



Zwischenbericht Technologie PoC Lokalisierung

18. Januar 2019

smartrail 4.0: Zwischenbericht Technologie PoC Lokalisierung

Status	Arbeitsdokument
Version	Version 1.2
Letzte Änderung	18. Januar 2019
Urheberrecht	Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.

Inhaltsverzeichnis

1	Gesamtsicht Technologie PoC GLAT.....	6
1.1	Management Summary	6
1.2	Zielsetzung	8
1.3	Ausgangslage	8
1.4	Zusammenfassung PoC Erfahrungen	9
1.5	Zulassung	10
2	Sensortechnologie: GNSS Satellitennavigation	12
2.1	Management Summary	12
2.2	Ausgangslage und Zielsetzung	12
2.3	Erkenntnisse	18
2.4	Weiteres Vorgehen	23
3	Sensortechnologie: IMU Trägheitsnavigation.....	25
3.1	Management Summary	25
3.2	Ausgangslage und Zielsetzung	25
3.3	Erkenntnisse	28
3.4	Weiteres Vorgehen	33
4	Sensortechnologie: Rad Odometrie	35
4.1	Management Summary	35
4.2	Ausgangslage und Zielsetzung	35
4.3	Erkenntnisse und weiteres Vorgehen.....	36
5	Sensortechnologie: Visuelle Odometrie	37
5.1	Management Summary	37
5.2	Zielsetzung	38
5.3	Ausgangslage	39
5.4	Erkenntnisse	40
5.5	Offene Punkte.....	47
5.6	Gesamtbewertung	47
5.7	Weiteres Vorgehen	49
6	Sensortechnologie: Video Lokalisierung	50
6.1	Management Summary	50
6.2	Zielsetzung	50
6.3	Ausgangslage	50
6.4	Erkenntnisse	51
6.5	Offene Punkte.....	53

6.6	Gesamtbewertung	54
6.7	Weiteres Vorgehen	55
7	Sensortechnologie: FOS Fiber Optic Sensing	56
7.1	Management Summary	56
7.2	Zielsetzung	57
7.3	Ausgangslage	57
7.4	Erkenntnisse	60
7.5	Offene Punkte	68
7.6	Gesamtbewertung	68
7.7	Weiteres Vorgehen	69
8	Ground Truth Technologien:	71
8.1	Management Summary	71
8.2	Ausgangslage und Zielsetzung	71
8.3	Erkenntnisse	72
8.4	Offene Punkte	74
8.5	Zulassung	74
8.6	Weiteres Vorgehen	74
9	Sensorfusionen: GNSS, IMU, Odometrie, Ground Truth	75
9.1	Management Summary	75
9.2	Zielsetzung	75
9.3	Ausgangslage	75
9.4	Betrachtungen	78
9.5	Offene Punkte	78
9.6	Gesamtbewertung	78
9.7	Weiteres Vorgehen	78
10	Anwendung: GLAT Onboard Unit (OBU) Train Transponder	79
10.1	Ausgangslage und Zielsetzung	79
10.2	Erkenntnisse	81
10.3	Weiteres Vorgehen	82
11	Anwendung: GLAT Zug Ende Tag (ZET) TrainEnd Transponder	83
11.1	Management Summary	83
11.2	Ausgangslage und Zielsetzung	83
11.3	Erkenntnisse	86
11.4	Weiteres Vorgehen	89
12	Anwendung: sichere Zuglänge, Zugintegrität	90
12.1	Management Summary	90
12.2	Zielsetzung	90
12.3	Ausgangslage	90

12.4	Erkenntnisse	90
12.5	Gesamtbewertung	102
13	Anwendung: von der virtuellen Balise zum Vehicle Locator	103
13.1	Management Summary	103
13.2	Erkenntnisse und Perspektiven	103
13.3	Zulassung	107
13.4	Gesamtbewertung	108
13.5	Weiteres Vorgehen	109

Präambel

Der Zwischenbericht „Technologie PoC Lokalisierung“ (im Folgenden auch gemäss dem Projektnamen „GLAT“ genannt für „generic location aware toolbox“) beschreibt den Status aller Aktivitäten die in den letzten 6 Monaten nach Projekt-Freigabe am 6. Juni 2018 ausgelöst wurden. Dieser Zwischenbericht hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und ist auch nicht in allen Punkten mit externen oder internen Stakeholdern abgestimmt. Ausschnitte davon werden auch auf der Website www.smartrail40.ch zur Verfügung gestellt. Bezüglich der publizierten Ausschnitte gilt weder der Anspruch auf Vollständigkeit noch können Fehler ausgeschlossen werden. Es handelt sich ausdrücklich um einen ersten Zwischenstand, den wir aber breit zur Verfügung stellen wollen.

Im Zwischenbericht sind die Erkenntnisse und das weitere Vorgehen der einzelnen Arbeitspakete beschrieben und in einer Gesamtsicht zusammengefasst.

Autoren Zwischenbericht:

Dr. Raoul R. Schild
Prof. Schnieder

Schild & Partner GmbH

Dipl.-Ing. Angelika Rettinger
Dr. Christian Robl
Thomas Freissler

M2C ExpertControl GmbH

Dr.-Ing. Uwe Becker

Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik
TU Braunschweig

Stéphane Kaloustian
Urs Ackermann
Dr. Alex Brand

SBB SmartRail 4.0

1 Gesamtsicht Technologie PoC GLAT

1.1 Management Summary

Status Arbeitspakete

Der Technologie PoC GLAT ist gut gestartet.

Erste Messfahrten mit allen Sensor-Technogien konnten durchgeführt werden und bilden eine gute Basis für die Vergleichbarkeit von Genauigkeit in unterschiedlichen Umgebungen und Bedingungen.

Zur automatischen Verarbeitung von Sensordaten wurde bzw. wird eine «Post Processing Plattform» aufgebaut und in die SBB «BigData» Umgebung implementiert. Lokalisierungsmessdaten können so mit unterschiedlichen Fusionsalgorithmen bearbeitet und mit der Gleistopographie verglichen werden.

Vergleich der Technologien

Der Status der untersuchten Lokalisierungstechnologien ergibt folgendes Bild:

- Keine der untersuchten Sensortechniken alleine erfüllt die Anforderungen an Genauigkeit und Zulassungsfähigkeit. Eine Kombination von zwei oder mehreren Technologien ist erforderlich, um die Anforderungen möglichst optimal abdecken zu können.
- Im PoC hat man die besten Resultate mit dem optimierten Technologie-Mix GNSS/IMU/Rad-Odometrie erzielt.
- Auch wenn im PoC noch nicht genügend bewertbare Resultate in der Bahnumgebung erfasst werden konnten, ist die Kombination von Video Lokalisierung und visueller Odometrie als vielversprechend einzustufen.
- Bei der FOS Technologie hat der PoC ergeben, dass Zuggeschwindigkeit und Abstand Schiene-Glasfaserkabel negative Einflussfaktoren sind. Aktuell ist die Lokalisierung bei Zuggeschwindigkeiten unter 40km/h noch nicht zufriedenstellend.

Status Zulassung GLAT

Das Risiko, dass die untersuchten Technologien nicht zugelassen werden können ist gross. Darum muss bei GLAT im 2019 das Thema Zulassung mit hoher Priorität angepackt werden

Gemäss den heutigen Erkenntnissen kann mit einiger Wahrscheinlichkeit eine Zulassung auf der Technologie Fusion IMU/GNSS/Rad-Odometrie erwirkt werden. Darum soll eine erste Zulassung auf dieser Technologie initialisiert werden.

Im Rahmen der initialisierten CENELEC Phasen 1&2 soll eine Zulassungsstrategie bzw. ein Zulassungskonzept erarbeitet werden.

Weiteres Vorgehen

Abschluss der Arbeitspakete und Erstellung eines Abschlussberichtes bis Ende 2019.

Start CENELEC Phase 1&2 mit Fokus auf dem optimierten Technologie Mix IMU/GNSS/Rad-Odometrie. Erarbeitung einer Zulassungsstrategie.

Durchführung weiterer FOS Messreihen mit dem Ziel, FOS bei eingeschränkter Verfügbarkeit von GNSS und Mobilfunk-Kommunikation einsetzen zu können.

Weiterführung/Erweiterung der IMU/GNSS/Rad-Odometrie Messreihen.

Begleitung der europäischen Projekte und enge Zusammenarbeit mit Partnerbahnen.

Weiterführung/Erweiterung der Video/Visuellen Lokalisierung/Odometrie als potentielle Backup-Technologie.

1.2 Zielsetzung

Der abschliessende 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 nächsten 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.
- 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.

Zur Optimierung und Prüfung werden Messeinrichtungen aufgebaut und Messfahrten mit den unterschiedlichen Sensor-Technologien in den Anwendungen OBU und ZET durchgeführt. Zudem wird versucht, auf bestehende oder neue Positionierungsdaten von I-EN (Energie Verrechnungsdaten), I-AT-UEW-MUD (Diagnosefahrzeuge) und auf Messdaten vom europäischen Train Localisation Project STARS zurückzugreifen.

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.

1.3 Ausgangslage

Lokalisierung ist im Bereich der Sicherungstechnik unverzichtbar. Heute wird die absolute Lokalisierung infrastrukturseitig und damit nur punktuell gelöst.

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.

Heute wird die Lokalisierung mit Gleisfreimeldung, Balisen im Gleis 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).

Im Projekt LCS-GLAT wurde per Ende 2017 ein umfangreiches Whitepaper erstellt basierend auf theoretischen Betrachtungen, Simulationen und ersten Messungen.

Diese Erkenntnisse bilden die Basis der hier vorgelegten PoC Phase.

1.4 Zusammenfassung PoC Erfahrungen

Der GSM-R Messwagen „mewa12“ konnte mit Lokalisierungstechnik ausgerüstet werden. Die Kombination von GNSS, IMU und Rad-Odometrie Sensorik ist fix als OBU-Funktionsmuster eingebaut und liefert bei jeder GSM-R Messfahrt automatisiert Messresultate, die auf Post-Processing Plattformen (u.a. der SBB Big-Data Plattform) nachbearbeitet und auf die SBB Gleistopographie projiziert und die Genauigkeit überprüft werden kann.

In Bezug auf die Sicherstellung der Integrität von GNSS wurde im Rahmen des PoC eine Methode basierend auf einer Kombination von GNSS mit Trägheitsnavigation und Odometrie entwickelt und in der «PoC Experimental Data Processing» als Modul umgesetzt. In den meisten Streckenabschnitten konnte eine laterale Genauigkeit <1 m gemessen werden.

Am 27. Sep. 2018 wurde eine Lokalisierungsmessfahrt organisiert, bei der parallel zur GNSS, IMU und Rad-Odometrie Messdaten für visuelle Odometrie, Video Lokalisierung und Fiber Optik Sensing (FOS) erfasst wurden.

Mittels auf beiden Seiten (Lokomotive und Steuerwagen) installierten Stereo Kameras konnten einzelnen im Vorfeld installierte Referenzpunkte (April-Tags) erfasst werden und anhand der bewegten Bilder konnte Geschwindigkeit und Weg ermittelt werden. Die Video Lokalisierungstechnologie ist zukunftsorientiert und vielversprechend, auch wenn diese in der Bahnanwendung noch nicht ausgereift ist. Es müssen hier noch mehr Erfahrungen in weiteren Messfahrten (idealerweise auch im Dauerbetrieb) mit optimierter Kamerainstallation, Kamerasystem, Kameraregelung und Bildverarbeitung gesammelt werden.

Die Messfahrten vom 27.9.2018 wurden mehrfach über die 9000 m lange FOS Strecke zwischen Münsingen und Uttigen geführt, analysiert und mit den besten OBU (GNSS/IMU/ODO) Lokalisierungsergebnissen verglichen. Die Genauigkeit ist abhängig vom Abstand Schiene-Glasfaserkabel, der Bodenbeschaffenheit und der Zuggeschwindigkeit. Aktuell ist die Lokalisierung bei Zuggeschwindigkeiten unter 40km/h noch nicht zufriedenstellend.

