verhältnismässig günstigen MEMS Kreisel gegenüber RQT System mit sehr teuren RLG Kreiseln auf kürzere Distanzen 3-5 Kilometer einen nur geringfügig grösseren Fehler längs zum Gleis aufweist.

Im Zuge vertiefter Untersuchungen müssen weitere einzelne, oben erwähnte Faktoren anhand der bisherigen Daten und weiterer Auswertungen auf deren quantitativen Einfluss untersucht werden. Dabei sei insbesondere die Rad-Odometrie bei angetriebenen Achsen erwähnt. Aufbauend auf den in der Einleitung zu dem Kapitel erwähnten, vielversprechenden Arbeiten zu diesem Thema gilt es an Fahrzeugen mit angetriebenen Achsen zu untersuchen, inwieweit anhand geeigneter Methoden Schlupf erkennbar und durch Trägheitsnavigation kompensierbar ist. Bereits heute sind dazu in den Systemen RQT und M200 potentiell geeignete Methoden (u.a. Erkennen von «Ausreissern» bei der Odometrie) implementiert. Unbenommen dessen sollte im Rahmen von smartrail 4.0 unbedingt der technologische Ansatz einer möglichst genauen relativen Wegmessung verfolgt werden.

---

<sup>29</sup> vgl. Tabelle 2, INS/GNSS/Odometer Data Fusion in Railway Applications, C. Reimer, E. L. v. Hinüber, iMAR Navigation GmbH, Symposium Inertial Sensors & Systems Karlsruhe / Germany, 09/2016

## 9.5 Absolute Lokalisierung – Ermittlung der GNSS Genauigkeit und Präzision pro Sensor und Methode

Neben einer generellen Genauigkeit von GNSS und Methoden ist eine spezifische, anwendungsbezogene Qualität der Lokalisierung ausgedrückt als Präzision und/oder Genauigkeit bei geprüfter Plausibilität der gerechneten Ground Truth sowie deren örtliche und zeitliche Verfügbarkeit für einzelne Sensoren und Methoden am Gleisnetz wichtig.

Bei einer Lokalisierung für smartrail 4.0 ist die Qualität, die heute für Eurobalisen spezifiziert ist, eine Grundlage. Diese definiert für das Erkennen der Balisenmitte einen zulässigen Fehler innerhalb 1 Meter «for vital purposes»<sup>30</sup>. Technisch wird damit die Präzision zur Erkennung einer Balise beschrieben, die wiederum verlegt im Gleisfeld mit einer potentiell definierten Genauigkeit relativ zu einem Bezugssystem lokalisiert ist.

Zur Bestimmung der Qualität der Lokalisierung werden die Präzision und die Genauigkeit herangezogen. Es wird dabei wie folgt vorgegangen:

- Die Genauigkeit wird relativ in Bezug zu einer möglichst genauen Abfolge von Punkten («ground truth») ermittelt. Dabei wird pro Punkt eines Sensors und Methode der geographische Fehlervektor (im WGS 84 Bezugssystem) zur «gerechneten ground truth» berechnet und bezogen auf die Fahrtrichtung in einen Fehleranteil quer und längs zum Gleis aufgeteilt.
- Die Präzision wird relativ (kinematisch) in Bezug zu einem Inertialsystem (IMU) ermittelt: Es wird das in Kapitel 8.4 und im Zwischenbericht [1] beschriebene Verfahren angewendet.

Bei der Ermittlung von Genauigkeit und Präzision wird ein punktwiser Vergleich von Sensoren und Methoden zur selben Zeit durchgeführt. Bei dieser Auswertung sind die Punkte auf dieselbe GPS Zeit synchronisiert<sup>31</sup>.

Die Genauigkeit wird relativ im punktwisen Vergleich zu einer «gerechneten ground truth» ermittelt. Bei der in Folge durchgeführten Auswertung wird die «gerechnete ground truth» aus Kapitel 8.4 mit der GNSS Methode PPK als Referenz bezeichnet. Die Referenz unterliegt wie andere GNSS Sensoren und Methoden einem Fehler.

Beim punktwisen Vergleich der GNSS Sensoren/Methoden mit der Referenz kumulieren die Fehler der vermessenen GNSS Sensor/Methode und der Referenz (stochastische Faltung). Hierbei wird näherungsweise von Normalverteilungen der Fehler und deren Unabhängigkeit ausgegangen, sowohl bei GNSS Sensor/Methode und der Referenz (<https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Accuracy>).

$$N(\mu_{\text{ref}}, \sigma_{\text{ref}}^2) * N(\mu_{\text{Sensor/Methode}}, \sigma_{\text{Sensor/Methode}}^2) = N(\mu_{\text{ref}} + \mu_{\text{Sensor/Methode}}, \sigma_{\text{ref}}^2 + \sigma_{\text{Sensor/Methode}}^2) \text{ auf } \mathbb{R} \times \mathbb{R}_{>0}$$

wobei  $N(\mu_{\text{ref}}, \sigma_{\text{ref}}^2)$  die Referenz darstellt,

und  $N(\mu_{\text{Sensor/Methode}}, \sigma_{\text{Sensor/Methode}}^2)$  die jeweiligen, vermessenen GNSS Sensoren/Methoden.

Für die Referenz wird von einem  $\mu_{\text{ref}} = 0$  ausgegangen.

Das  $\sigma_{\text{ref}}$  beinhaltet:

- den Fehler der GNSS Methode PPK,
- den Fehler der relativen Lokalisierung mittels RQT IMU+ODO zur Überbrückung der Bereiche mit weniger präzisiertem GNSS (Methode PPK),

<sup>30</sup> vgl. Kapitel 2.2, D5.3 EGNSS Target Performances to meet railway safety requirements, Satellite Technology for Advanced Railway Signalling, 30/04/17

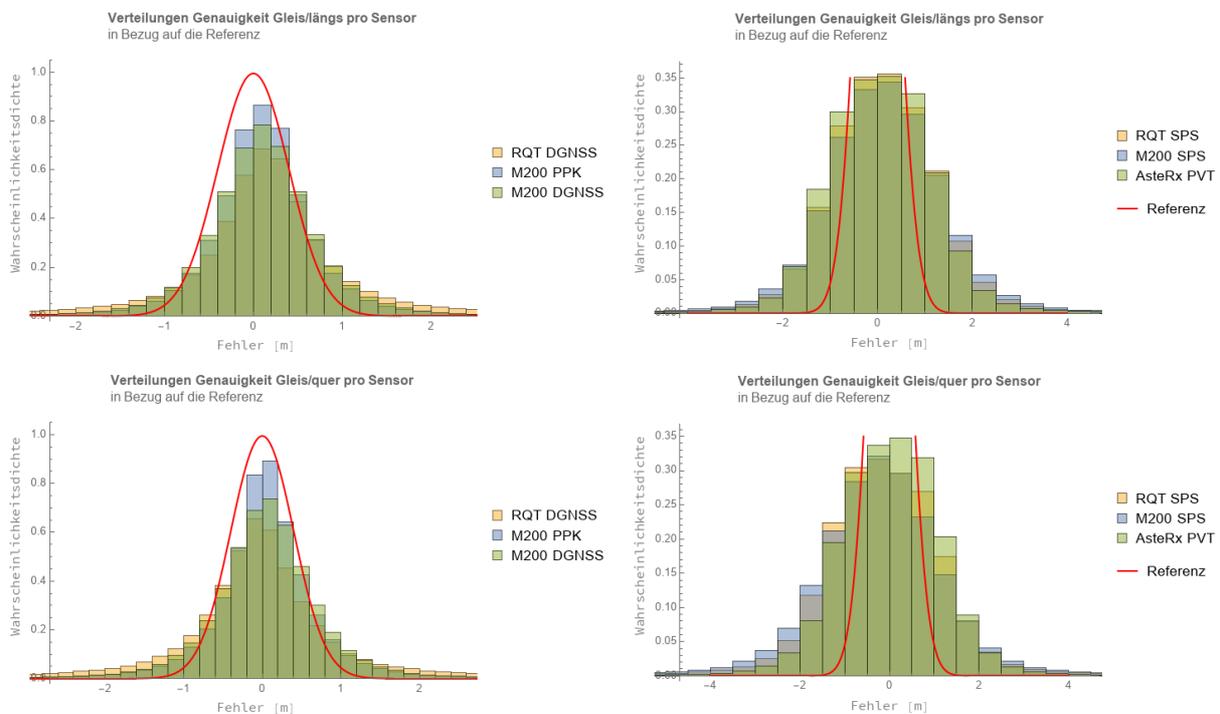
<sup>31</sup> Es sind auch andere Zeitsysteme z.B. GALILEO möglich. Wichtig ist eine einheitliche Zeitreferenz innerhalb der Systemgrenzen.

- einen Fehler der Gleiskarte, der aber nur in Zusammenhang mit der Überprüfung der Integrität der «gerechneten ground truth» eine Rolle spielt,
- Fehler beim Ausgleich unterschiedlicher Bezugspunkte für GNSS (i.e. Antennen) und Trägheitsnavigation.

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse zur Referenz aus Kapitel 8.4 und Annahmen zu den oben dargestellten Fehlern wird für  $\sigma_{\text{ref}} \sim 0.4$  m angesetzt.

Die folgende Abbildung zeigt die Verteilungen der gemessenen Fehler (i.e. Genauigkeit) der einzelnen GNSS Sensoren/Methoden als Wahrscheinlichkeitsdichten für den Fehler in Längs- und Querrichtung zum Gleisverlauf bezogen auf die Referenz. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Fehler der Referenz ist rot dargestellt.

Aus dieser Darstellung wird offenkundig, dass die aktuell vorhandene Referenz für einen punkweisen Vergleich zur Evaluierung der Genauigkeit problematisch ist. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Fehler der Referenz ist in einer ähnlichen Grössenordnung wie die zu vermessenden GNSS Sensoren/Methoden.



**Abbildung 9-17: Verteilungen der gemessenen Fehler (i.e. Genauigkeit) der einzelnen GNSS Sensoren/Methoden**

Trotz dieser Problematik zeigen die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der einzelnen GNSS Sensoren/Methoden, dass

- Die Sensoren/Methoden RQT/DGNSS, M200/PPK und M200/DGNSS im punkweisen Vergleich zur Referenz längs und quer zum Gleis die grösste Genauigkeit aufweisen. Im Vergleich zur Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Referenz verlaufen die Verteilungen flacher. Das ist durch die Überlagerung der Fehler aus Referenz und zu vermessenden Sensoren/Methoden bedingt.
- Die Sensoren/Methoden RQT/SPS, M200/SP und AsteRx/PVT weisen im punkweisen Vergleich zur Referenz längs und quer zum Gleis die geringste Genauigkeit auf.

Die Tabelle 9-1 Verfügbarkeit präziser Punkte ( $< 1$  m) nach Sensoren und Methode zeigt, dass über den gesamten Messzeitraum sowie alle Sensoren und Methoden, mit Ausnahme RQT DGNSS, annähernd ein Anteil von 56 - 70% präziser Punkte d.h. besser als 1 m zu beobachten ist. Dabei werden

Punkte betrachtet, die während Messfahrten aufgezeichnet wurden, d.h. Fahrten mit einem determinierten Fahrweg.

Für präzise Punkte werden unter Nutzung der Referenz die Wahrscheinlichkeiten einer Genauigkeit dieser Punkte besser als 1,5 m, 3 m und 5 m dargestellt<sup>32</sup>.

Sensoren & Methoden	Positionen gesamt	Positionen präziser 1 m	Verhältnis Punkte präzise / gesamt	Wahrscheinlichkeit [%] Positionen präziser 1 m und		
				Genauigkeit besser 1,5 m	Genauigkeit besser 3 m	Genauigkeit besser 5 m
RQT PPK	2 116 659	1 238 544	0.585141	Referenz	Referenz	Referenz
RQT DGNSS	2 026 188	642 656	0.317175	99.0347	100.	100.
M200 PPK	1 090 457	651 516	0.597471	97.0198	99.9978	100.
M200 DGNSS	1 088 813	610 774	0.560954	97.1455	99.9985	100.
AsteRx PVT	1 592 127	1 122 615	0.705104	83.074	99.4021	99.9995

**Tabelle 9-1: Verfügbarkeit präziser Punkte (< 1 m) nach Sensoren und Methode**

Die Genauigkeit in Tabelle 9-1 wurde gegen die Referenz, also die gerechnete Ground Truth, ausgewertet. Die zugrundeliegenden Daten wurden auf «Ausreisser» grösser 3 resp. 5 m anhand der Gleiskarte überprüft. Dabei wurde evaluiert, ob Ausreisser durch einen Fehler der Referenz verursacht wurden, d.h. wenn die Referenz gemäss Karte und Zuglaufdaten nicht auf einem Gleis lag aber der Messpunkt schon. Für diese Fälle wurden die Ausreisser bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Dabei gilt aber zu beachten, dass mit diesem Vorgehen keine Fehler identifiziert werden können, wenn sowohl Referenz als auch Messpunkt in die gleiche Richtung ungenau sind, da dann die gerechnete Genauigkeit trotzdem geringer als die Schwellwerte ausfallen kann und keine manuelle Kontrolle ausgelöst wird. Um die korrekte Funktion einer «Integritätsprüfung» von GNSS über den INS Zustandsvektor zu überprüfen, sind weitere Auswertungen und manuelle Prüfungen unbedingt notwendig. Abgesehen von einer besseren Groundtruth sind auch umfangreichere Daten unumgänglich.

Beim Einsatz von GNSS Sensoren und Methoden gibt es grosse Unterschiede, die sich in der Wechselwirkung von Genauigkeit und Präzision widerspiegeln. Die Ergebnisse von AsteRx PVT weisen auf eine relativ hohe Präzision bei verhältnismässig geringerer Genauigkeit hin. Bei den Sensoren RQT und M200 mit den Methoden RTKLIB PPK oder DGNSS ist das Ergebnis präzise und verhältnismässig genau. Je nach Anwendung sind unterschiedliche Sensoren und Methoden mit unterschiedlichen Eigenschaften erwünscht. Im Bereich der Bahnsicherungstechnik werden die Eigenschaften und Methoden, die in einem GNSS Empfänger zur Anwendung kommen, exakt zu definieren sein<sup>33</sup>.

Die dargestellten Ergebnisse sind vor dem Hintergrund der zu überprüfenden Methodik zur Ermittlung der «gerechneten ground truth» aus Kapitel 8.4, die hier als Referenz genutzt wird, als vorläufig zu betrachten und mit gebotener Vorsicht zu verwenden.

In einer weiterführenden Auswertung wird die Berechnung der GNSS Sensor/Methoden Fehler quer zum Gleis unter Nutzung des Zuglaufes und der GTG Stränge durchgeführt und die in diesem Kapitel postulierten Genauigkeiten quer zum Gleis anhand dieser Gleiskarte überprüft.

## 9.6 GNSS «Lücken» entlang der Gleise

Als GNSS «Lücken» werden Bereiche entlang der Gleise bezeichnet, an bzw. in denen GNSS zu einem bestimmten Zeitpunkt mit nicht ausreichender Qualität gemessen und somit als «nicht verfügbar» beobachtet wurde.

<sup>32</sup> Dabei kommt das oben beschriebene Verfahren bei stochastischen Faltungen zur Anwendung d.h. es wurde der Fehler der Referenz berücksichtigt und statistisch herausgerechnet.

<sup>33</sup> STARS Satellite Technology for Advanced Railway Signalling, Final Book, 30/11/2018

Im Kapitel 9.3 wurde anhand der GNSS „Himmelsicht“ auf Lücken beim GNSS Empfang geschlossen. Im Folgenden werden anhand der Daten des Funkmesswagen und mittels der im Kapitel 8.4 entwickelten Methodik Bereiche mit nicht ausreichender Qualität der GNSS Lokalisierung eruiert. Es wird deren Lage entlang des Gleises und deren Länge ermittelt. In einem operativen System wären diese mit relativer Lokalisierung zu überbrücken. Insbesondere die Kenntnis der Länge ist in Kombination mit der im Kapitel 9.4 aufgezeigten Leistungsfähigkeit relativer Lokalisierung durch Trägheitsnavigation von Relevanz.

Lücken können durch folgende Umstände bedingt sein:

- Tunnel, in denen typischerweise keine GNSS Signale empfangen werden.
- Gebiete mit topographisch oder bebauungsbedingten Abschattungen, die keinen oder nicht ausreichenden Empfang von GNSS Signalen erlauben.
- Satellitenkonstellationen, die zeitabhängig ungünstig sind und so die Qualität stark negativ beeinträchtigen.
- örtliche Störungen, die GNSS Signale abschwächen oder verändern, sodass keine ausreichende Qualität der Lokalisierung erzielt werden kann. Unter diese Störungen fallen gewollt/ungewolltes «jamming» und «spoofing».
- Fehler im GNSS Empfänger, die sowohl von Seiten der Hard- oder auch Software verursacht sein können.
- Fehlende Integrität der Sensorik und somit GNSS.

In Abwesenheit einer exakten, absoluten Referenz längs und quer zum Gleis wird bei der Ermittlung der Länge und örtlichen Lage der GNSS Lücken die Methodik der GNSS Präzision genutzt (siehe dazu Kapitel 8.4).

Wie oben ausgeführt ist GNSS in Abhängigkeit von Sensor und Methode zeitlich und örtlich unterschiedlich verfügbar. Im Vergleich zur örtlich finiten (Euro-)Balisen Technologie ist die Verfügbarkeit von GNSS örtlich und zeitlich deutlich höher. Das lässt sie als absolute Ortsreferenz attraktiv erscheinen. Allerdings schränkt die Umgebung (Topographie, Bebauung und auch Wetter) einen Empfang von GNSS Signalen oft ein. So schwankt die örtliche und zeitliche Verfügbarkeit von GNSS insbesondere bei bodengebundenen Anwendungen stark. Wenngleich die Messungen des Funkmesswagen das gesamte Netz über den Zeitraum von einem Jahr abgedeckt haben, können die folgenden Ergebnisse nur einen ersten Anhaltspunkt zur tatsächlichen GNSS Empfangssituation und Verfügbarkeit bei definierter Präzision geben.

Das Vorhandensein einer GNSS Lücke ist analog zu den Abständen zwischen Balisen per se kein Problem, sofern die Lücken durch andere Technologien oder deren Kombination innerhalb einer geforderten Genauigkeit - definiert durch betriebliche Vorgaben - überbrückt werden können.

Die folgende Tabelle 9-2 zeigt eine Übersicht der Länge der GNSS Lücken ermittelt pro Sensor und Methode. Dabei wurden die Lücken in

- kurze Lücken d.h. die Länge ist  $\leq 1$  km und 120 Sekunden Durchfahrtdauer, und
- lange Lücken d.h. die Länge ist  $> 1$  km oder 120 Sekunden Durchfahrtdauer unterteilt.

Bei den Lücken wurden Abschnitte mit Tunnels und einer Durchfahrtdauer  $> 10$  Sekunden herausgefiltert. Etwaige Unterbrüche im Fahrweg sind enthalten und werden als Lücken identifiziert. Das erklärt sich aufgrund der Methodik, mit der die Präzision ermittelt wird.