Parallel dazu wurde auf Basis der GNSS-Sensorik ein Zug-Ende-Tag (ZET) gebaut und erste Testfahrten durchgeführt. Auch mit der noch nicht optimierten Sensorik-Kombination können mit den erfassten Zuganfang- und Zugende-Daten die Geschwindigkeiten und Positionen verglichen und die Zugintegrität bzw. Zuglänge ermittelt werden. Der Bau einer erweiterten ZET Lösung ist initialisiert.

1.5 Zulassung

Die Zulassung von Technologien für den allgemeinen und insbesondere sicherheitsverantwortlichen Einsatz, die bislang noch nicht im Eisenbahnwesen zugelassen sind, muss nach den für Eisenbahnen nationalen bzw. europäischen gültigen Rechtsrahmen, insbesondere den dafür gültigen anerkannten Regeln der Technik erfolgen. Da die untersuchten Sensortechnologien hierzu zählen, wird die Zulassungsthematik z.T. allgemein und zusammenfassend diskutiert. Sensorspezifische Aspekte werden dann später gesondert betrachtet.

Eine Zulassung im Eisenbahnwesen beruht auf folgenden, z.T. hierarchisch gestuften Voraussetzungen, die in meist aufeinanderfolgenden Phasen erfüllt werden. In der üblichen Reihenfolge sind dies:

1. Normgerechte Entwicklung des betreffenden Objekts und Sicherheitserprobung entsprechend den Phasen und Anforderungen der CENELEC Normen EN 50126, 50128, 20129, 20159, 50155 u.a.
2. Erarbeitung eines normgerechten technischen Sicherheitsberichtes als Bestandteil eines Sicherheitsnachweises mit umfassender Dokumentation von Begründungen und Erprobungen
3. Begutachtung des Sicherheitsnachweises und des betreffenden Objektes und Schlussfolgerung durch eine akkreditierte Institution
4. Prüfung der Antragsunterlagen und des Begutachtungsberichtes durch die Zulassungsbehörde und Beschluss – Ausstellung eines Bescheides

Als Voraussetzung für eine Zulassung sind daher die Durchführung und Ergebnisse der ersten beiden CENELEC Phasen entscheidend. Bei Änderungen, die durch die Nutzung im sicherheitsverantwortlichen Bereich im Eisenbahnsystem entstehen, muss eine weitere Zulassung entsprechend der EU Verordnung nach den gemeinsamen Sicherheitsmethoden (CSM RA) erfolgen, die zuerst eine verordnungsgerechte Risikobeurteilung voraussetzt, die dann wieder begutachtet und akzeptiert werden muss.

Einen wichtigen Ansatz zu einer potenziell aussichtsreichen zulassungsfähigen Systementwicklung des Sensorsystems für den sicherungstechnischen Einsatz ist dessen funktionale Konfiguration. Hierzu gehört das in der Machbarkeitsstudie aufgegriffene zweiteilige modulare Architekturkonzept der Kausalsicherung: Im ersten Teil wird eine genaue und verfügbare Messinformation ermittelt und danach im zweiten Teil deren Sicherheitsintegrität nach den Verfahren der klassischen Sicherungstechnik festgestellt. Das hat den Vorteil, dass die Messwertgenerierung nicht zwingend nach den Regularien der Eisenbahntechnik entwickelt werden muss, jedoch eine deren Einsatzbedingungen entsprechende anzuerkennende Qualifikation benötigt. Die sicherheitsgerichtete Entwicklung betrifft dann nur die Überwachung der Messwerte auf deren Integrität.

Damit sich potentielle Ausfälle und Fehler einer Sensorik mit neuartigen Technologien nur noch im Rahmen eines akzeptablen Risikos auswirken können, sind daher zuerst eine Reihe von Aspekten hinsichtlich deren gefährdender Einflussmöglichkeiten auf die Nutzung für den sicheren Eisenbahnbetrieb zu

analysieren und dann entsprechende Maßnahmen und Vorkehrungen zu deren Verhinderung zu treffen. Dies kann durch entsprechende Gestaltung, Architektur und Parametrierung während der Entwicklung des Sensorsystems im Einzelnen konzipiert, erprobt, dokumentiert und umgesetzt werden.

In den weiterführenden Arbeiten wird die Zulassungsfähigkeit im Zuge einer methodischen Konzeption der Funktions- und Gerätearchitektur und in Hinblick auf eine Nachweiskonzeption und eine spätere Nachweisführung sukzessive vertieft behandelt.

2 Sensortechnologie: GNSS Satellitennavigation

2.1 Management Summary

Im Rahmen des PoC wurde der SSB Telekommesswagens mewa12 (www.railcom.org) für die Zwecke einer automatisierten Aufnahme von (Roh-)Daten für GNSS, Trägheitsnavigation (inkl. IMU) und Odometrie angepasst und durch neue Geräte (Septentrio, Reach/ublox M8T) ergänzt. Der mewa12 wurde somit um Lokalisierungsmesstechnik erweitert.

Zur automatischen Verarbeitung von Sensordaten wurde bzw. wird eine «PoC Experimental Data Processing» Plattform aufgebaut. Deren Module werden auf PC Basis entwickelt und hochautomatisiert in der SBB «BigData» Umgebung implementiert.

Bei der Verarbeitung von GNSS Rohdaten werden die «state of the art» GNSS Methoden in Bezug auf Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit und in Bezug auf das SBB Netz untersucht. Dabei dienen Grundlagen und Methoden entwickelt für sichere Lokalisierung in der Luftfahrt als Basis, die auf die Besonderheiten der Bahnumgebung angepasst und erweitert werden.

In Bezug auf die Sicherstellung der Integrität von GNSS wurde im Rahmen des PoC eine Methode basierend auf einer Kombination von GNSS mit Trägheitsnavigation und Odometrie entwickelt und in der «PoC Experimental Data Processing» als Modul umgesetzt.

GNSS mit den Methoden «Real Time Kinematic (RTK)» und «Differential GNSS (DGNSS)» kombiniert mit Trägheitsnavigation und Odometrie ermöglichen gleisselektive Lokalisierung am SBB Netz. Zu klären ist deren Verfügbarkeit. Dazu werden in 2019 mittels der «PoC Experimental Data Processing» und «Big Data» sämtliche mittels mewa12 aufgenommen Daten ausgewertet und mit den GNSS Daten der SBB Energiemessungen kombiniert. Daraus wird eine statistisch belastbare Aussage bezüglich Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit von GNSS und in Kombination mit einer Trägheitsnavigationsplattform und Odometrie abgeleitet.

2.2 Ausgangslage und Zielsetzung

Während über die letzten Jahre (bzw. Jahrzehnte) der Einsatz von GNSS Technologien, neben bewährten Anwendungen im Bereich Luftfahrt, vielfach theoretisch und punktuell empirisch in meist mit Mitteln der Europäischen Kommission finanzierten Forschungsprojekten mit Beteiligung der Industrie untersucht wurde, fehlt es bis dato an längerfristigen und tiefgehenden empirischen Untersuchungen im operativen Bahnbereich. Das SR40 Programm kann auf diese Vorarbeiten aufsetzen, muss diese aber in

Eigenregie mit Hinblick auf die speziellen Notwendigkeiten von SR40 und im Sinne einer klassischen SWOT Betrachtung vertiefen.

Im Projekt «GLAT Phase 0» wurden aufbauend auf den Ergebnissen diverser europäischer Projekte erste empirische Messungen zur Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit von GNSS Technologien unter Nutzung des SBB Telekom Messwagen (mewa12) unternommen. Im Rahmen des PoC werden diese empirischen Messungen in Umfang und Tiefe wiederum unter Einsatz des mewa12 auf das gesamte Gleisnetz der SBB erweitert. Es gilt hinreichend abzuschätzen, inwieweit GNSS Technologie den Anforderungen der Bahnsicherheitstechnik in Bezug auf die notwendige Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit gerecht wird. Im Rahmen des PoC werden diese Fragen nicht abschließend geklärt, sondern vielmehr das erforderliche «know how» für einen zielgerichteten CENELEC basierten Ausschreibungsprozess geschaffen.

2.2.1 Stand der Technik GNSS im Bereich sicherheitskritischer Anwendungen (Luftfahrt, Bahntechnik)

Im Bereich Luftfahrt wird die GPS Technologie (d.h. bisweilen nur das amerikanische System NAVSTAR GPS) seit Ende der 90er Jahre benutzt. Während GPS zunächst als zusätzliche Quelle zur Stützung von bestehenden, bodengebundenen Radio-Navigationssystemen (VOR/DME über Land bzw. Omega/Decca über ozeanischen Gebieten) und Trägheitsnavigation für Streckennavigation eingesetzt wurde, ist die Nutzung das System heute in allen Bereichen der Luftfahrt von der Navigation bis hin zur Flugsicherung oft als primäre Quelle eingesetzt. Eine detaillierte Behandlung von GPS in der Luftfahrt im Rahmen der «Performance Based Navigation (PBN)» findet sich in den folgenden Unterlagen:

AFI Flight Operations Safety Awareness Seminar (FOSAS) - Performance Based Navigation: https://www.icao.int/ESAF/Documents/meetings/2017/AFI%20FOSAS%202017/Day%203%20Docs/Day_3_PBN.pdf

Flight Crew Basic Theoretical Training for RNP Approaches down to LPV Minima (GSA): https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/training_material/LPV%20Training_package.pdf

Entscheidend für den Einsatz von GPS bzw. in weitere Folge GNSS ist eine Stützung durch zusätzliche bordautonome (z.B. Trägheitsnavigation/IMU) und/oder bodengebundene Systeme (Radionavigation und/oder Referenzstationen (z.B. im Rahmen SBAS):

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_Augmentation

Je nach Einsatz i.e. «Use Case» wird GPS als primäre Quelle oder in Kombination mit anderen Sensoren genutzt. Es gilt, je höher die Anforderung an die Integrität und Verfügbarkeit, desto intensiver und umfangreicher hat diese Stützung mit anderen Sensoren zu erfolgen.

Die gegenwärtige Entwicklung im Bereich Luftfahrt geht in Richtung DGNSS gekoppelt mit Trägheitsnavigation, um auch Präzisionsanflüge bei nahezu keiner Sicht bis zur Pistenschwelle und hin zur automatischen Landung durchführen zu können:

[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based_Augmentation_System_\(GBAS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Ground-Based_Augmentation_System_(GBAS))

Bei bodengebundenen Anwendungen ist die «freie Sicht» zu den GNSS Satelliten mitunter stark eingeschränkt. Umgebungsbedingungen wie Topographie, Gebäude und auch Vegetation führen zu Signaldämpfungen, Abschattungen und Reflexionen. Abhängig vom GNSS Verfahren werden dadurch die Genauigkeit, Integrität und die Verfügbarkeit herabgesetzt. Zusätzlich ist GNSS aufgrund der geringen Signalpegel anfällig auf bewusste oder unbewusste Störungen durch Dritte (Jamming, Spoofing).

Im Rahmen des PoC steht die Evaluierung der GNSS Techniken in Bezug auf die erreichbare Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit am Gleisnetz der SBB im Vordergrund. Dabei werden insbesondere die Techniken «Real Time Kinematic (RTK)», «Post-Processing Kinematic (PPK)», «Precise Point Positioning (PPP)», «Differential GNSS (DGNSS)», «Standard Positioning Service (SPS)» mit oder ohne SBAS und eine spezielle genauere Form des SPS bei GALILEO genannt AltBOC untersucht. Siehe

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/RTK_Fundamentals

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/PPP_Fundamentals

[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Code_Based_Positioning_\(SPS\)](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Code_Based_Positioning_(SPS))

https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/AltBOC_Modulation

2.2.2 Aufbau Datenerfassung PoC

Die folgende Grafik zeigt den im Rahmen des PoC realisierten Messaufbau unter Nutzung des Telekommesswagens der SBB (www.railcom.org).