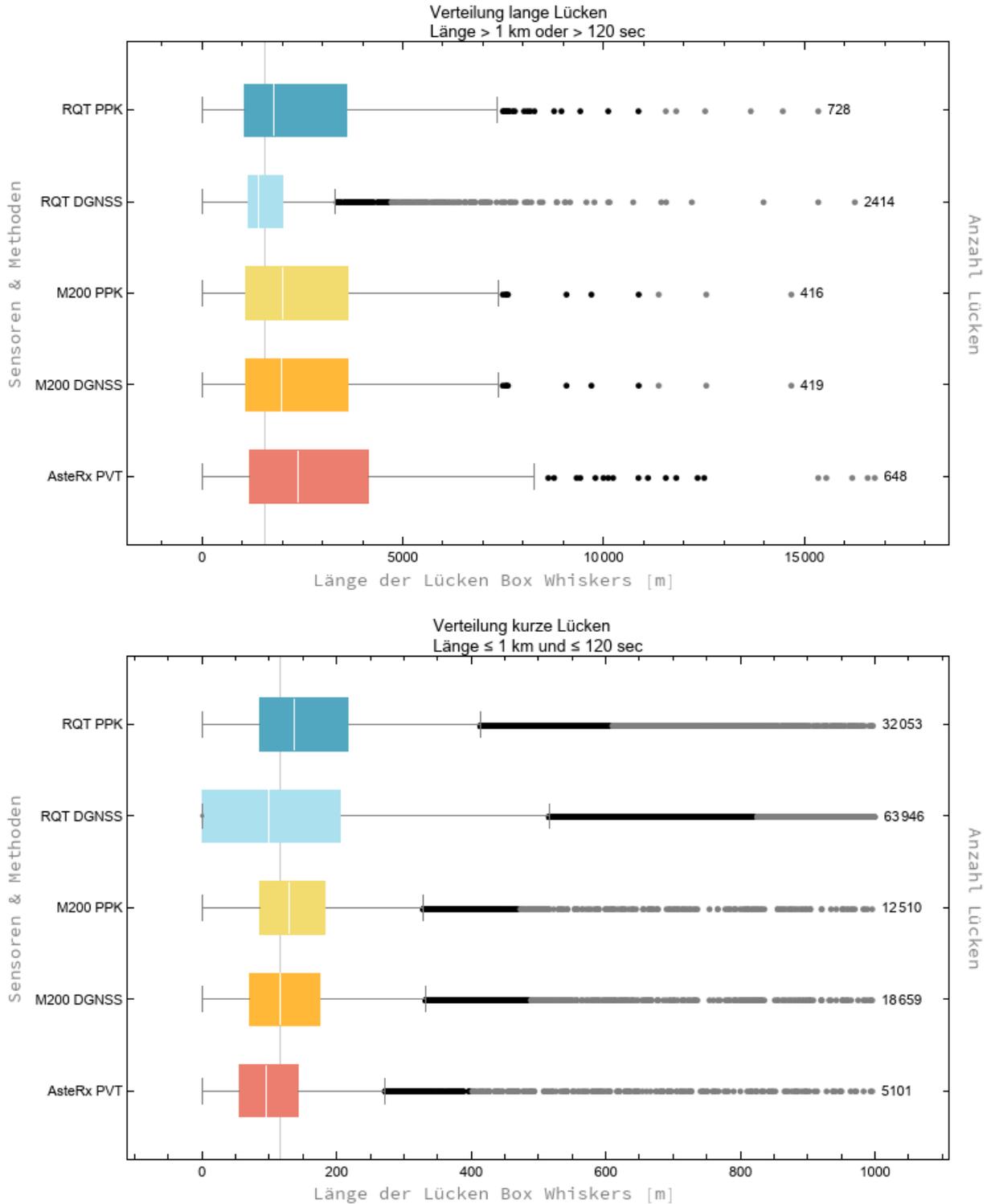
Lücken: Abschnitte mit einer Präzision bei der Lokalisierung > 1 m. Abschnitte mit einem Tunnel und einer Durchfahrtdauer länger als 10 sec sind nicht enthalten.				
Sensoren & Methoden	Anzahl Lücken i.e. Präzision > 1 m	Anzahl lange Lücken Länge > 1 km oder > 120 sec	Anzahl kurze Lücken Länge ≤ 1 km und ≤ 120 sec	Verhältnis kurze Lücken zu Anzahl Lücken
RQT PPK	32 781	728	32 053	0.977792
RQT DGNS	66 360	2414	63 946	0.963623
M200 PPK	12 927	417	12 510	0.967742
M200 DGNS	19 079	420	18 659	0.977986
AsterX PVT	5 750	649	5 101	0.88713

**Tabelle 9-2: Übersicht über Längen der GNSS Lücken ermittelt pro Sensor und Methode**

Die Einteilung ist in Zusammenhang mit der Genauigkeit einer Trägheitsnavigation (IMU+ODO ohne GNSS) in Abhängigkeit von zurückgelegter Länge und Zeitdauer (siehe Kapitel 9.4) getroffen.

Bezüglich der Resultate in obiger Tabelle gilt zu beachten, dass die Anzahl Lücken aus verschiedenen Gründen variieren, angefangen mit der unterschiedlichen Anzahl Messpunkte / Positionen pro Sensor insgesamt sowie der Anzahl präziser Messpunkte (siehe auch Tabelle 9-1). Das Verhältnis zwischen kurzen Lücken zur gesamten Anzahl Lücken ist bei den meisten Sensorkombinationen ähnlich, ohne dass dies als ein Mass für die Qualität der Sensoren betrachtet werden soll. Lange Lücken können durch tatsächliche Probleme bei GNSS bedingt sein oder durch einen Unterbruch im Fahrweg bzw. der Daten.

Die folgende Abbildung 9-18 zeigt die Verteilung der Länge der Lücken jeweils für die langen Lücken (oben) und kurze Lücken (unten) als Box Whisker Diagramm.



**Abbildung 9-18: Box Whisker Darstellung der Länge der Lücken**

Lange Lücken liegen im Bereich von 0 m über 4 km (75%) bis etwa 8 km (95%). Darüber hinaus existieren Ausreißer für die jeweiligen Sensoren und Methoden. Der Median langer Lücken über alle Sensoren und Methoden liegt bei ca. 1,8 km.

Kürze Lücken liegen im Bereich von 0 m über ca. 200m (75%) bis etwa 500m (95%). Darüber liegen Ausreisser bis zur definierten Grenze von 1 km. Der Median kurzer Lücken über alle Sensoren und Methoden liegt bei 120 m.

Zur Illustration des komplexen Sachverhaltes «Lücken» werden exemplarisch Teile der Fahrt des Funkmesswagen am 07.08.2018 dargestellt. Es handelt sich dabei um den GNSS Sensor M200 und die Methode DGNSS.

In diesem Beispiel ist zu sehen, dass

- Lücken am selben Tag zu unterschiedlichen Zeiten und Fahrtrichtungen potentiell an ähnlichen Orten auftreten können. In der Abbildung 9-20 ist das nördlich und südlich der Ortschaft Cadenazzo ersichtlich; in der Abbildung 9-21 bei der Durchfahrt von Staufen in unterschiedlicher Fahrtrichtung.
- die Lücken in gleichen Streckenabschnitten können in Länge und Lage sehr unterschiedlich sein. In der Abbildung 9-20 westlich Cadenazzo tritt eine lange Lücke am selben, einspurigen Gleisabschnitt nur in einer Fahrtrichtung auf.

Die lange Lücke östlich Cadenazzo und südwestlich Bellinzona (rot in Abbildung 9-19: Messfahrt vom 07.08.2018, Detail Bellinzona) ist auf das Fehlen von Gleiseigenschaften für die betreffenden Abschnitte zurückzuführen und nicht durch GNSS bedingt. Im Zuge weiterer Auswertungen wird danach getrachtet, diese systematischen Messfehler zu eliminieren.

Messungen am 2018-08-07  
Ohne Bereiche mit Tunnels > 10 sec Durchfahrtdauer  
Sensor M200, Methode DGNSS

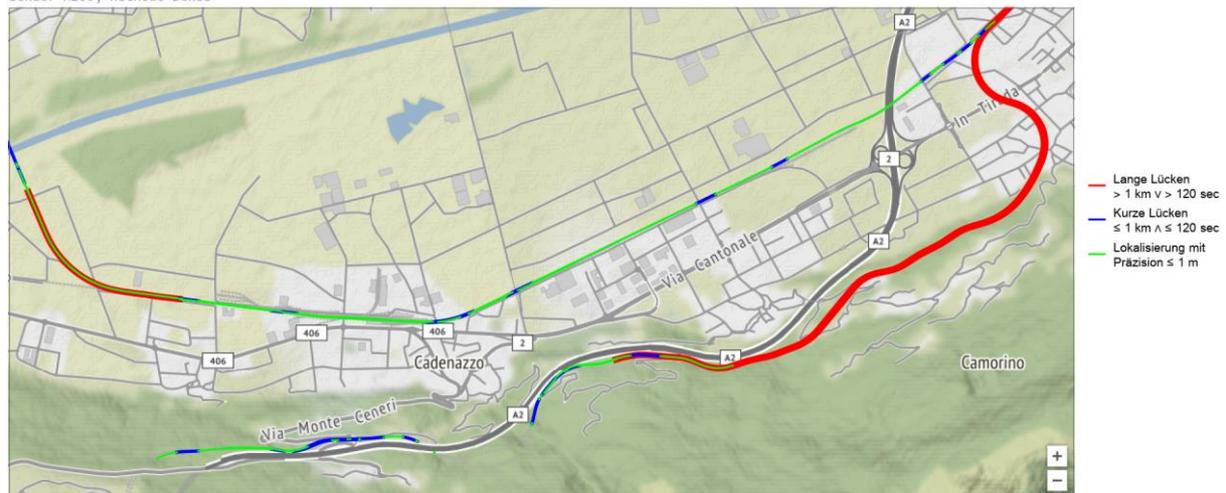


Abbildung 9-19: Messfahrt vom 07.08.2018, Detail Bellinzona

Messungen am 2018-08-07  
 Ohne Bereiche mit Tunnels > 10 sec Durchfahrtdauer  
 Sensor M200, Methode DGSS



**Abbildung 9-20: Messfahrt vom 07.08.2018, Detail bei Staufen**

Aus den vorliegenden Daten des Funkmesswagen und den Auswertungen zur GNSS Qualität anhand von GNSS «Lücken» lassen sich mit dem Vorbehalt der noch zu überprüfenden Methodik aus Kapitel 8.4 die folgenden, vorläufigen Erkenntnisse ableiten:

- Bei weitem überwiegen kurze Lücken entlang der Gleise mit einer Länge  $\leq 1$  km und 120 Sekunden Durchfahrtdauer. Deren Anteil liegt je nach GNSS Sensor und Methode deutlich über 95%.
- Meist sind diese kurzen Lücken nicht länger als 200 Meter. Mit relativer Lokalisierung sollten diese sicher überbrückt werden können.
- In Bereichen mit GNSS Empfang d.h. ausserhalb von Tunnel oder Unterführungen gibt es eine relativ kleine Anzahl an Lücken mit einer Länge  $> 1$  km und 120 Sekunden Durchfahrtdauer. Diese stellen für eine absolute Lokalisierung mit GNSS potentiell ein Sicherheitsproblem dar, weil der Fehler bei einer Überbrückung mit relativer Lokalisierung je nach betrieblicher Anforderung und «Use Case» zu gross werden könnte.

Inwieweit diese längeren GNSS Lücken nur an bestimmten Orten oder zu bestimmten Zeiten auftreten oder auf systematische Fehler bei den Sensoren oder Auswertungen zurückzuführen sind, muss in weiteren Messungen und Auswertungen genauer untersucht werden.

Zusätzlich gilt es, in weiteren Messungen das Auftreten von kurzen Lücken in Lage entlang des Gleises und Länge statistisch genauer auszuwerten.

## 10 Weitere Lokalisierungsanwendung und Technologien

Neben den Messreihen aus dem mewa12, die sich auf die Technologie GNSS, IMU und Odometrie konzentrieren, wurden parallel Messungen mit folgenden Funktionsmustern und möglichen unterstützenden Technologien durchgeführt.

Funktionsmuster basierend auf GNSS, IMU und ggf. Odometrie

- mobiles, steckbares Zugende-Tag 1 (ZET1)
- fest integriertes Zugende-Tag 2 (ZET2)

Unterstützende Technologien

- Visuelle Odometrie, Video Lokalisierung
- Fibre Optic Sensing (FOS)

Die Beschreibung der Funktionsmuster, sowie erste Erfahrungen zur visuellen Odometrie und zu Video Lokalisierung sind in den nächsten Kapiteln zusammengefasst. Ein ausführlicher Technologiebericht zu den Messresultaten FOS und Video wird in der ersten Jahreshälfte 2020 erstellt.

### 10.1 Zugende-Tag 1

Im Rahmen des PoC GLAT wurde ein mobiles, steckbares Funktionsmuster einer Lokalisierungslösung gebaut (genannt ZET1), basierend auf der Grundfunktion GNSS und IMU. Für die Montage am Wagen wurde die international standardisierte Lasche des heutigen Zugschlusssignals verwendet und eine entsprechende Vorrichtung gebaut.

Es wurden mehrere Funktionsmuster vom ZET1 bereitgestellt. Die Idee war, mit BLS-Cargo-Zügen Messfahrten durchzuführen. Aufgrund von BLS Rückmeldungen wurde der Schraubmechanismus noch einmal verbessert.



**Abbildung 10-1: ZET1 mit Modifikation der Exzentrissicherung durch eine zusätzliche Rändelschraube**

Die ersten Erkenntnisse mit dem ZET1 (GNSS only) sind im Zwischenbericht [1] beschrieben. Im Oktober 2019 konnten dank SBB Cargo weitere Messungen durchgeführt werden. Die Resultate (zurzeit GNSS only) sind in Auswertung. Aussagen über einen möglichen Einsatz von ZET1 sind nach weiteren Messungen zu erwarten, die in der nächsten Phase geplant sind.

## 10.2 Zugende-Tag 2

Im Rahmen des PoC GLAT wurden, wie im Zwischenbericht [1] erwähnt, zwei «fest integrierte Zugende-Tags ZET2» gebaut. Diese dienen als Funktionsmuster einer Lokalisierungslösung an der Radachse basierend auf der Grundfunktion GNSS, IMU und Odometrie.

Der Montageort ist aussergewöhnlich, da diese Funktionsmuster direkt auf der ungefederten Radachse montiert wurden. Man verspricht sich den Vorteil, dass die fahrdynamischen Eigenschaften eines Eisenbahnwagens nicht herausgerechnet werden müssen und somit eine potentielle Fehlerquelle vermieden wird. Die Herausforderung jedoch ist die Belastung für die Elektronik, wie auch die noch nicht untersuchten Empfangscharakteristiken von GNSS auf der Radachse.

Zuerst wurde für die Anwendung im Bereich des Güterverkehrs ein ZET2 Version1 mit Stromgenerator und integrierter Odometrie entwickelt, siehe folgende Abbildung.



**Abbildung 10-2: SBB Cargo Flachwagen Versuchsaufbau ZET2 Version1**

Mit einem ersten Versuchsaufbau auf einem Flachwagen von SBB Cargo wurde die GNSS Antenne in die Radachse eingebaut und die IMU auf dem Messwagen (Flachwagen) in einer Sensorbox montiert. Der Flachwagen wurde für mehrerer Rangierbewegungen mitgeführt bei max. 30 km/h und dabei Messdaten aufgenommen. Die Resultate wurden in einem Post Processing ausgewertet.

Erste Messergebnisse des GNSS Empfangs und der Sensorfusion GNSS, IMU und Odometrie sind in den nachfolgenden zwei Abbildungen dargestellt. In der Abbildung 10-4 sind die Störungen der reinen GNSS-Signale auf der Radachse deutlich zu erkennen (insbesondere Reflexionen und Abschattung durch andere Güterwagen auf dem Rangierfeld).

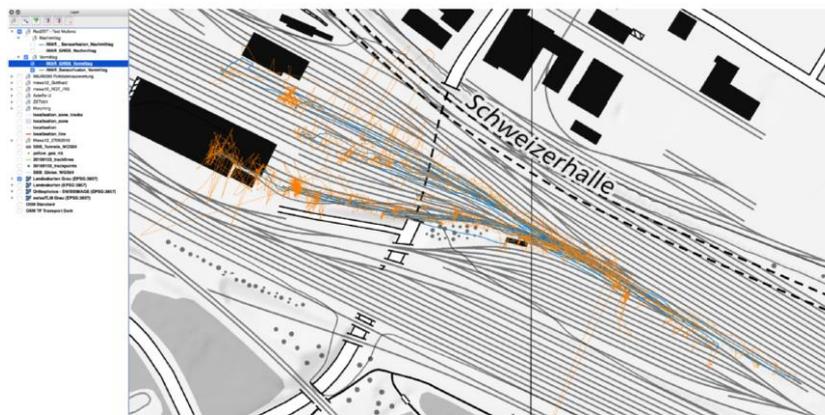


Abbildung 10: GNSS (orange) und INAT (Fusion GNSS/IMU/ODO, blau) Trajektorien am Vormittag

### Abbildung 10-3: GNSS Empfangsdaten im Rangierfeld Güterbahnhof Muttenz

Aufgrund der hohen Gewichtung der GNSS Signale in der fusionierten Lösung, Abbildung 10-4, sind die Sprünge über mehrere Gleise auch hier ersichtlich. Ein Hinweis darauf, dass falls eine Antenne auf der Radachse platziert wird auch die Fusionsparameter entsprechend angepasst werden oder im Vorfeld alle ungültigen GNSS Signale erkannt und herausgefiltert werden müssen.

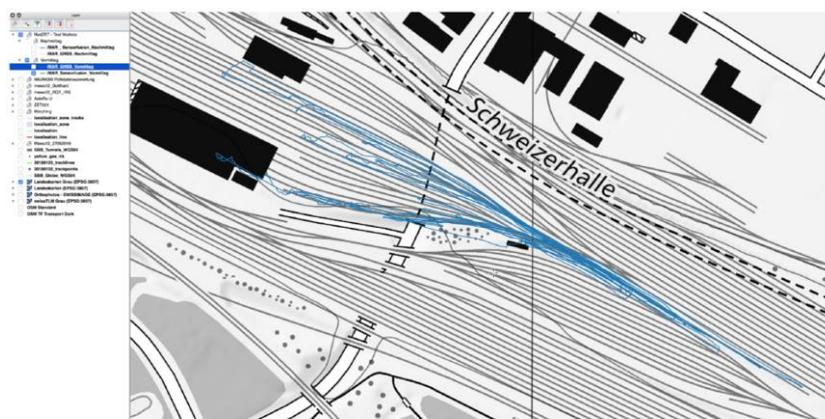


Abbildung 11: INAT (Fusion GNSS/IMU/ODO, blau) - Vormittag

### Abbildung 10-4: GNSS, IMU und Odometrie fusionierte Datenauswertung im Rangierfeld Güterbahnhof Muttenz

Basierend auf diesem ersten Funktionsmuster wurde eine Version2 des ZET2 zusammen mit der Firma iMAR Navigation GmbH erarbeitet, mit dem Ziel kontinuierliche Messungen im laufenden Bahnbetrieb durchführen zu können. Hier wurde auf den Stromgenerator und die Odometrie verzichtet, da diese vom Funkmesswagen mewa12 genommen werden konnte. Somit konnte auch das Volumen des Aufbaus deutlich verringert werden, damit das Lichtraumprofil des Eisenbahnwagens eingehalten wurde.

Mit der eingebauten Sensorik in der Version2 des ZET2 sollen folgende Fragen auf Basis des Post-Processing der Daten beantwortet werden:

1. Wie gut ist die Empfangs-Charakteristik von GNSS, insbesondere der Systeme GPS und Galileo, wenn die GNSS Antenne an der Radachse montiert ist?
2. Wie genau kann die Geschwindigkeit basierend auf der Kombination GNSS, Trägheitsplattform (IMU) und Rad-Odometrie gemessen werden?
3. Vergleich der ZET2 Messungen an der Radachse mit der bereits im Funkmesswagen installierten OBU Lokalisierung (GNSS-Antenne auf dem Fahrzeugdach).
4. Hält das System bzw. die Elektronik den hohen Belastungen (Beschleunigungen, Vibrationen, Temperaturen) auf der Radachse im laufenden Betrieb des Funkmesswagen stand?

5. Können die Gleiseigenschaften durch den Montageort auf der ungefederten Radachse besser ausgewertet werden? (Fehler bedingt durch die Drehgestell-/Radaufhängungen (Feder-/Dämpfersystem) werden vermieden)



**Abbildung 10-5: ZET2 Version2 auf Funkmesswagen mewa12 installiert**

Die Abbildung 10-5 zeigt die Version2 des ZET2. Es wird anstatt des bisherigen Radlagerdeckels montiert. Vom bzw. zum Gerät werden die Signale für Daten, Odometrie und Stromversorgung vom Funkmesswagen über eine Kabelverbindung übertragen. Dadurch wird die Modifikation am SBB Funkmesswagen und der Aufwand für Zulassungen so gering wie möglich gehalten und bestehende Einrichtungen, z.B. Messrechner für Lokalisierungsdaten, können direkt genutzt werden.

## 10.3 Visuelle Odometrie, Video Lokalisierung

This chapter is a first summary of ongoing activities. A detailed technology report on the video results will be created and published in the first half of 2020.

### 10.3.1 System setup and Data collection

The system used for train navigation with visual odometry shall guarantee an accurate measurement of the train position under different conditions of weather and illumination.

The system implemented is composed as follows:

- An infrared camera (front camera) pointing to the railroad track. The camera has a fixed focal length of 8 mm and an aperture size according to the corresponding focal ratio (f-stop) of 6. The camera was set to a framerate of 60 Hz. Images were taken using 1024 grayscale levels (10 bits) with a resolution of 1280x1024 pixels. The selected setup ensures both a good angle of view and enough details of the railroad track.
- An infrared camera (tag camera) pointing to the electric poles situated on the left side of the railroad track. The camera has a fixed focal length of 50 mm and an aperture size according to the corresponding focal ratio (f-stop) of 8. The camera was set to a framerate of 60 Hz. Images were taken using 1024 grayscale levels (10 bits) with a resolution of 1280x1024 pixels. The selected setup ensures a limited angle of view but detailed images to recognize the April-Tags (see chapter 10.3.3).
- Rapid Prototyping Machine with OpenCV libraries installed to collect the raw data from the cameras. It ensures a Real Time analysis of the images in order to tune several camera parameters based on the environmental conditions.
- GPS Receiver to get the time information to be saved together with the acquired frame.