Smartrail 4.0 LCS Lokalisierung

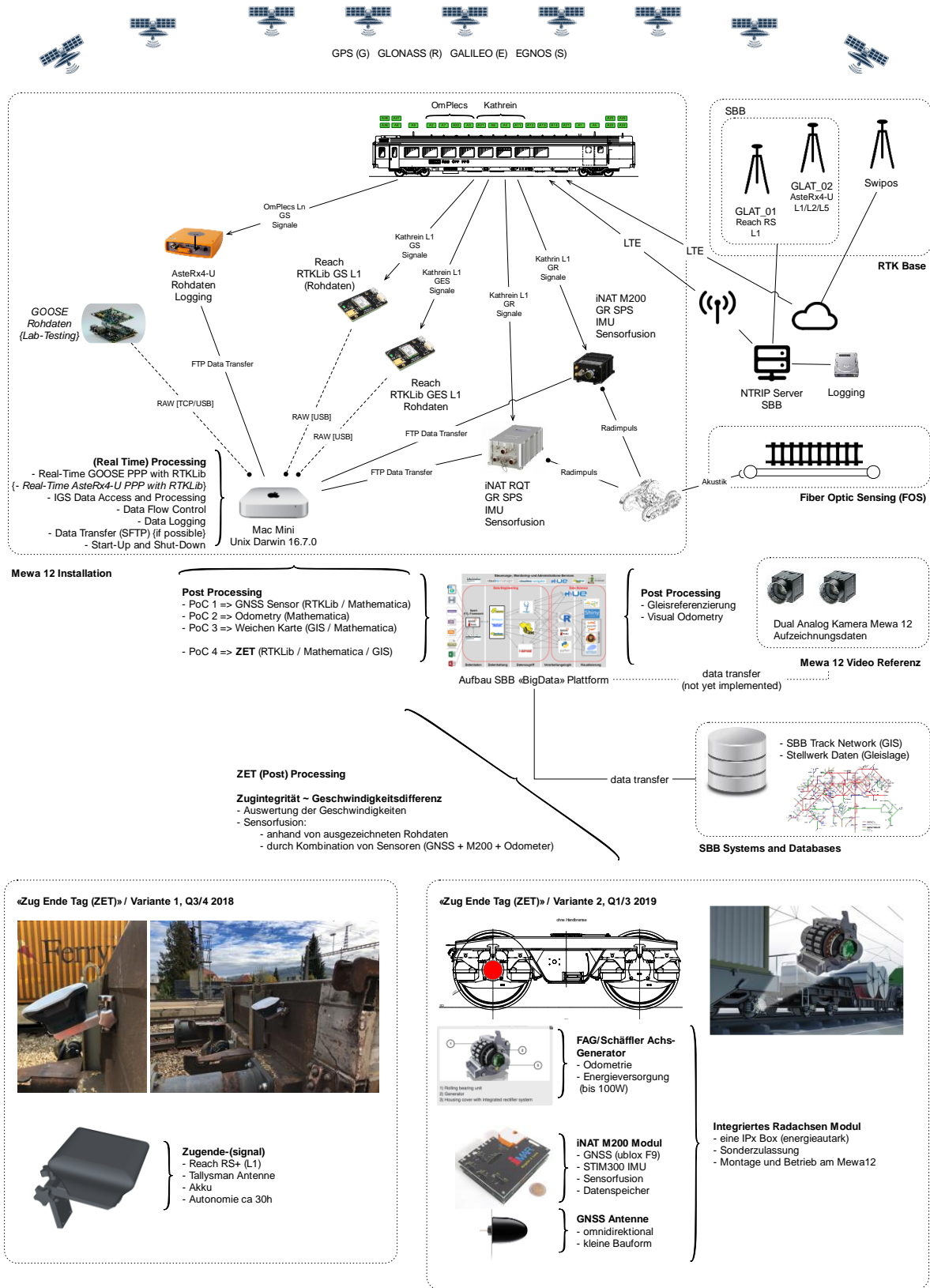


Abbildung 2-1: Aufbau PoC Datenerfassung, SBB Telekommesswagen (www.railcom.org)

Der Messwagen «mewa12» ist für die eigentlichen Messaufgaben im Telekom-Bereich mit jeweils einer leistungsstarken «Ring-Laser (RLG)» basierten und einer «piezoelektrischen (MEMS)» GNSS/IMU/Odometrie Trägheitsnavigationsplattform ausgestattet. Die darin verwendeten Technologien zur Fusion von Sensoren sind in dem folgenden Dokument beschrieben: https://www.imar-naviga-tion.de/downloads/papers/iMAR_Railway-Surveying_Inertial-Sensors-Systems_2016.pdf

Im Rahmen vom PoC werden diese Systeme genutzt und dahingehend konfiguriert, dass sie permanent (Roh-)Daten aufzeichnen, auf einem PoC-Rechner zwischenspeichern, um in Folge im Rahmen eines Post-Processings («Big Data») ausgewertet werden zu können.

Ergänzt werden die GNSS/IMU/Odometrie Trägheitsnavigationsplattformen durch einen high-end, multi-frequency GNSS Empfänger der Firma Septentrio und weitere low-cost, single-frequency Empfänger der Firma Emlid/uBlox.

Das Ziel der GNSS Datenerfassung im Rahmen des PoC ist möglichst alle verfügbaren GNSS Signale zu erfassen und systematisch auszuwerten.

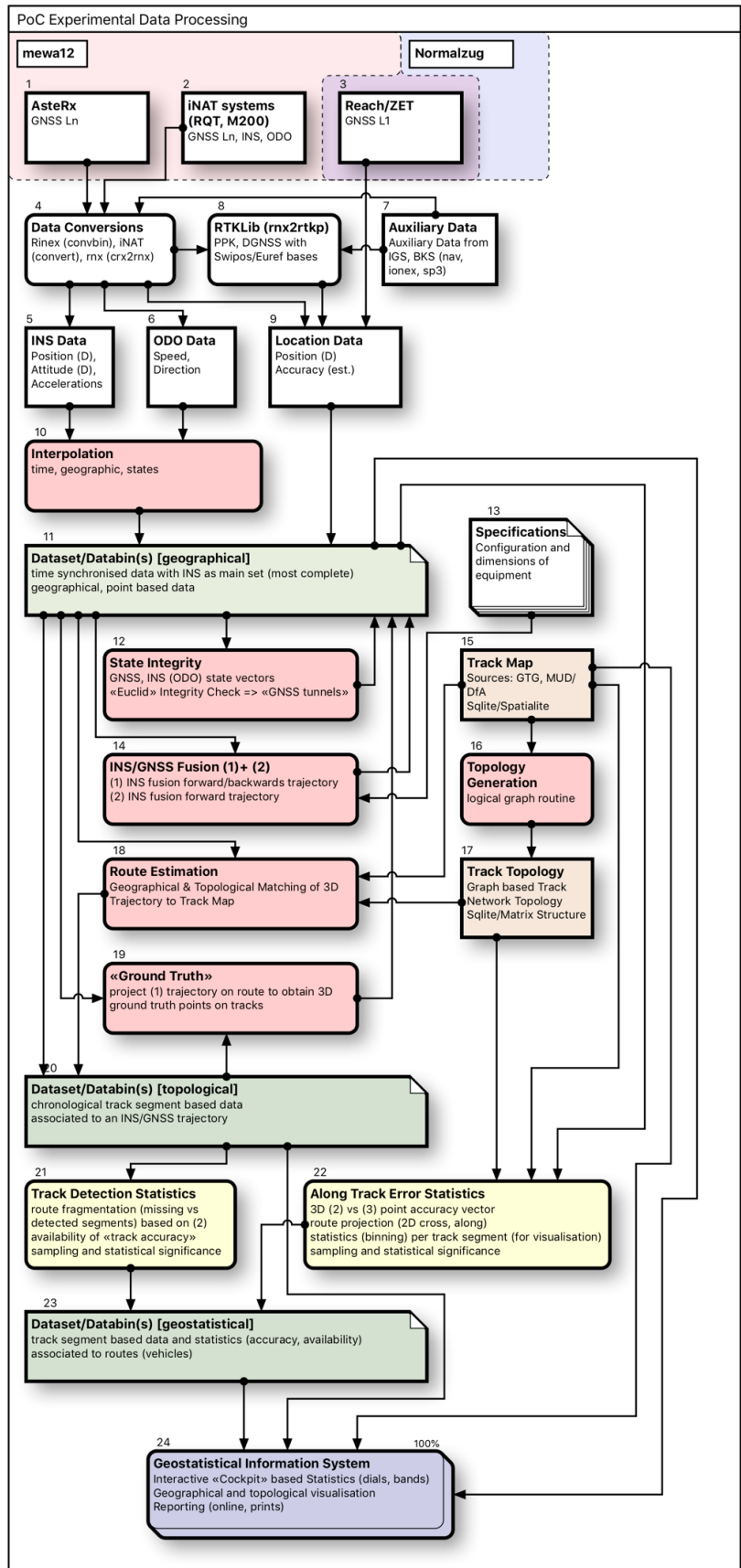


Abbildung 2-2 : Das Blockdiagramm „PoC Experimental Data Processing“

Die Verarbeitung der erfassten Daten erfolgt einerseits in «Echtzeit» in den Empfängern und in einer Nachverarbeitung unter Einsatz speziell konfigurierbarer Werkzeuge mit primärem Fokus auf die Software Bibliothek RTKLIB (siehe: <http://www.rtklib.com>).

Im Rahmen des PoC wurde für die Verarbeitung und Auswertung der mewa12 Daten und potentiell weiteren Fahrzeugen, die im Rahmen des CENELEC und damit verbundenen Zulassungsprozessen hinzukommen werden, eine leistungsstarke Prozesskette spezifiziert. Teile der Prozesskette sind bereits implementiert.

Dabei 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.

Das Blockdiagramm „PoC Experimental Data Processing“ (siehe oben) zeigt die Datenverarbeitung und damit verbundene Prozesskette. Im Rahmen der nächsten Kapitel wird auf die einzelnen Verarbeitungsschritte (siehe Nummerierung im Blockdiagramm) verwiesen.