On June 14th, 2019 a train driving four times from Ostermundigen to Thun was equipped with the setup described above. For the measurement, two identical systems were prepared: one system was placed in the locomotive and one in the control wagon (see Figure 10-6). Data were successfully collected.



Figure 10-6: The data acquisition system located in the control wagon.

A standstill detection algorithm based on the gradient difference between consecutive frames was applied in order to reduce the amount of data by a real-time filter of the events where the train did not move.

An automatic gain control of the camera was applied in order to increase the camera gain for frames where the track had poor illumination.

### 10.3.2 Local navigation

#### Data analysis and current results

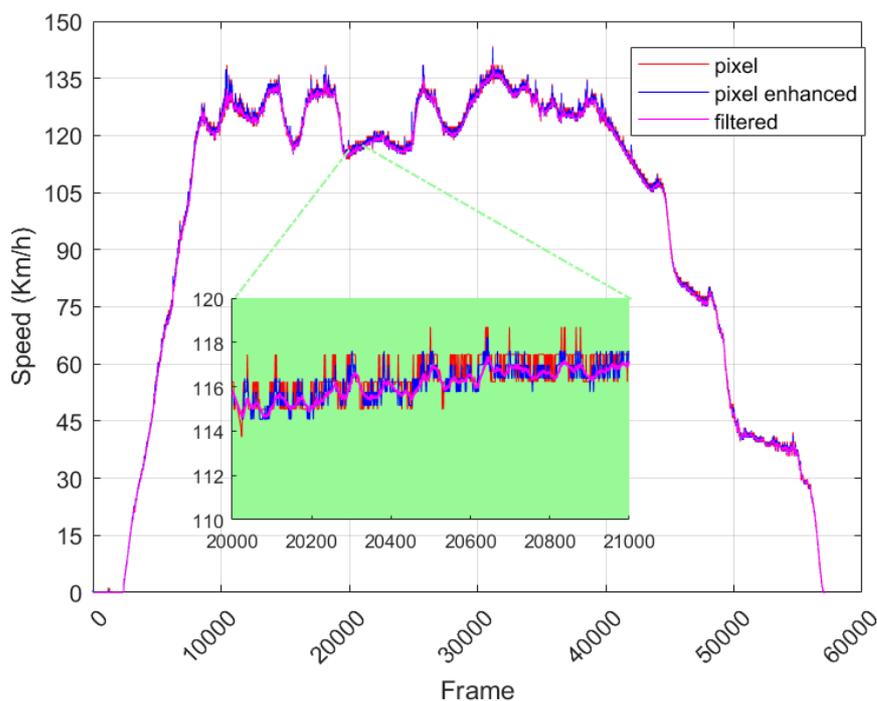
The camera was mounted on the windscreen of the train. The camera's extrinsic parameters (pitch, roll, yaw initial angles with respect to the track) were estimated since they affect the calculated dynamic position of the train. The method proposed is based on the calculation of the vanishing point of the railroad track in the camera image. Once the vanishing point is calculated, the pitch and yaw angle can be estimated.

The roll angle is estimated by selecting a region in front of the train centered on the railroad track. The region is rotated by applying the calculated pitch and yaw angle. A top-view image

shall result. By varying the roll angle, the one leading to the maximum pixel distance between the track line is selected.

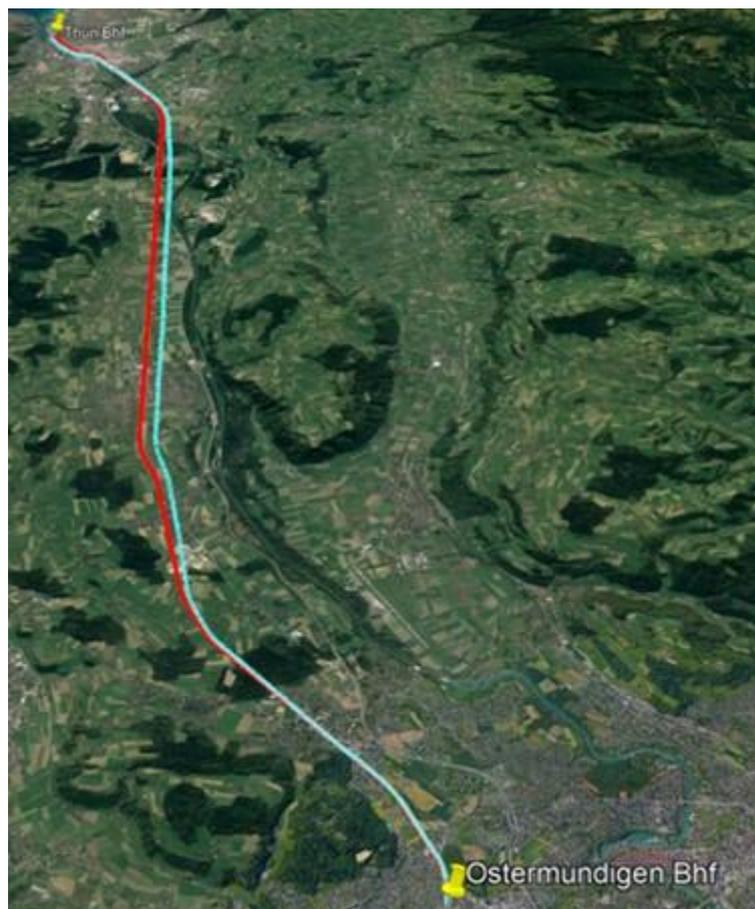
By detecting and tracking features in consecutive frames (optical-flow), the position of the train up to an absolute scale is determined with the use of the essential matrix.

The absolute scale of the train is estimated by a template matching method of the selected “top-view” rectified image between consecutive frames. The displacement in pixels is corrected by taking into account the gradient differences, so that a sub-pixel accuracy in the determination of the absolute scale is reached. The calculated sub-pixel displacement is converted to the track distances based on the width of the track in the real world. Figure 10-7 shows the absolute velocity derived from the calculation of the absolute scale. The comparison between pixel and subpixel precision has been shown.



**Figure 10-7: Velocity plot derived from the absolute scale estimation using the template matching technique. The steps due to the pixel quantization show the necessity for sub-pixel processing (blue) compared to pixel-accurate method (red).**

Figure 10-8 shows the reference path from Ostermündingen train station to Thun train station from Google Earth (in red). The calculated position using the optical flow with essential matrix together with the absolute scale estimation is displayed in blue. A drift in the calculated position can be seen.



**Figure 10-8:** The train reference path (from Google Earth) from Ostermundigen to Thun is shown in red. The calculated path using the optical flow with essential matrix and absolute scale estimation is shown in blue.

### Next Steps

In order to increase the reliability of the evaluation of the extrinsic camera parameters (camera pose), a refined line detection algorithm for the track detection has to be implemented. The use of such algorithm to the recognition of the railroad switches and the platform beginning/ending has to be verified.

The covariance matrix of the measured position shall be calculated in order to integrate the navigation results within a Kalman filter. The estimation of the covariance matrix of the calculated position is required. The drift in the measured position can be reduced by the additional information of the global position of the detected April-Tags (see 10.3.3).

The camera settings and navigation results under different conditions shall be tested. Measurements with challenging weather condition (snow, rain, fog) and poor illumination (long tunnels) shall be taken and analyzed.

The analysis was performed on data collected from the system placed in the locomotive. The analysis shall be extended to the data collected from the control wagon, although the preliminary analysis of those data shows no substantial difference with data collected in the locomotive.

### 10.3.3 April-Tag detection

#### System setup and Data collection

For the measurement, ten April-Tags (<https://april.eecs.umich.edu/software/apriltag>) were mounted at 3 meters height on the electric poles situated on the left side of the track (with

respect to the driving direction). The size of the April tags is 18cm x 18cm. With the camera setup, this leads to a tag of about 100x100 pixels in the image plane.

#### Data analysis and current results

A dedicated software (<https://github.com/AprilRobotics/apriltag>) from the University from Michigan was used to detect the tags and recover the pose.

A scheme of the tag detection environment with a passing train is shown in Figure 10-9. In the example, the pose was calculated in 9 consecutive frames.

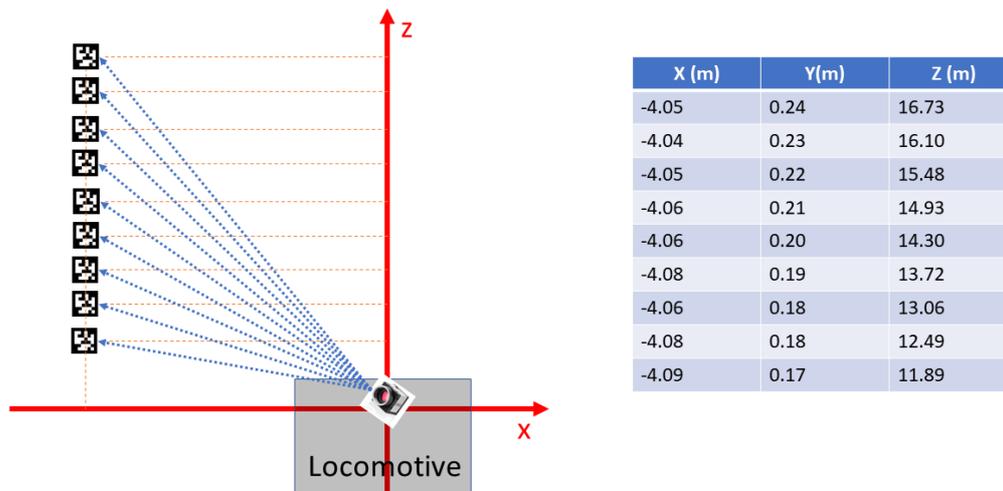


Figure 10-9: the pose calculation results for a given April tag when passing by with the measurement train are shown. The table shows the values for 9 consecutive image frames while the train covers a distance of approx. 5 m.

Background subtraction was applied in images where originally the tag was not found. A detection efficiency of 100 % was reached using data collected in the locomotive.