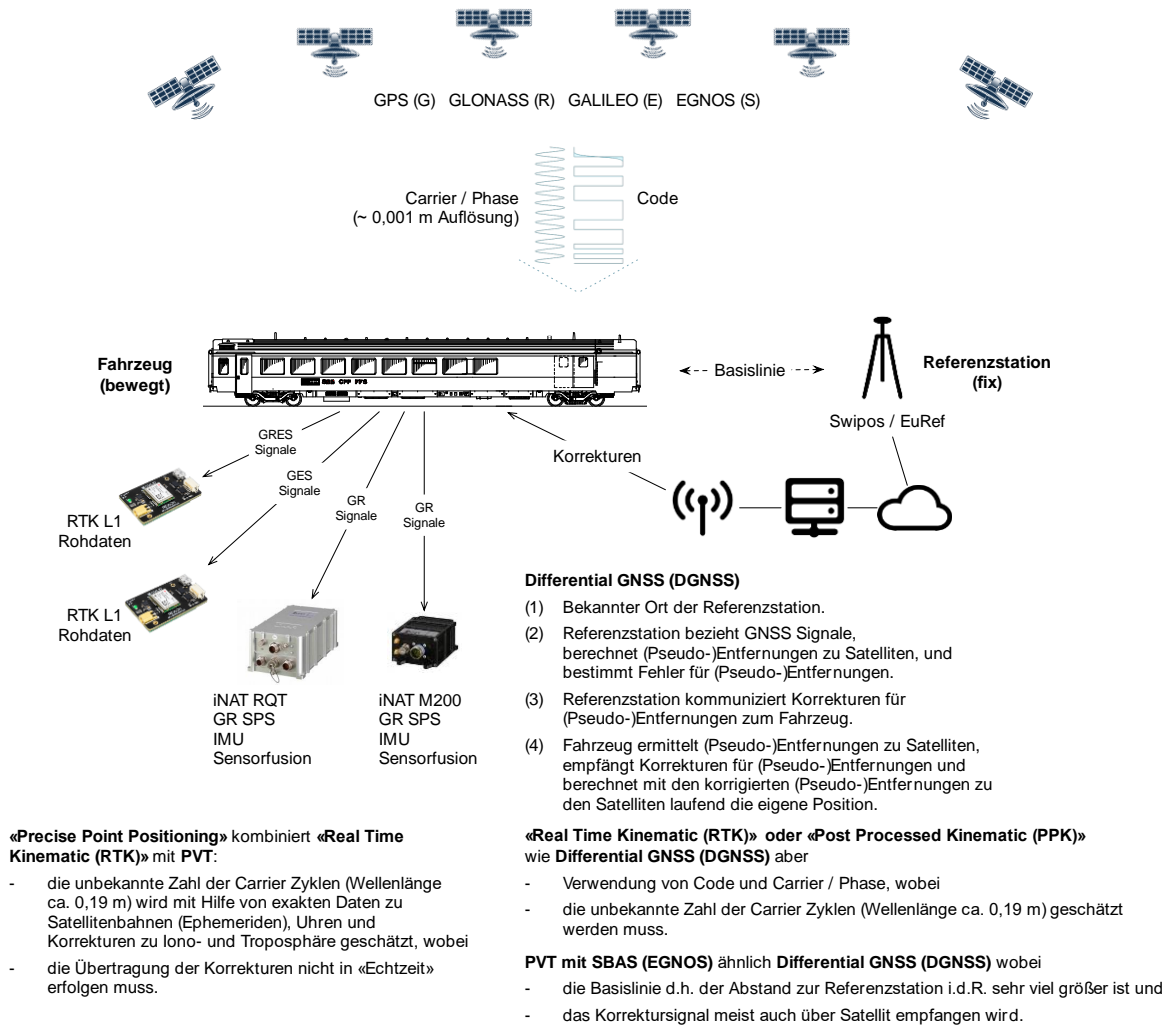


Abbildung 2-3: untersuchte Technologien und Algorithmen im Bereich GNSS

2.3 Erkenntnisse

2.3.1 Genauigkeit von GNSS Technologien

Die ersten Ergebnisse bestätigen die Vorarbeiten aus GLAT Phase 0.

In Bereichen mit guten GNSS Empfangsbedingungen erlaubt RTK/PPK, als genauestes Verfahren, wie auch DGNSS eine exakte, gleisgenaue Lokalisierung. DGNSS erweist sich als etwas ungenauer aber, technologisch bedingt, stabiler. Die Genauigkeit von SPS mit SBAS ermöglicht keine Gleisselektivität. SPS/AltBOC zeigt Potential in Richtung einer Genauigkeit ähnlich DGNSS, ist aber aufgrund der noch nicht vollständig verfügbaren GALILEO Konstellation (diese wird mit Q1/2019 voraussichtlich fertiggestellt), technologisch nicht ausgereift.

Die folgende Grafik zeigt exemplarisch ein Bild der typischen Genauigkeiten einmal mit PPK (blaue Punkte) und PVT AltBOC (orange Punkte) entlang des Streckennetzes. Während PPK sehr genau und

präzise relativ zur Gleismitte (grüne Linien) liegt (Antennen sind mittig am Fahrzeug angebracht), zeigt PVT AltBOC einen präzisen Verlauf aber deutlichen Versatz von ca. einem Meter.

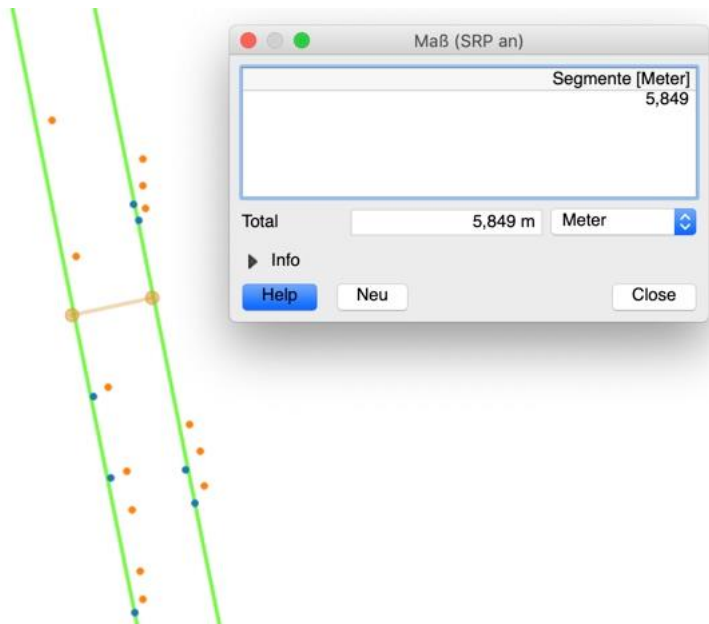


Abbildung 2-4: exemplarisches Bild der typischen Genauigkeiten GNSS Technologie

2.3.2 Integrität von GNSS – Luftfahrt vs. Bahn

Um Bereiche mit GNSS Störungen sicher und zuverlässig erfassen zu können, wurde im Rahmen des PoC, angelehnt an Verfahren in der Luftfahrt, ein GNSS Integritätsbewertungsverfahren entwickelt, experimentell implementiert und getestet. Die Ergebnisse sind vielversprechend. Bereiche mit GNSS Störungen, unabhängig von der Art oder Quelle der Störung, lassen sich zuverlässig erfassen.

Das Verfahren beruht auf einem laufenden Vergleich des Lokalisierungsobjekt Zustandsvektors parallel ermittelt mit GNSS und über die Trägheitsnavigationsplattform (IMU mit Odometrie). Die folgende Grafik erläutert das einfache aber robuste Verfahren.

Integritätsbestimmung GNSS über Vergleich der GNSS/INS Zustandsvektoren («ground truth»)

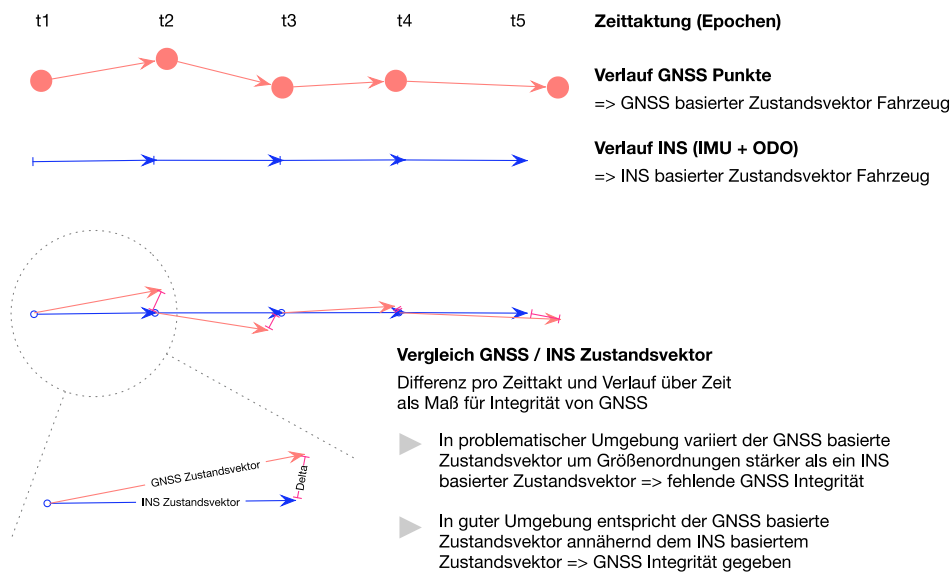


Abbildung 2-5 Integritätsbestimmung GNSS über Vergleich der GNSS/INS Zustandsvektoren

In Bereichen von GNSS Störungen wird der Verlauf der GNSS Positionen unstet, wodurch auch die Zustandsvektoren (bzw. das «Vektorfeld» über der Zeit) stark schwanken. Hingegen bewahrt der auf der Trägheitsnavigationsplattform basierende Zustandsvektor seinen steten Verlauf, unabhängig von externen Störungen. Überschreitet die Differenz der Zustandsvektoren eine Grenze, deren optimale Größe im Rahmen des PoC empirisch ermittelt wird, werden die GNSS Messungen eliminiert. Es entstehen in diesen Bereichen mehr oder weniger lange «virtuelle Tunnel», die mit alternativer Lokalisierung überbrückt werden (Trägheitsnavigationsplattform (IMU mit Odometrie) und Infrastruktur (ETCS Balisen)). Entscheidend ist, dass virtuelle Tunnels (teils stochastisch im Auftreten) als auch physische Tunnels (immer deterministisch) effektiv und sicher innerhalb der definierten Anforderungen an die Genauigkeit überbrückt werden können. Nur so lässt sich eine hinreichende Verfügbarkeit erreichen.

2.3.3 Verfügbarkeit – erste Ergebnisse mewa12

Die folgenden Grafiken zeigen exemplarisch das Auftreten von «virtuellen» und physischen Tunnels bei Messfahrten mit dem mewa12. Als Hintergrund fungiert eine exakte Rasterkarte von SwissTopo, die einen exakten Verlauf der Gleiskarte implementiert. Die grüne Linie ist Gleiskarte basierend auf SBB DfA. Die roten Punkte sind GNSS Punkte, die die Integrationsbestimmung (siehe oben) passiert haben und blau gestrichelt ist die kombinierte GNSS/IMU/Odometrie Lösung (siehe Kapitel Trägheitsnavigation, GLAT OBU TrainTransponder bzw. Zug Ende Tag (ZET) TrainEndTransponder).

Die erste Grafik zeigt den Ausschnitt einer Fahrt des mewa12 von Zürich nach Bern und anschließend zurück bzw. weiter nach Bellinzona. Man sieht die Abfolge der exakten PPK Punkte mit Lücken, die durch Trägheitsnavigation (IMU + Odometrie) vollends präzise geschlossen werden.

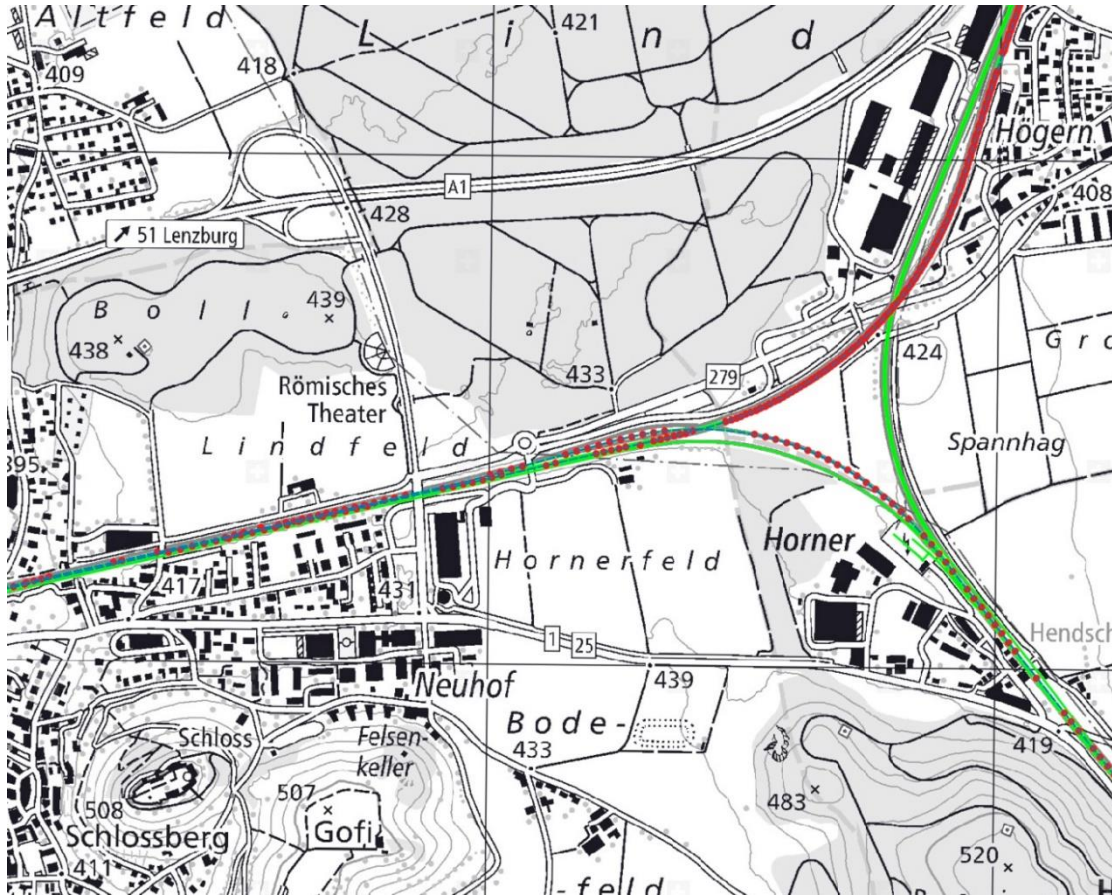


Abbildung 2-6: Ausschnitt Fahrt mewa12 von Zürich nach Bern (Strecke)

Die folgende Grafik zeigt einen Bahnhofsbereich entlang derselben Strecke.