#### Next Steps

Based on the calculated train velocity, the time the train passed the April Tag shall be calculated. This is needed to synchronize the local odometry-based navigation system with the tag absolute position in order to reduce the drift in the calculated train position.

The camera settings, tag detection efficiency and the estimated pose results under different conditions shall be tested. Measurements with challenging weather condition (snow, rain, fog) and poor illumination shall be taken and analyzed.

The analysis was performed on data collected from the system placed in the locomotive. The analysis shall be extended to the data collected from the control wagon, although the preliminary analysis of those data shows no substantial difference with data collected in the locomotive.

All algorithms used are deterministic in order to satisfy the requirements of the CENELEC standard EN 50128 for the related SIL levels. This is required for achieving approval by the authorities.

## 11 Referenzen

- [1] Zwischenbericht Technologie PoC Lokalisierung  
<https://smartrail40.ch/index.asp?inc=downloads.asp&typ=Nav2&cat=53>
- [2] Smartrail Polarion Glossar  
<https://trace.sbb.ch/polarion/#?shortcut=Glossar%20Deutsch>

## 12 Glossar

Link zum Glossar Polarion [2]: <https://trace.sbb.ch/polarion/#?shortcut=Glossar%20Deutsch>

AART	«Allgemein anerkannte Regeln der Technik»
ALARP	«As low as reasonably possible»
APS	Das «Advanced Protection System» ist ein ETCS FSS basiertes Stellwerk, welches das RBC umfasst. Über seine dynamische, regelbasierte und geometrische Sicherheitslogik steuert das APS alle Bewegungen von Objekten und Veränderungen an den Aussenanlagen innerhalb des Wirkungsbereichs. Sämtliche betrieblichen Steuerungsaufgaben sind in die übergeordneten Systeme verschoben.
APS-FOT	RCA Begriff: Der «APS Fixed Object Transactor» kommuniziert mit den relevanten OC. Er übersetzt die abstrakten Befehle des OA in anlagespezifische Befehle. In der anderen Richtung übersetzt er anlagespezifische Zustände des OC in einen abstrakten Zustand für OA.
APS-MOT	(RCA) APS «Mobile Object Transactor» Funktion. Verwaltet die unterschiedlichen Arten von GLAT Funktionen (VL, MOL) und prozessiert/fusioniert die erhaltenen Lokalisierungsinformationen, so dass diese zeitsynchronisiert an die Komponente APS Object Aggregation (OA) weitergeleitet werden, wo diese mit den Lokalisierungsinformationen der Trackside Assets (z.B. Achszähler, Weichen, etc.) und den Bewegungserlaubnissen (Movement Permission) aggregiert werden. Lokalisierungsinformationen, die eine sichere und genaue Lokalisierung unterstützen, werden vom MOT an den VL übermittelt, z.B. Topologie Daten.
APS-MT	Der «APS Movement Authority Transactor» kommuniziert mit den registrierten ETCS-fähigen Fahrzeugen. Unter anderem übersetzt MT die Bewegungsberechtigungen (Movement Permissions, MP) in ETCS-Bewegungserlaubnisse (Movement Authorities, MA) und schickt diese an das Fahrzeug. Es wird nur funkbasiertes ETCS unterstützt. In der anderen Richtung empfängt er die Zugpositionsberichte (Train Position Reports, TPR) vom Fahrzeug und leitet sie an APS-OA weiter.
APS-OA	Die «APS Object Aggregation» ist eine Komponente aus der Reference CSS Architecture, die die verfügbaren Informationen über den physikalischen Betriebszustand innerhalb des APS-Gebiets aggregiert und auf das Gleisnetz abbildet, um das APS Betriebsabbild aktuell zu halten. Sie ist auch für die Verteilung der Anforderungen aus der APS Safety Logic verantwortlich.
APS-SL	Die «APS Safety Logic» ist ein Block aus der «RCA», welcher die Sicherheit von geplanten Operationen innerhalb des APS-Gebiet auf Anfrage überprüft und deren Ausführung auslöst, wenn die Operation als sicher eingestuft wird.
APS-SM	Der «APS Safety Manger» ist ein Block aus der Reference CSS Architecture, welche die Sicherheit (Safety) innerhalb APS-Gebiet kontinuierlich überwacht und bei Bedarf Sicherheitsreaktionen auslöst.
ART	«Anerkannte Regeln der Technik»
ATO	Der automatische Zugbetrieb «Automatic Train Operation» besteht aus 5 Automatisierungsstufen (GoA 0 - GoA 4).

AWAP	«Automatisierte Warnprozesse» Die Arbeitsstellenwarnung bei Arbeiten im Gleisbereich wird technisch gelöst, insbesondere mit stark reduziertem Einsatz von Vorwarnern.
BE	«Bewegungserlaubnis»
Bias	Bei Messungen auftretender, meist störender systematischer Effekt mit einer Grundtendenz
BOB	«Bewegliches Objekt»
CCS	«Command and Control Systems» beinhaltet alle Ausrüstungen, die erforderlich sind, um die Sicherheit zu gewährleisten und die Bewegungen der Züge zu steuern und zu kontrollieren, die zum Fahren auf dem Netz berechtigt sind.
CENELEC	Das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung, «Comité Européen de Normalisation Électrotechnique» (CENELEC), ist eine der drei grossen Normungsorganisationen in Europa.
CIF	«Confidence Interval Function»
CLUG	«Certifiable Localisation Unit with GNSS in the railway environment»
COAT	«CCS Onboard Application Platform for trackside related functions» soll eine modulare und standardisierte CCS-Onboard-Architektur sein, die in SR40 entwickelt wird. Es ermöglicht beispielsweise die Implementierung eines EVC oder ATO als reine Softwarelösung.
COTS	«Components-off-the-shelf» Ist ein Endgerät ab Stange ("kommerzielle Produkte aus dem Regal")
DCM	Das «Geräte- und Konfigurations-Mgt» für smartrail 4.0 Komponenten, mit Ausnahme der TMS PAS Systeme. Der Leistungsumfang von DCM ist primär die Verwaltung von Geräteinformationen/Status und die Bereitstellung (Staging, nicht Aktivierung) von Konfigurationsdateien.
DfA	«Datenbank fester Anlagen» (Dfa) ist eine Applikation zur Verwaltung der festen Anlagen mittels eines geografischen Informationssystems (GIS). Die Informationen umfassen Geleise- und Strecken, alle umliegenden festen Anlagen (Fahrbahn, Sicherungsanlagen, Ingenieurbauten, Gebäude, Fahrleitungen, Elektroversorgung, Bahnzugang, Kabelschutz etc.).
DGNSS	«Differential GNSS» (DGNSS) ist eine Art GNSS-Erweiterungssystem, das auf einer Verbesserung der primären GNSS-Konstellationsinformationen durch die Verwendung eines Netzes von bodengestützten Referenzstationen basiert, die die Übertragung von Differentialinformationen an den Benutzer ermöglichen - auch Rover genannt - um die Genauigkeit seiner Position zu verbessern - die Integrität ist nicht gewährleistet. Es gibt verschiedene DGNSS-Techniken, wie die klassische DGNSS (oder DGPS), die Echtzeitkinematik (RTK) und die Weitbereichs-RTK (WARTK).
DM	«Diagnose und Monitoring» Expertensystem für smartrail 4.0 Komponenten. Beinhaltet Funktionen wie Event- (EMS), Log-, Performance-, Availability-, Service-Management, Analyse/Diagnose, Reporting.
DTO	«Driverless Train Operation» (ATO GoA 3). Der Führerstand ist unbesetzt, aber ein Mitarbeiter im Zug kann im Störfall den Führerstand bedienen.

DÜ	«Datenübertragung»
EDP	Die «Engineering & Data Preparation» stellt Projektierungsdaten für das APS, den OC und GLAT bereit. Zusätzlich wird durch EDP der Projektierungsprozess stark automatisiert.
EI	«ETCS Interlocking» - ETCS Stellwerk
ELSS	«Eisenbahnleit- und -sicherungssystem»
ERMETS	Das «European Railway Train Management System» ist ein Europäische Eisenbahnverkehrsleitsystem der Normen für das Management und die Zusammenarbeit von Signalanlagen für Eisenbahnen durch die Europäische Union (EU).
ES	«Elektronisches Stellwerk» (allgemein), im Spezifischen das neue elektronische Stellwerk für smartrail 4.0
ETCS	Das Europäische Zugsicherungssystem (ETCS) ist die Signal- und Steuerungskomponente des Europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems (ERTMS). Es ist ein Ersatz für alte Zugsicherungssysteme und soll die vielen inkompatiblen Sicherheitssysteme ersetzen, die derzeit von den europäischen Eisenbahnen eingesetzt werden. Die Norm wurde auch ausserhalb Europas übernommen und ist eine Option für den weltweiten Einsatz.
ETCS BTM	«Balise Transmission Modul»
ETCS L2	Das «European Train Control System» Level 2. Signale werden nun im Führerstand angezeigt (siehe Führerstandsignalisierung). Ist im Gegensatz zu Level 1 und Level 2 Limited Supervision zwingend auf GSM-R angewiesen.
ETCS L3	European Train Control System Level 3. Erlaubt den Moving Block Betrieb (keine festen Blockabschnitte, ermöglicht eine bessere Ausnutzung der Infrastruktur, erfordert aber neben der Lokalisierung der Zugspitze auch die Feststellung der Zugintegrität und die Bestimmung der sicheren Länge des Zuges.
ETCS Tafeln	Tafeln zeigen für ETCS relevante Informationen wie Blockgrenzen etc. an
EUG	«ERTMS Usergroup»
EULYNX	«European Initiative Linking Interlocking Subsystems» ist ein europäisches Initiativprojekt zur Reduzierung von Wartungs- und Instandhaltungskosten.
EVC	«European Vital Computer» Physikalische Plattform, die den EVC Kernel und andere Software beherbergt. In der Zukunft werden die fahrzeugseitigen RCA und OCORA Funktionen in Software auf der Nachfolgeplattform des EVC, der OCORA Plattform laufen.
Fahrweg	Eine sich aus der Lage der Gleise und Weichen in der Gleistopologie ergebende Fahrmöglichkeit eines Schienenfahrzeugs.
FMEA	«Failure Mode and Effects Analysis»
FMECA	«Failure modes, effects and criticality analysis» Fehlermöglichkeiten, Auswirkungen und Kritikalitätsanalyse
FOG	«Fiber Optic Gyro» Faser Optische Gyroskope