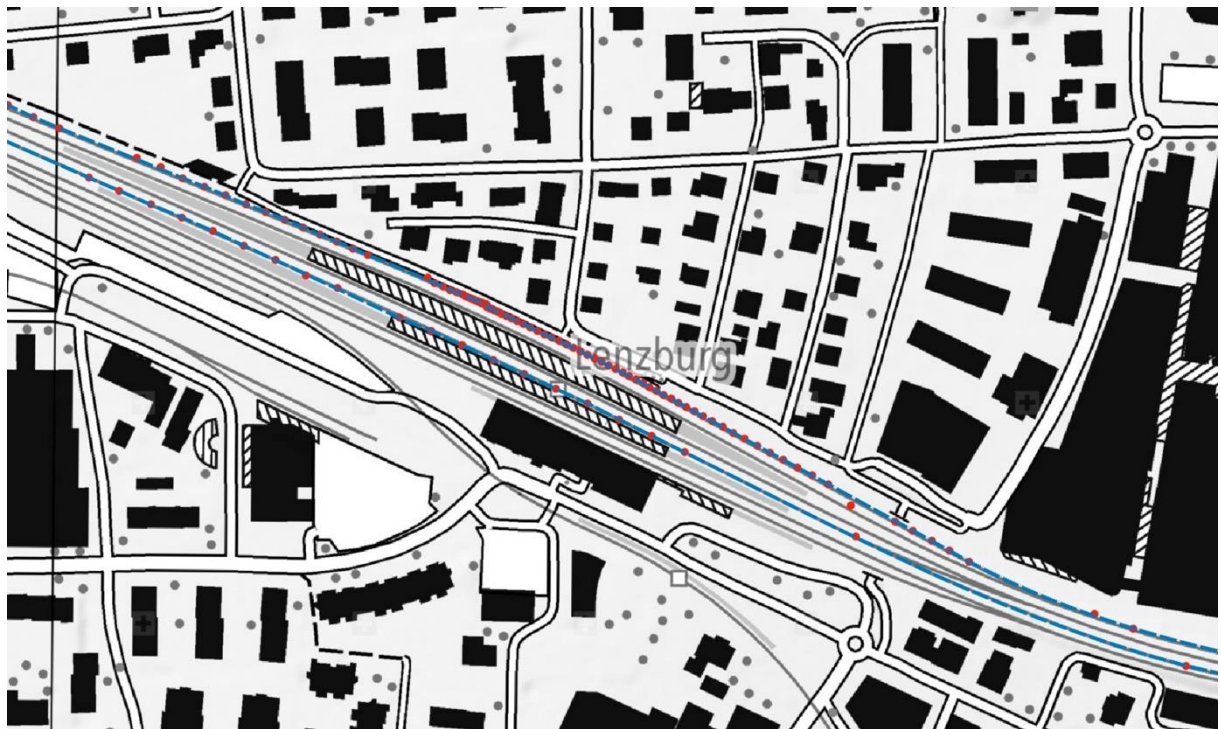


Abbildung 2-7: Ausschnitt Fahrt mewa12 von Zürich nach Bern (Bahnhof)

Die folgende Grafik zeigt einen physischen Tunnel, an dessen Ende mittels Trägheitsnavigation (IMU + Odometrie) die Trajektorie des Zuges exakt am richtigen Gleis liegt. Die Stützung der Trägheitsnavigation (IMU + Odometrie) durch GNSS Punkte, die erneut die Integrationsbestimmung passiert haben, erfolgt erst nach einigen hundert Metern.

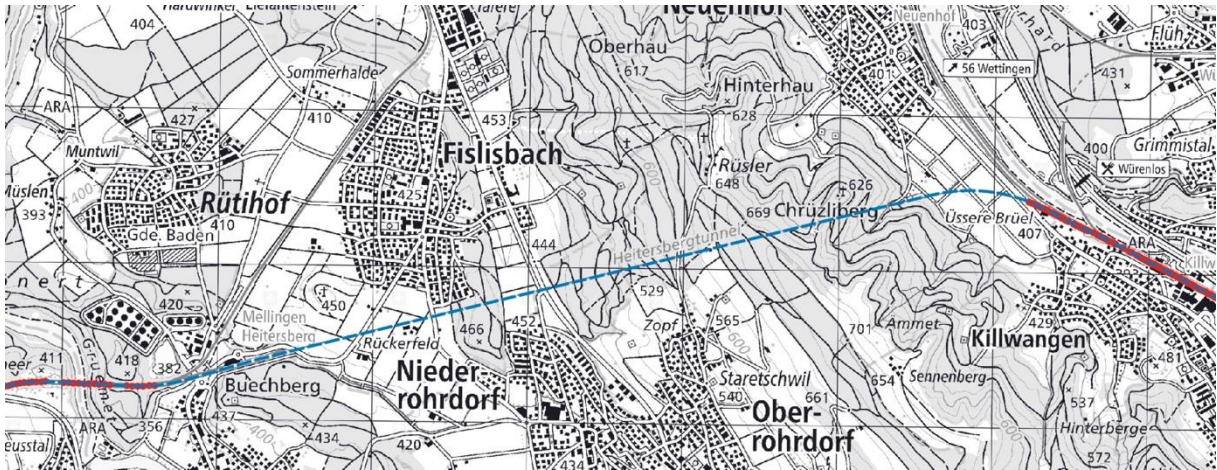


Abbildung 2-8: Ausschnitt Fahrt mewa12 von Zürich nach Bern (Tunnel)

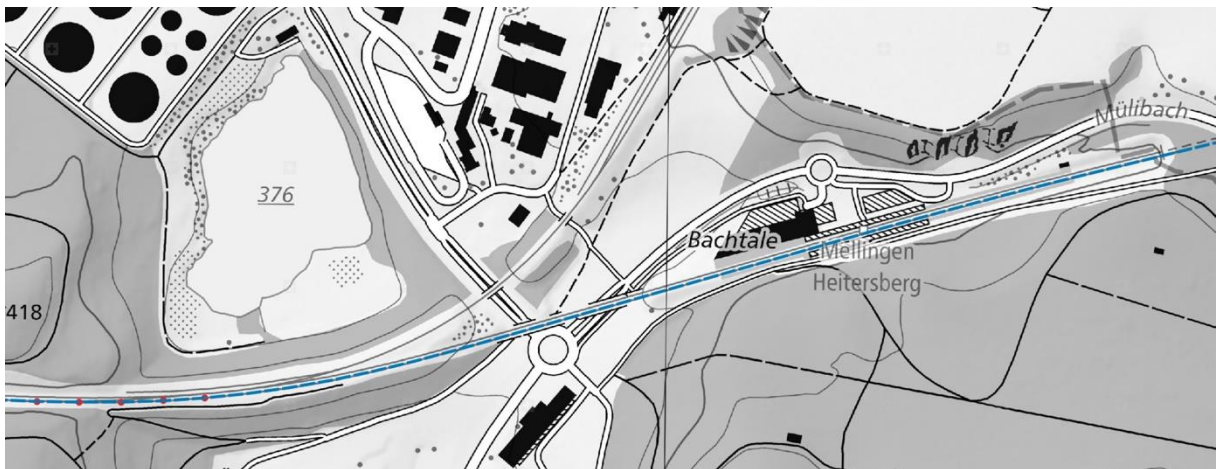


Abbildung 2-9: Ausschnitt Fahrt mewa12 von Zürich nach Bern (schlechter GNSS Bereich)

Auf offener Strecke können Bereiche mit GNSS Störungen durch das entwickelte Verfahren zur Integritätsbestimmung zuverlässig erkannt und mittels Trägheitsnavigation bei höchster Genauigkeit überbrückt werden.

Bei langen Tunnels oder GNSS Störungen in Bahnhofsbereichen, zeigen sich Probleme, einerseits durch die technologisch bedingte Drift der Trägheitsnavigation über Weg und Zeit und andererseits aufgrund anhaltend, schlechter GNSS Bedingungen und noch nicht optimierter Parameter des Verfahrens zur Integritätsbestimmung. In beiden Bereichen wird ohne sekundäre Quelle absoluter Positionierung d.h. unabhängig von GNSS, eine hinreichend genaue Lokalisierung nicht möglich sein. Demzufolge ist im Rahmen des TrainTransponder unbedingt der Einsatz von ETCS Balisen notwendig. Im Rahmen

des PoC wird aufgrund der GNSS Bedingungen und entwickelten Verfahren eine Hochrechnung der am SBB Gleisnetz notwendigen Zahl an ETCS Balisen erfolgen.

2.4 Weiteres Vorgehen

Die GALILEO Konstellation wird mit Q1 2019 voraussichtlich abgeschlossen und für den Betrieb verfügbar sein. Da GALILEO das modernste und einzige rein zivile GNSS ist, wird darauf in Kombination mit GPS (das GNSS der Wahl im Bereich der Luftfahrt) ein Schwerpunkt auf damit erzielbare Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit gelegt. Die bisher im PoC entwickelte Datenerfassung und Verarbeitung ist darauf bereits ausgelegt.

Die folgenden Punkte zeigen die Schwerpunkte im Bereich GNSS für den weiteren PoC Verlauf.

2.4.1 Fortführen der Datenerfassung mit dem mewa12, wobei durch die Verfügbarkeit der vollständigen GALILEO Konstellation besonderer Fokus auf dieses neueste Satellitennavigationssystem gelegt wird.

Die Empfänger im mewa12 wurden, sofern notwendig, im Q4 2018 mit einem «upgrade» auf GALILEO versehen. Die Empfänger/System für ZET – Zugende und Rad – sind bzw. werden ebenfalls mit Fokus auf GALILEO konzipiert und umgesetzt.

2.4.2 Automatisierte Verarbeitung großer Datenmengen mit Schwerpunkt auf die Einbindung von Swipos/AGNES Referenzstationen bei PPK, DGNS wenn verfügbar, oder ggf. Einrichten eigener SBB Referenzstationen

Die Prozesskette wird in «BigData» implementiert. Hier sind insbesondere im Bereich der Software Werkzeuge Arbeiten notwendig.

Die Situation der Referenzstationen für RTK/PPK/DGNSS ist aufgrund Zahl und Basislänge (zwischen Station on Lokalisierungsobjekt) nicht befriedigend. Hier gilt es das von Swipos in großer Dichte vorhandene aber aufgrund technischer Limitationen für SBB noch nicht nutzbare AGNES Netzwerk für SBB nutzbar zu machen.

2.4.3 (Statistische) Modellierung Genauigkeit, Integrität, Verfügbarkeit für SBB Gleisnetz auf Basis PoC

Die umfangreichen PoC Datenmengen werden in den nächsten Wochen automatisiert verarbeitet und in einer detaillierten, interaktiven Karte, die Genauigkeit und Verfügbarkeiten pro Streckenabschnitt zeigt, dargestellt.

2.4.4 Dokumentation (inkl. Visualisierung) der Ergebnisse mit Schwerpunkt auf eine Begleitung des CENELEC Prozesses sowie eine Unterstützung des Zulassungsprozesses.