FOS	«Fiber-Optic Sensing»
FOT	«Federal Office of Transport»
FRMCS	«Future Railway Mobile Communication System» Ersatz Technologie von GSM-R
FSS	«Führerstands-Signalisierung»
GALILEO	GNSS-System mit Navigationsmodus (Europäisch, zivile Führung). GALILEO ist das einzige GNSS, welches unter ziviler Kontrolle im europäischen Rechtsrahmen betrieben wird.
GAMAB	«Globalement au moins aussi bon» (generell mindestens so gut)
Genauigkeit	In der Messtechnik und Qualitätssicherung ist Genauigkeit (eng. accuracy) ein Oberbegriff. Ein Messgerät ist genau, wenn es sowohl eine hohe Präzision (eng. precision) als auch eine hohe Richtigkeit (eng. trueness) besitzt.
GFB	«Gefährdungsblatt»
GFM	«Gleisfreimeldung»
GIS	Ein «Geografisches Informationssystem» (GIS) ist ein System zum Erfassen, Speichern, Bearbeiten, Analysieren, Verwalten und Präsentieren von räumlichen oder geografischen Daten.
GLAT	Ist die genau lokalisierbare allgemeinverwendbare Endgerätetechnik. Der Entwicklungsgegenstand GLAT dreht sich um eine "genau lokalisierbare sichere und allgemeinverwendbare Endgerätetechnik".
Gleistopografie	Digitale Abbildung der detailliert vermessenen Punkte und Stränge im Eisenbahnnetz.
GLONASS	GLONASS oder englisch «Global Navigation Satellite System»; deutsch „Globales Satellitennavigationssystem“) ist ein globales Navigationssatellitensystem, das vom Verteidigungsministerium der Russischen Föderation betrieben und finanziert wird.
GNSS	GNSS steht für «Global Navigation Satellite System» und ist der Oberbegriff für Satellitennavigationssysteme, die eine autonome georäumliche Positionierung mit globaler Abdeckung ermöglichen. Dieser Begriff umfasst z.B. das GPS, GLONASS, Galileo, Beidou und andere regionale Systeme.
GNSS «Lücken»	Orte oder Gleisabschnitte, an bzw. in denen GNSS zu einem bestimmten Zeitpunkt mit nicht ausreichender Qualität gemessen und somit als «nicht verfügbar» beobachtet wird.
GOA2	«Grade of Automation, Level 2»
GOB	«Gefahren- und Bewegungsobjekt» im Gleis. Alles, was sich auf einem Gleis (im Lichtraumprofil) bewegen oder dort liegen kann. Also Züge, Menschen, Baustellen, Hindernisse, einragende Autos, etc.
GPS	GNSS-System mit Navigationsmodus (amerikanisch, militärische Führung)

Ground Truth	Die "Ground Truth" bezeichnet in der Fernerkundung und Kartografie direkt durch Geländeerkundung am Boden aufgenommene Informationen (Bodenproben, Fotos, Vegetationsbestimmung etc.), die zur Analyse von Fernerkundungsdaten, wie z. B. Luftaufnahmen, Satellitenbildern oder anderen, genutzt werden.
GTG	«Gleistopografie»
IAM	Das «Identity- and Access Management» sorgt in Unternehmen für eine zentrale Verwaltung von Identitäten und Zugriffsrechten auf unterschiedliche Systeme und Applikationen. Authentifizierung und Autorisierung der User sind zentrale Funktionen des IAM.
ILM	«Integrated Localisation Module» Physikalisches Subsystem, das nur (in einem Wagen) festmontiert werden kann, zu einer Ortungsfunktion beiträgt. Könnte in einem TWD integriert werden. Besitzt gemeinsame Komponenten mit dem Gerät, das die VL Funktion in die OBU implementiert.
IMU	Die «Inertial Measurement Unit» ist eine Messeinheit, die über Sensoren zur Beschleunigungen über alle Achsen misst und somit Bewegungen und zurückgelegte Strecken feststellen kann.
INS	«Inertial Navigation System» Trägheitsnavigationssystem
LIDAR / LADAR	Lidar «light detection and ranging» auch Ladar «laser detection and ranging», ist eine dem Radar verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung sowie zur Fernmessung atmosphärischer Parameter. Statt der Radiowellen wie beim Radar werden Laserstrahlen verwendet.
LL	Lokalisierungseinheit (Komponente der GLAT Architektur)
LocLab	LocLab ist ein Daten- und Analyse-Labor für die Lokalisierung auf der SBB Big Data Plattform.
LRBG	Die «Last relevant balise group» LRBG wird in den ETCS Leveln 2 und 3 als gemeinsame Lokalisierungsreferenz zwischen ETCS Onboard und streckenseitiger Ausrüstung verwendet.
LV95	Landesvermessung (19)95
MA	"Movement Authority" / Fahrerlaubnis ist die Genehmigung für die Fahrt eines Zuges an einen bestimmten Ort unter Überwachung der Geschwindigkeit.
MEMS	Intertialsensorik: «Mikro-elektro-mechanisches System»
mewa12	SBB Funkmesswagen zur Gewährleistung funkbasierter Systeme. Der Messwagen wurde 2012 in Betrieb genommen und ist mit Messempfängern, Testgeräten für Mobilfunk, Messantennen und Computern ausgestattet. Im Wagen sind ausserdem Systeme zur Messung von Services (analoger Funk, GSM-R, Polycorn, GSM, UMTS und LTE) installiert.
MLM	«Mobile Localisation Module» Physikalisches Subsystem, das zu einer mobilen Ortungsfunktion beiträgt. Könnte je nach Ausprägung in TED und in anderen mobilen Geräten wie mobile Sperreinheiten integriert werden, aber auch in TWD.
MOB	«Moveable Object» bewegliches Objekt

MOL	(RCA) «Mobile Object Locator» Funktion für Objekte, die keine OBU besitzen. Wird genutzt um jegliche Typen von Objekten (auf oder auch neben dem Gleis) zu lokalisieren. Aktuell liegt der Fokus im SR40 auf der Lokalisierung des Zug-Endes bei Cargo-Zügen, um die Zugintegrität und damit auch die effektive virtuelle Gleisbelegung zu bestimmen. Die Detektion von Einzelwagen oder auch Naturgefahren wurde bisher nicht näher analysiert.
MOT	Mobile Object Locator
Moving-Block-Betrieb	Beim Moving-Block-Betrieb wird auf ortsfeste Blockabschnitte und Gleisfreimeldanlagen verzichtet. Die Züge ermitteln dann den Standort ihres Zugschlusses selber und senden ihn quasi-kontinuierlich an den folgenden Zug. Dieser berechnet unter Berücksichtigung seines Bremsweges den Punkt, ab dem die Geschwindigkeit herabgesetzt werden muss. Somit entfallen mit ETCS Level 3 (Moving Block) ortsfeste Start- und Endpunkte für das Einstellen von Fahrwegen (Signale / Merktafeln), diese bedeutet, dass Positionsmeldungen nicht mehr ortsdiskret, sondern zeitdiskret sind.
MP	«Movement Permission» ist ein bewilligter Fahrweg.
MTBF	«Mean time between failure»
MTC	«Manoeuvre Train Control» (MTC) ist ein System zur Zugbeeinflussung bzw. Führerstandsignalisierung von Fahrten mit niedrigen Geschwindigkeiten als Ergänzung zu ETCS in von «Full Supervision» nicht abgedeckten Anwendungsfällen. MTC wurde in Funktionsvarianten konzipiert, sodass die Überwachung von Fahrten in niedriger Geschwindigkeit bei bestehenden Technologien (z.B. ETCS L2 mit Gleisfreimeldemittel, ETCS Onboard-Ausrüstung) und die Integration von neuen Technologien (z.B. ETCS L3, genaue Lokalisierung, kostengünstige EVC light Variante) möglich ist.
MTT(E)F	«Mean time to (extended) failure»
MTTF	«Mean time to failure»
MTTHE	«Mean time to hazardous event»
MTTR	«Mean time to repair»
MWA	«Mobile Warnanlage» GLAT Gerät, dass zum Sperren von Topologiebereichen und zur Ausgabe von Warnungen (Lautsprecher, Blinklicht) dient.
BNT-Gleisnetz-Referenzmodell	Das BNT-Gleisnetz-Referenzmodell ist ein Knoten/Kanten-Modell, das die Befahrbarkeiten mitberücksichtigt. In seiner Ausprägung auf der Mikro-Granularitätsstufe ist es wie folgt definiert: Graphen-Modelle, die eine Gleis-Verzweigung / Weiche als einen einzelnen Knoten abbilden. Die Weiche hat (ohne Hinzunahme weiterer Konstrukte) im Modell somit keine Ausdehnung.
OBU	«Onboard Unit» Eine physikalische Instanz des ETCS On-board Subsystems. Besteht unter anderen aus EVC (European Vital Computer), DMI (Driver Machine Interface), TRU (Train Recording Unit Subsystem, bestehend seinerseits aus DRU (Diagnostics...) und JRU (Juridical...), BTM (Balise Transmission Module), RTM (Radio Transmission Module), STM (Specific Transmission Module).
OC	Der «Object Controller» verbindet das Advanced Protection System (APS) mit den Aussenanlagen (AA) durch Übersetzung der Befehle und Meldungen zwischen APS und AA (z.B. Weichenmotor).