Der Aufbau des PoC Datenverarbeitungsprozesses dient nicht nur der technologischen Evaluierung, sondern

- der Unterstützung eines Zulassungsprozesses nach CENELEC, und vor allem
- dem Aufbau einer SBB Wertschöpfungskette im Rahmen einer neuen Bahnsicherungstechnik: Daten, die von den fahrenden Objekten erhoben werden, haben in vielen anderen Bereichen der Bahn (Logistik, Diagnose und Instandhaltung der Infrastruktur) sehr hohen Wert. Die Arbeiten von PoC dienen der Sammlung von Erfahrung für eine allfällige Realisierung eines neuen auf «BigData» beruhenden Geschäftsmodells (SBB intern und extern).

3 Sensortechnologie: IMU Trägheitsnavigation

3.1 Management Summary

Im Rahmen des PoC wurden die im Telekommesswagen mewa12 (www.railcom.org) vorhandenen Trägheitsnavigationsplattformen der Firma iMAR in den Prozess der automatisierten Aufnahme von (Roh-)Daten eingebunden. In der Auswertung («PoC Experimental Data Processing») werden diese Daten mit GNSS, Odometrie sowie Video-Odometrie und FOS kombiniert.

Ohne eine Kombination von (Lokalisierungs-)Sensoren und dabei insbesondere Trägheitsnavigation kombiniert mit Odometrie lässt sich eine genaue, sichere Lokalisierung auf dem SBB Netz nicht umsetzen. Im Rahmen der PoC wird analysiert, welche Güte (und abgeleitet Kosten) die Sensoren einer Trägheitsnavigation in Kombination insbesondere mit den Sensoren GNSS und Odometrie für eine genaue, sichere Lokalisierung auf dem SBB Netz aufweisen müssen.

3.2 Ausgangslage und Zielsetzung

Um SIL4 bewährte Lokalisierungs-Technologie zu realisieren, müssen diversitäre Sensortechnologien kombiniert werden. Trägheitsnavigation, wie sie in Bereichen der Luft- und Raumfahrt seit jeher zu Stützung von Funknavigation (u.a. GNSS) verwendet wird, ist dafür eine geeignete Technologie, die aufgrund von Innovationen im Bereich MEMS basierte IMUs nunmehr auch leistungsstark und kosteneffektiv im Bereich der Bahntechnik zum Einsatz kommen kann.

https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_navigation_system

Der SBB Telekom Messwagen (mewa12) verfügt über zwei leistungsstarke Trägheitsnavigationsplattformen mit unterschiedlichen IMUs. Diese werden in Kombination mit den anderen Sensortechnologien im Rahmen der Sensorfusion genutzt, um durch kombinatorische Vergleiche Erkenntnisse zur Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit von GLAT abzuleiten.

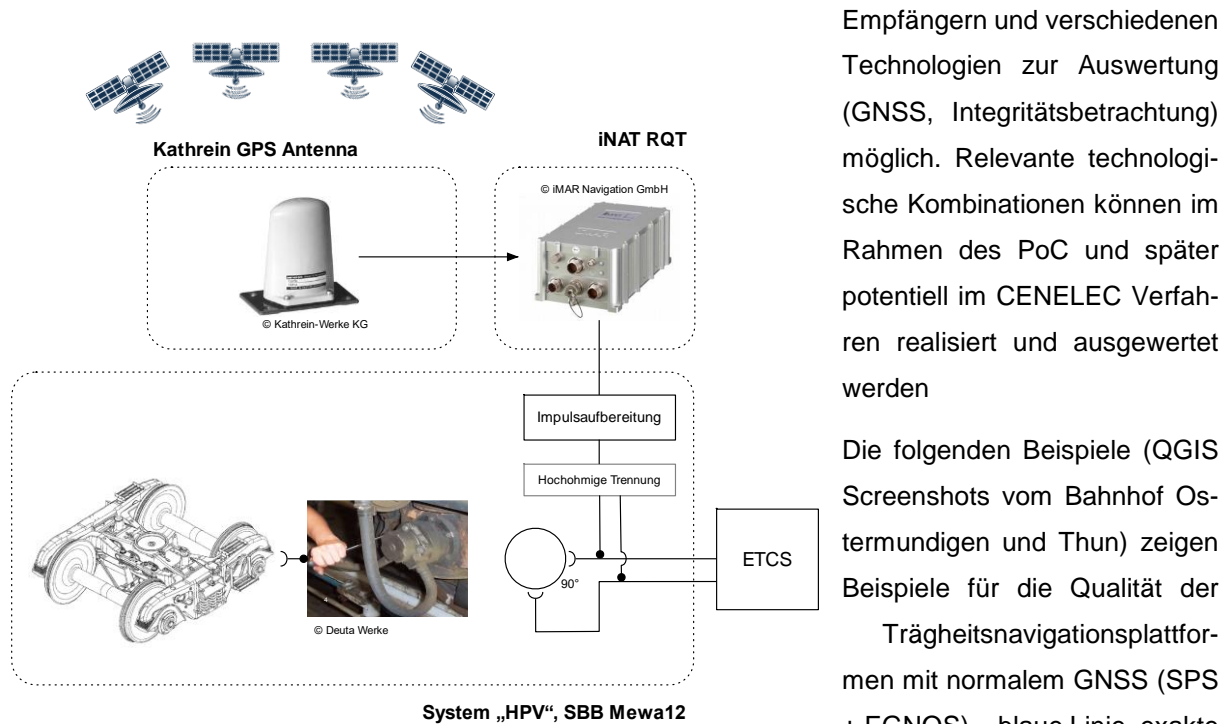
Die Grafik rechts zeigt den Aufbau der Trägheitsnavigationsplattformen im mewa12.

Das Blockdiagramm „PoC Experimental Data Processing“ zeigt in den Verarbeitungsschritten 5 bis 11 wie die Trägheitsnavigationsplattformen des mewa12 (INS Data im Blockdiagramm) in die Datenerfassung und -verarbeitung PoC eingebunden ist. Die Plattformen liefern in einem 7x24 (always on) Modus, wie auch alle GNSS Empfänger, permanent Daten zur Position und Lage (im Raum) des mewa12. Bei besonderen Messfahrten können die Trägheitsnavigationsplattformen in einen Rohdatenmodus geschaltet werden, um alle Daten, die für eine komplette nachträgliche Verarbeitung in einem «Sensorfusion Post-Processing» notwendig sind, aufzuzeichnen. Aufgrund der enormen Datenmengen

(Aufzeichnung mit 200 – 500 Hz) ist dieser Rohdatenmodus im normalen Betrieb (die Geräte sind parallel zu PoC im Telekom-Messbetrieb im Einsatz) weder praktikabel noch erwünscht.

Die Daten der Trägheitsnavigationsplattformen werden im Zuge der Verarbeitung in «BigData» über die Zeiten (GPS Woche und Sekunde) mit den anderen Daten (GNSS und Odometrie) in der Datenbank kombiniert (SQL Basis).

Durch diese Kombination ist eine Verschaltung der Trägheitsnavigationsplattformen mit den GNSS



Empfängern und verschiedenen Technologien zur Auswertung (GNSS, Integritätsbetrachtung) möglich. Relevante technologische Kombinationen können im Rahmen des PoC und später potentiell im CENELEC Verfahren realisiert und ausgewertet werden

Die folgenden Beispiele (QGIS Screenshots vom Bahnhof Ostermundigen und Thun) zeigen Beispiele für die Qualität der Trägheitsnavigationsplattformen mit normalem GNSS (SPS + EGNOS) = blaue Linie, exakte mittels GNSS PPK ermittelte Punkte (rot) und deren Kombi-

Abbildung 3-1: System "HPV" SBB mewa 12

nation mit der Trägheitsnavigationsplattformen mit normalem GNSS (SPS + EGNOS) zu einer exakten, gleiselektiven Trajektorie (orange Linie). Die grünen Linien stellen die Gleismitte dar.

Während die blauen Linien meist etwas versetzt zum Gleis dessen Verlauf exakt wiedergeben, liegen die PPK GNSS Punkte exakt auf der Gleismitte. Die Kombination ergibt die optimale Lösung, die neben der Gleiselektivität auch den exakten Verlauf über Weichen zeigt.



Abbildung 3-2: QGIS Screenshots vom Bahnhof Ostermündigen

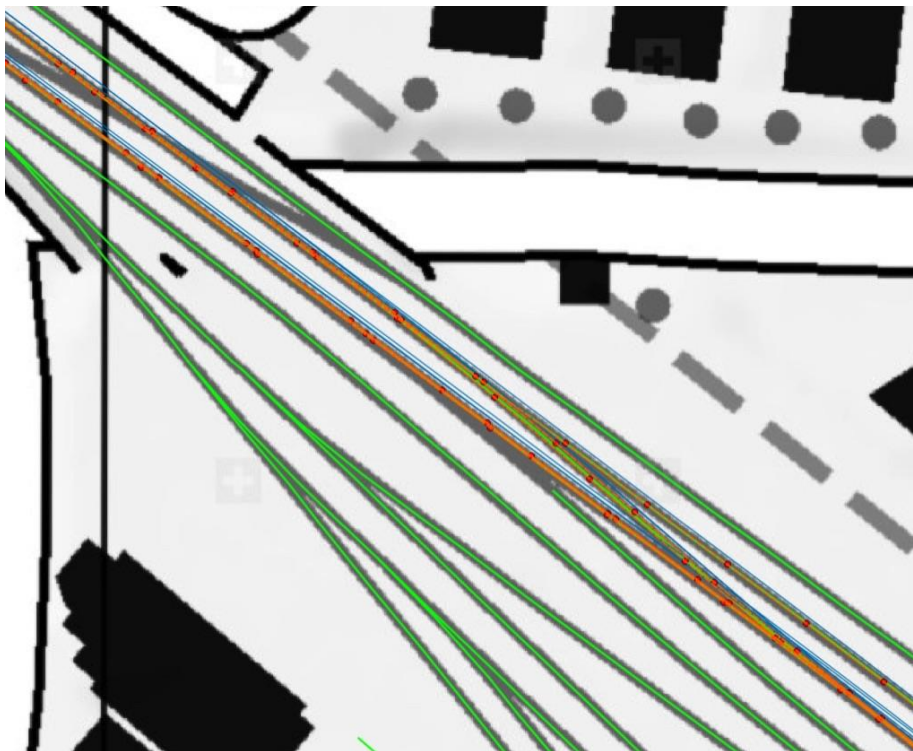


Abbildung 3-3 : QGIS Screenshots vom Bahnhof Thun

3.3 Erkenntnisse

3.3.1 Genauigkeit und Verfügbarkeit (mewa12)

Die absolute Grundgenauigkeit der Trägheitsnavigationsplattformen unter GNSS Empfangsbedingungen entspricht SPS, da keinerlei Referenz- oder Korrekturdaten (abgesehen von SBAS) zur Anwendung kommen. Die Verfügbarkeit der Positionen aus den Trägheitsnavigationsplattformen hingegen ist exzellent (~100%), was sich insbesondere bei langen Tunnels zeigt.

Wenngleich die technologisch bedingte Drift vorhanden ist, wurde die Leistungsfähigkeit der Trägheitsnavigation seitens des Herstellers in enger Zusammenarbeit mit SBB für den Bahnbetrieb optimiert (INS/GNSS/Odometer Data Fusion in Railway Applications, C.Reimer, E.L.v.Hinüber, iMAR Navigation GmbH). Dabei ist insbesondere die Aufhängung eines Schienenfahrzeugs als Drehgestell gegenüber einem starren Aufbau zu berücksichtigen. Das folgende Bild zeigt den Zusammenhang zwischen Fahrtrichtung über Grund (des Drehgestelles), der Bewegungsrichtung des Fahrzeug-Aufbaus und dem Kurvenradius.