OCORA	OCORA Gruppe: Analog zur RCA Initiative, welche von Seiten Infrastruktur gegründet wurde, ist mittels eines Memorandum of Understandings die Partnerschaft zwischen den Eisenbahnverkehrsunternehmen DB, NS, ÖBB, SNCF und SBB (Stand März 2109) mit dem Namen OCORA (Open CCS Onboard Reference Architecture) abgeschlossen worden
Odometrie (ODO)	Odometrie bezeichnet eine Methode der Schätzung von Position und Orientierung (Lageschätzung) eines mobilen Systems anhand der Daten seines Vortriebsystems. Durch Räder angetriebene Systeme benutzen dafür die Anzahl der Radumdrehungen, während laufende Systeme (z. B. Roboter) die Anzahl ihrer Schritte verwenden. Ein Gerät, das die Odometrie zur Lageschätzung verwendet, ist ein Odometer. Die Odometrie ist im Zusammenspiel mit der Koppelnavigation ein grundlegendes Navigationsverfahren für bodengebundene Fahrzeuge aller Art (Kraftfahrzeuge, Roboter), allerdings wird es auf Grund seiner Fehlereigenschaften selten als alleiniges Verfahren eingesetzt.
OE	«Objekterkennung»
OI	«Ortungsinformation»
OTI	«On-board Train Integrity» ist die Zugintegrität an Bord
OTOD	«Onboard Track Occupancy Detection»
POC	«Proof of Concept»
Post-Processing Plattform	Der Begriff Post-Processing bezeichnet die Nachbearbeitung und Aufbereitung von Ergebnissen einer Computersimulation, wie zum Beispiel einer numerischen Strömungssimulation. Man versucht, die dabei entstehenden grossen Datenmengen in eine verständliche Darstellungsform umzuwandeln, also z. B. in Grafiken und Animationen.
PPP	«Precise Point Positioning» (GNSS Modus zur Erhöhung der Lokalisierungspräzision)
Präzision	Präzision (veraltet auch Wiederholgenauigkeit) ist ein Kriterium zur Beurteilung der Qualität einer Messung oder eines Messverfahrens. Präzision und Richtigkeit sind Komponenten der Genauigkeit. Die Präzision charakterisiert die Streubreite der erhaltenen Werte.
PROMT	Forschungsprojekt an der ETH
PSL	Der «Person Supervisor & Locator» überwacht Personen in Gleisnähe.
PSS	Prozessschnittstelle: etablierte, sicherheitszertifizierte technische Schnittstelle zwischen Leittechnik und Informatik
PVT	«Position-Velocity-Time»
RAIM	«Receiver Autonomous Integrity Monitoring» Überwachung der autonomen Empfängerintegrität
RAIM	Abkürzung für «Receiver Autonomous Integrity Monitoring» und ist eine Technologie zur Überprüfung der Integrität von GPS. Es spielt vor allem bei sicherheitskritischen Applikationen wie Luft- und Seefahrt eine wichtige Rolle.
RAMSS	«Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Security»

Random Walk	Ein Random Walk (deutsch zufällige (stochastische) Irrfahrt, zufällige Schrittfolge, Zufallsbewegung, Zufallsweg) ist ein mathematisches Modell für eine Bewegung, bei der die einzelnen Schritte zufällig erfolgen. Es handelt sich um einen stochastischen Prozess in diskreter Zeit mit unabhängigen und identisch verteilten Zuwächsen.
Ray-Tracing	Das Raytracing-Prinzip kann auf beliebige Anwendungsbereiche ausgeweitet werden, bei denen die Ausbreitung von Wellen in einer Szene simuliert werden soll.  Im Kontext dieses Berichts ist mit Ray-Tracing die Simulation der Ausbreitung des GNSS-Signals zwischen Satelliten und Empfängerantenne unter Berücksichtigung der Topografie gemeint.
RBC	Das «Radio Block Center» ist die wesentliche Komponente des European Train Control System (ETCS) in den ETCS-Level 2 und 3. Das RBC generiert die Movement Authority unter Berücksichtigung dynamischer und statischer Informationen und stellt die Schnittstelle der Stellwerke zur ETCS Welt dar.
RCA	Die «Reference CCS Architecture» (RCA) Initiative verfolgt die substantielle Kostenverbesserung sowie Kapazität und Zuverlässigkeit des Command, Control, Signalling (CCS) Systems. Als Ausgangslage nimmt die RCA die radio-basierten ETCS Führerstandssignalisierung und EULYNX Schnittstellen und fügt harmonisierte Architekturen mit klar definierten Schnittstellen zu einem aufwärtskompatiblen System mit austauschbaren Komponenten hinzu. Dies beinhaltet Komponenten wie Automatic Train Operation (ATO), Moving Block (MB), Lokalisierung und FRMCS.
RCS	«Rail Control System»
RFID	«Radio Frequency Identification» Funkchip-Technik: Identifizierung über elektromagnetische Wellen
RLG	Intertialsensorik: Ringlaser System
ROSY	«Rollmaterial Ortungs-System» System zur automatischen Identifikation der Zug-Formation und Lokalisierung von Eisenbahn-Fahrzeugen (Vehikeln) aufgrund des Satelliten-Navigationssystems «Global Positioning System (GPS)».
Rotten	Baustellen-Team
RTK	«Real-Time Kinematic» spezieller GNSS Modus zur genauen Lokalisierung
RTSA	«Responsible Trackside Safety Actor» (Z.B. Stellwerk)
SIL	«Sicherheits Integritätslevel»
SLAM	«Simultaneous localization and mapping» Bild- und Scannerbasiertes Verfahren
SNR	«Signal Rausch Verhältnis»
SOA	«Service oriented architecture»
SoM Position Report	Als Position Report wird im europäischen Zugbeeinflussungssystem ETCS (Level 2 und 3) ein regelmässig vom Zug an die Strecke übermitteltes Datenpaket bezeichnet. Der Position Report ist das häufigste Datenpaket in Level 2/3 und Bestandteil der meisten Nachrichten vom Zug an die Strecke.

SPS	«Signal Prozess Steuerung»
SRIC	«Safety Related Interval of Confidence» Sicherheitsrelevantes Vertrauensintervall
SR-Modus	«Staff-Responsible-Modus»
SRSS	«SR40 Safety Rules for Safe Systems» Anforderungen / Vorgaben für die Sicherheit im Projekt SR40
STO	«Semi-automated train operation» (ATO GoA 2) Lokführer während der Fahrt passiv (Autopilot)
Stochastischer Prozess	Ein stochastischer (oder auch Zufall) Prozess ist die mathematische Beschreibung von zeitlich geordneten, zufälligen Vorgängen und bildet die Basis der stochastischen Analyse.
STW	«Stellwerk»
TED	«Train End Device» Physikalisches Gerät (Produkt), das am Ende eines Zuges temporär angebracht wird. Je nach technologischem Fortschritt könnte es zu den Funktionen Zugintegritätsüberwachung, Zuglängenmessung oder Zugendeortung beitragen.
THR	«Tolerable Hazard Rate» (Tolerierbare Gefährdungsrate)
TIMS	«Train Integrity Monitoring System» Subsystem (Produkt), das die Funktion Zugintegritätsüberwachung erfüllt. Eine mögliche Realisierungsvariante könnte aus Lok-seitiger wie aus Zug-Ende Komponente bestehen.
TMS	Mit «Traffic Management System» werden die Fahrpläne und die Disposition automatisiert. Es erfolgt eine optimale und durchgängige Planung über alle Zeithorizonte des Fahrplans. Das TMS steuert - Control-Command and Signalling (CCS) und Automatic Train Operation (ATO) Systeme.
TMS-PE	Die «TMS Plan Education» ist ein Computer basiertes Fahrstrassenstellsystem, gesteuert aus vorberechneten Fahrplandaten (Bewegungssteuerungskomponente in der RCA-Interface-Architektur).
TOBA	«Telecom OnBoard Architektur» (bisher nur eine Arbeitsgruppe)
TPR	Die ETCS-OBUS sendet, wenn sie mit einem Radio Block Center (RBC) (ETCS L2/L3) verbunden ist, regelmässig einen Zugpositionsbericht an das RBC. Der «Train Position Report» kann Integritätsinformationen oder eine sichere Länge beinhalten, je nach den Fähigkeiten des Fahrzeugs.
TRL	"Technology Rediness Level" Technischer Reifegrad
TSI	Die TSI sind die anwendbaren «Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität». Das sind Technische Vorschriften mit Gesetzescharakter, die von der Europäischen Kommission für den europaweit interoperablen Eisenbahnverkehr festgelegt werden.
TTA	«Time to Alert»
TTOD	«Trackside Track Occupancy Detection»

TWD	«Tagging Wagon Device» Physikalisches Gerät (Produkt), das in Einzelwagen festmontiert wird. Könnte zu unterschiedlichen Funktionen beitragen, von Einzelwagenortung zu Logistik und Lastüberwachung.
Ü	Überwachungsfunktion (Teil der GLAT Architektur)
UTO	«Unattended Train Operation» (ATO GoA 4). Kein Lokführer im Zug, komplette Fernsteuerung wie bei einer Drohne
Verfügbarkeit	Die Verfügbarkeit eines technischen Systems ist die Wahrscheinlichkeit oder das Mass, dass das System bestimmte Anforderungen zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. innerhalb eines vereinbarten Zeitrahmens erfüllt.
VL	(RCA) «Vehicle Locator» Funktion on-board. Nutzt mobile Lokalisierungstechnologien (verbaute Sensorik – Vehicle Devices „VD“) um sicher und zuverlässig die Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Zuges festzustellen. Der Vertrauensintervall der Genauigkeit wird durch die Fusion mehrerer Sensoren (Redundanz) und Sensor-Technologien bestimmt. Die fusionierte Lokalisierungsinformation wird interessierten Konsumenten, z.B. dem Vehicle Supervisor (VS) (Überwachungsfunktion des ETCS on-board), zur Verfügung gestellt.
VS	(RCA) «Vehicle Supervision» Funktion on-board. Führt die Geschwindigkeitsüberwachung durch.
VTW	«Vereinen, Trennen, Wenden»
Wahrscheinlichkeitsdichte	Eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, oft kurz Dichtefunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte, Verteilungsdichte oder nur Dichte genannt und mit WDF oder englisch pdf von probability density function abgekürzt, ist eine spezielle reellwertige Funktion in der Stochastik, einem Teilgebiet der Mathematik. Dort dienen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen zur Konstruktion von Wahrscheinlichkeitsverteilungen mithilfe von Integralen sowie zur Untersuchung und Klassifikation von Wahrscheinlichkeitsverteilungen.
Wahrscheinlichkeitsverteilung	Die Wahrscheinlichkeitsverteilung beziehungsweise kurz W-Verteilung oder einfach Verteilung genannt, ist ein grundlegendes Konstrukt der Stochastik. Diese Zahl ist dann die Wahrscheinlichkeit, dass das durch die Menge beschriebene Ereignis eintritt. Typisches Beispiel hierfür wäre das Werfen eines Würfels: Der Menge {2}, also dem Ereignis, dass die Augenzahl 2 geworfen wird, wird von der Wahrscheinlichkeitsverteilung die Wahrscheinlichkeit 1/6 zugeordnet.
ZET1	«Zugende-Tag 1» Funktionsmuster zur Lokalisierung, dass am Ende eines Zuges anstelle des Zugschlussignals montiert wird. Kann Trägheitsmessungen und GNSS Signale aufnehmen.
ZET2	«Zugende-Tag 2» Funktionsmuster zur Lokalisierung, dass an einer Radachse festmontiert wird. Kann Radimpulse, Trägheitsmessungen und GNSS Signale aufnehmen.
ZmuE	Züge mit unerlaubten Eigenschaften