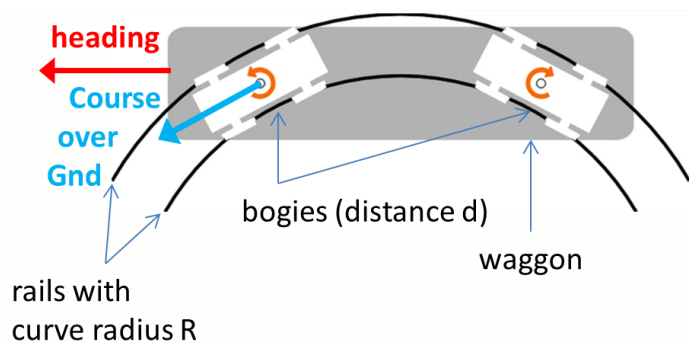


Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen Fahrtrichtung über Grund (des Drehgestelles), der Bewegungsrichtung des Fahrzeug-Aufbaus und dem Kurvenradius

3.3.2 Auswertung Rohdaten Trägheitsnavigationsplattformen

Im Zuge einer Messfahrt wurden die Trägheitsnavigationsplattformen in den Rohdatenmodus versetzt und die aufgezeichneten Daten nachträglich mit Hilfe von iMAR in einer eigens angepassten Sensorfusion verarbeitet. Die Fragestellung war, inwieweit eine IMU ohne Stützung von GNSS und Odometrie über die Zeit und Weg driftet. Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse bei einer Fahrt nach Luzern und durch den Gotthard Basistunnel mit und ohne Stützung der IMU mit Odometrie und unter Einsatz unterschiedlicher Sensorfusionstechniken («tightly coupled», «loosely coupled»).

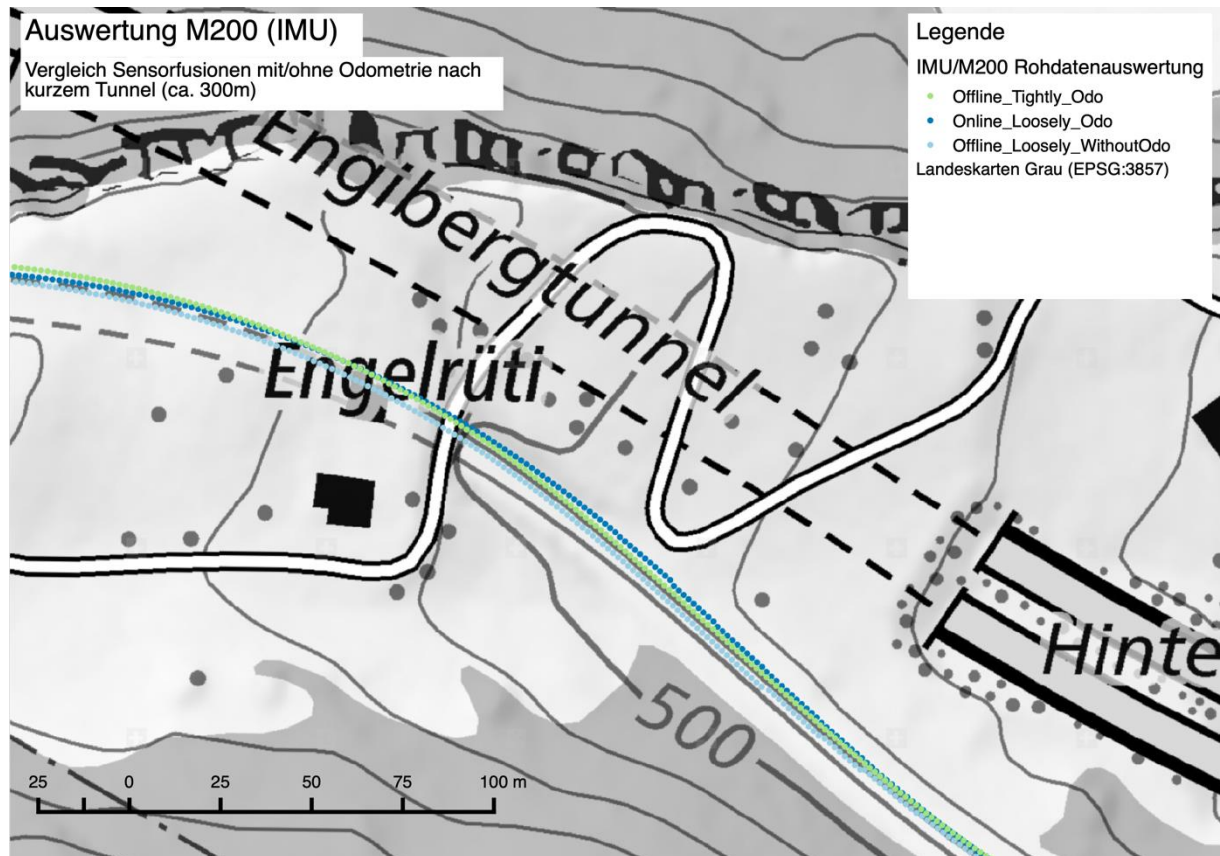


Abbildung 3-5: Tunnel mit 300 m Länge

Abbildung 3.5 zeigt die Lösungen nach einem kurzen Tunnel mit 300 m Länge. Alle Lösungen, auch die ohne Odometrie, haben nach dem Tunnel keinen größeren Fehler.

Abbildung 3.6 zeigt die Lösungen nach einem längeren Tunnel mit 1500 m Länge. Während die Lösungen mit Odometrie vergleichbar gute Genauigkeit aufweisen, ist die Lösung ohne Odometrie um gut 50 m fast ausschließlich längs zum Gleis fehlerhaft. Hier wirkt sich die fehlende Skalierung in der Geschwindigkeit unmittelbar auf die zurückgelegte Distanz aus.

Es zeigt sich, dass die Eliminierung der Odometrie zu einem großen Driften der Lösung führt und dies obwohl die Algorithmen der Sensorfusion weitestgehend auf die Anwendung «Schiene» optimiert wurden.

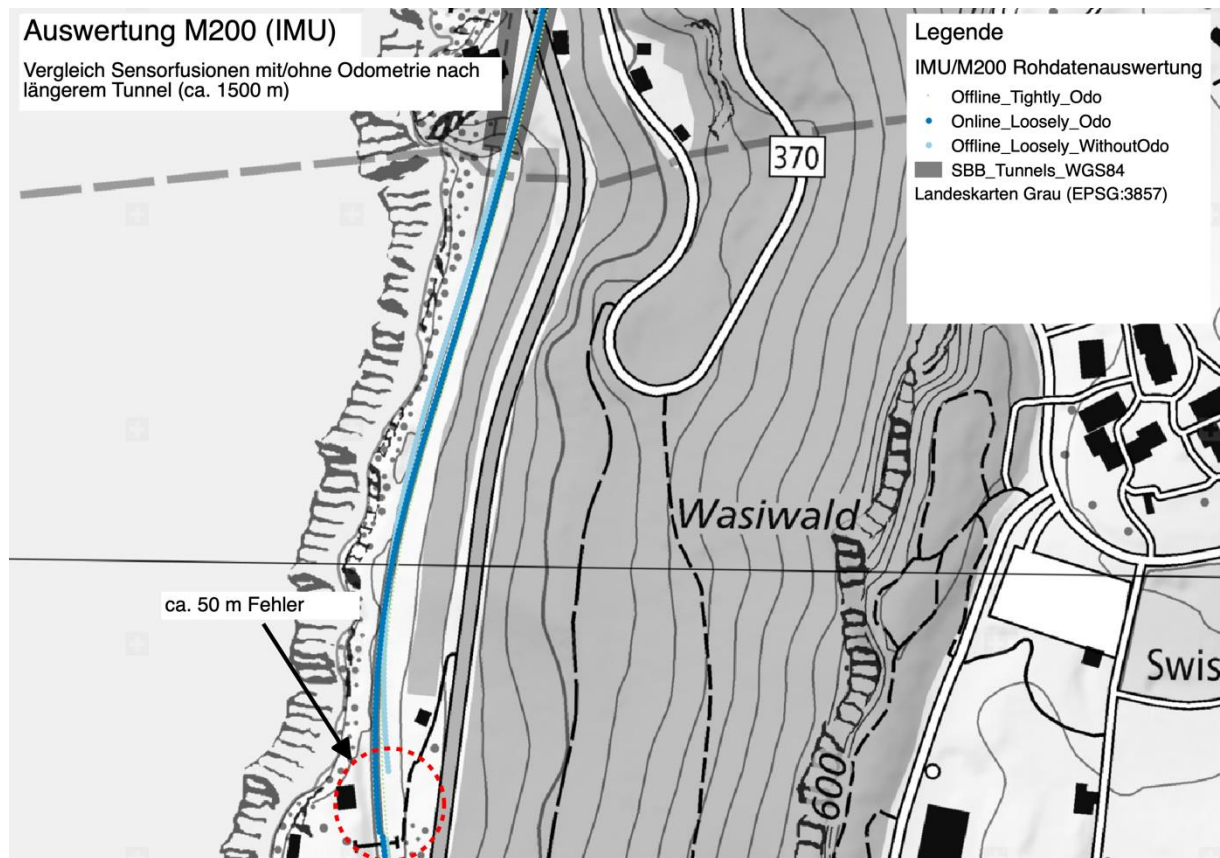


Abbildung 3-6: Tunnel mit 1500 m Länge

Bei einem langen Tunnel mit einer Länge von 5,6 Kilometern (Abb. 3.7) nimmt der Fehler rasch zu und führt in Fahrtrichtung gesehen aufgrund der Rechtskurve nach dem Tunnel zu einem starken Versatz nach links. Der Fehler beträgt nach 5,6 Kilometern Tunnelfahrt bereits ca. 180 Meter.

Die Lösungen mit Odometrie sind vergleichbar genau, ohne größeren Fehler nach dem Tunnel.

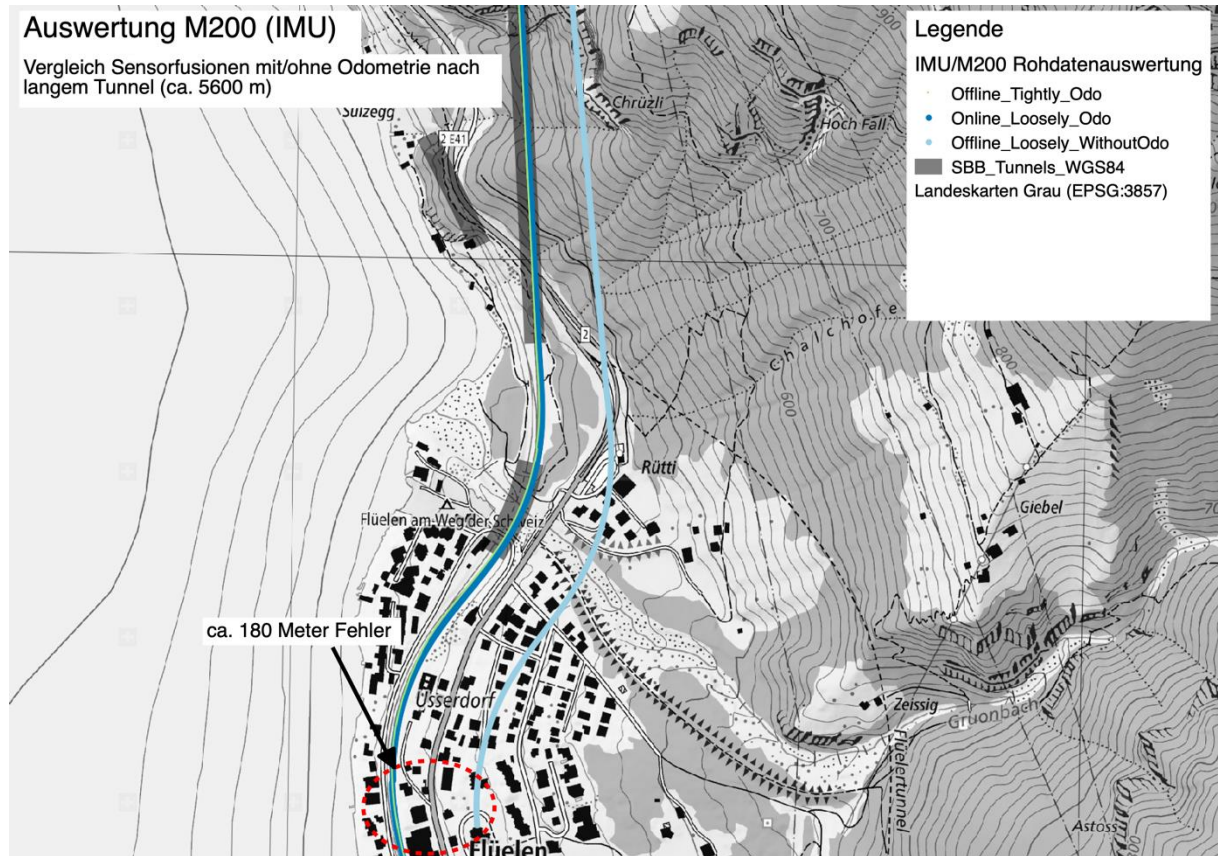


Abbildung 3-7: Tunnel mit 5600 m Länge

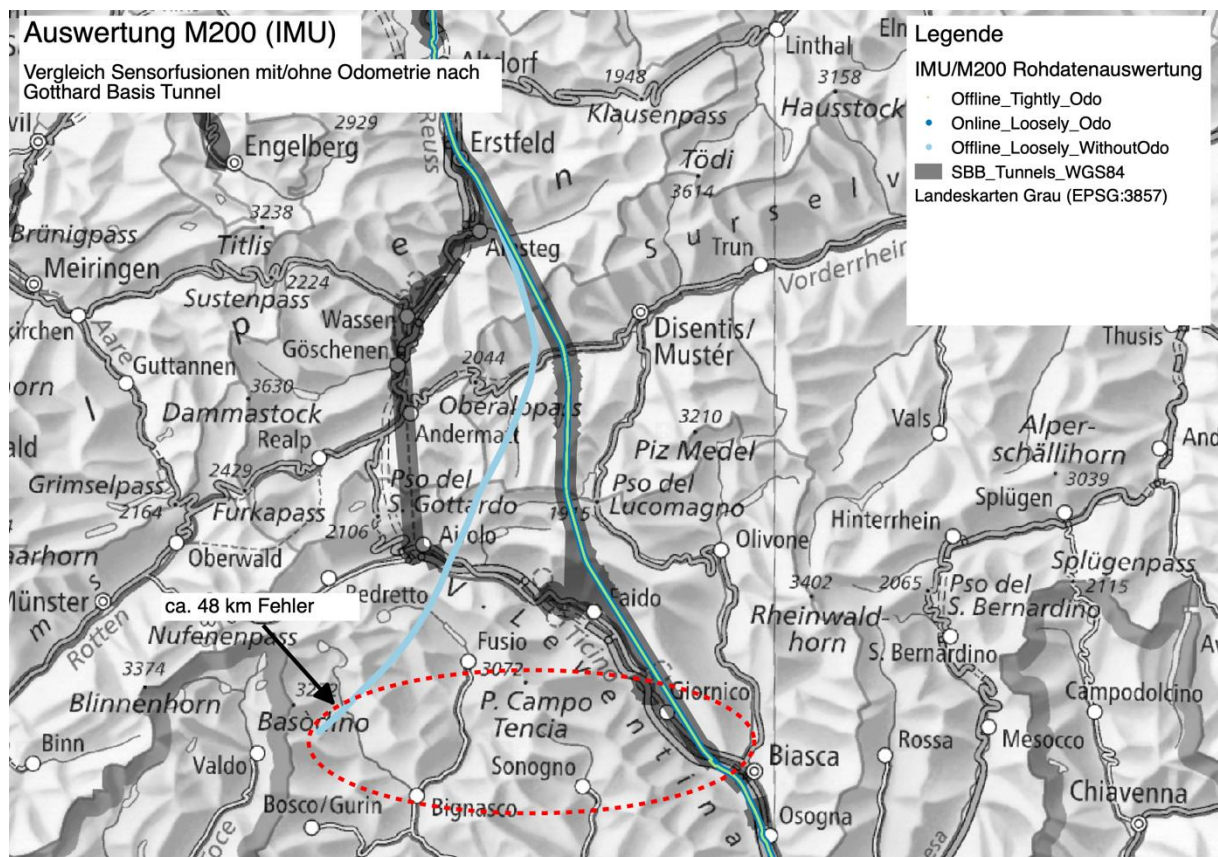


Abbildung 3-8: Abweichung nach Fahrt durch Gotthard Basistunnel.

Bei der Fahrt durch den Gotthard Basistunnel verliert die Lösung ohne Odometrie komplett die Richtung und der Fehler beträgt am Ende des Tunnels beinahe 50 Kilometer.

3.3.3 Überbrückung «virtueller» und physischer Tunnels (ohne GNSS)

Wie im Kapitel GNSS dargestellt, kann unter Einsatz des im Rahmen des PoC entwickelten Verfahrens zur Ermittlung und Eliminierung von Bereichen mit GNSS Störungen eine optimale Kombination aus den Eigenschaften GNSS und Trägheitsnavigation (mit Odometrie) geschaffen werden. Diese hat das technologische Potential effektiv Bereiche, in denen keine absolute GNSS basierte Lokalisierung möglich ist, zu überbrücken.

Die folgende Grafik zeigt ein typisches Beispiel eines GNSS integritätsbedingten «virtuellen» Tunnels. Durch die Integritätsbetrachtung (siehe vorne) werden Bereiche mit GNSS Störungen (unabhängig von deren Ursache) identifiziert, die damit verbunden GNSS Punkte zur Stützung der Trägheitsnavigation im Rahmen der Sensorfusion entfernt. Die integritätsbewehrten GNSS Punkte sind rot, die Trägheitsnavigationslösung (mit exakten GNSS Punkten als Stützung) blau und die Gleise grün dargestellt.



Abbildung 3-9: Beispiel eines GNSS integritätsbedingten «virtuellen» Tunnels

Der folgende, längere Ausschnitt zeigt die Kombination von integritätsbewehrtem GNSS mit Trägheitsnavigation und Odometrie anhand einer Kette physischer Tunnels entlang des Urnersees/Vierwaldstättersees. Jeweils am Anfang und Ende der Tunnelketten erreicht die Lokalisierung eine hohe Genauigkeit bei Wahrung der Integrität.



Abbildung 3-10 : Kombination von integritätsbewehrtem GNSS mit Trägheitsnavigation und Odometrie

3.4 Weiteres Vorgehen

3.4.1 Fortführen der Datenerfassung mit dem mewa12, wobei bei einzelnen Messfahrten das M200 des mewa12 im kontrollierten IMU Rohdaten Erfassungsmodus betrieben wird.

Bisweilen wurde die Trägheitsnavigationsplattformen nur während einer Fahrt in den Rohdatenmodus versetzt, weil die Rohdatenerfassung aufgrund der enormen Datenmengen Vorbereitung und Konfiguration vor Ort im Messwagen erfordert und geeignete «Teststrecken» d.h. mit Tunnelfahrten Planung hinsichtlich personeller und instrumenteller Ressourcen erfordert.

3.4.2 Automatisierte Verarbeitung großer Datenmengen mit Hinblick auf IMU Rohdaten für Sensorfusions-Varianten («loosely», «tightly», «deeply» coupled)

Die experimentelle Datenverarbeitung und auch die automatisierte Verarbeitung im Rahmen «Big Data» soll auf Auswerten von umfangreicheren Rohdaten inkl. Varianten für die Sensorfusion ertüchtigt werden.

4 Sensortechnologie: Rad Odometrie

4.1 Management Summary

Zur Messung der Geschwindigkeit des Fahrzeuges entlang des Gleises ist die Rad-Odometrie ein wichtiger Bestandteil bei der Lokalisierung.

Im Rahmen des PoC werden Daten der Rad-Odometrie des Telekommesswagens mewa12 (www.railcom.org) automatisiert aufgenommen und alleine und in Kombination mit anderen (Lokalisierungs-)Sensoren ausgewertet («PoC Experimental Data Processing»).

Der Hauptfokus im Rahmen des PoC ist die Modellierung und Verbesserung der Odometrie in Bezug auf Schlupf bei angetriebenen Achsen.

4.2 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Rad Odometrie ist im Bereich von ETCS ein Standardsensor zur Bestimmung der zurückgelegten Entfernung zwischen fixen Orten (Balisen). Dem Vorteil der technischen Simplizität und Zuverlässigkeit steht der Nachteil von Messfehlern, die durch systembedingten Schlupf zwischen Stahlrad und Stahlschiene entstehen, gegenüber.

Die Rad-Odometrie ist bei bodengebundener Trägheitsnavigation ein fixer und notwendiger Sensor zur Ermittlung der Geschwindigkeit. Ohne eine exakte Geschwindigkeit liefert selbst eine hochwertige Trägheitsnavigationsplattform keine brauchbaren Ergebnisse.

Im Rahmen des PoC wird umfangreiche Empirie zur Rad-Odometrie mit Hilfe der mewa12 und mit den Sensoren GNSS und IMU in verschiedenen Varianten einer Sensorfusion kombiniert. Das Ziel ist dabei, die Möglichkeiten und Limitationen der Rad Odometrie, insbesondere für einen Train Transponder und Train End Transponder, hinreichend zu erfassen und den CENELEC Prozess mit «know how» zu unterstützen. Es gilt durch die Kombination von GNSS und IMU die systembedingten Fehler durch Schlupf zu minimieren und den Vorteil der technischen Simplizität und Zuverlässigkeit bestmöglich zu nutzen.

Die Rad-Odometrie Daten werden als Roh-Daten, d.h. Geschwindigkeiten ermittelt über Radimpulse und Impulsfaktor, über die Trägheitsnavigationsplattformen aufgezeichnet. Da der Messwagen keinerlei Traktion besitzt und damit die Räder in Bezug zur Schiene weitestgehend schlupffrei drehen sind die Rad-Odometrie Daten des mewa12 sehr exakt. Während Kalibrierfahrten wurde ein Fehler(-faktor) im Bereich von 0.0002 ermittelt (d.h. auf eine Fahrt von 2 Minuten bei 30 Meter/Sekunde wird die zurückgelegte Distanz mit einem Fehler von 0,72 Meter ermittelt).

Bei Fahrzeugen mit angetriebenen Achsen (Traktion) führt der systembedingte Schlupf zu einem deutlich höheren Fehler von etwa 0.02 (d.h. auf eine Fahrt von 2 Minuten bei 30 Meter/Sekunde wird die zurückgelegte Distanz mit einem Fehler von 72 Meter ermittelt). Für den Einsatz in Kombination mit GNSS und Trägheitsnavigationsplattformen zur sicheren Lokalisierung ist diese Messung zu ungenau.

Wissenschaftliche Arbeiten der letzten Jahre weisen darauf hin, dass sich durch Koppelung mehrerer Radimplus-Sensoren mit einer leistungsstarken Trägheitsnavigationsplattform (und GNSS) der Fehler der Odometrie ausgehend von den oben erwähnten 0.02 um gut eine Größenordnung auf 0.002 verbessern lässt. Das würde den Beispielen von oben folgend bedeuten, dass bei Fahrzeugen mit Traktion auf eine Fahrt von 2 Minuten bei 30 Meter/Sekunde die zurückgelegte Distanz mit einem Fehler von 7,2 Meter ermittelt werden kann. In Anbetracht der Anforderungen in Bezug auf die «Use Cases» bei smartrail 4.0 wäre das eine notwendige Größenordnung für die Genauigkeit einer Geschwindigkeitsermittlung.

4.3 Erkenntnisse und weiteres Vorgehen

Die Odometrie Technologie ist zur Ermittlung der Geschwindigkeit ein unverzichtbarer Bestandteil der Lokalisierung für smartrail 4.0.

Während die Odometrie bei Fahrzeugen ohne Traktion a priori sehr gute Ergebnisse liefert, die durch den Einsatz von GNSS und Trägheitsnavigation zu einer genauen, sicheren Geschwindigkeitsermittlung führt, ist die Odometrie bei Fahrzeugen mit Traktion ein derzeit noch nicht befriedigend gelöstes Problem.

Hier gilt es im Rahmen von PoC unter Einsatz von GNSS und Trägheitsnavigation aufbauend auf dem Stand der Technik und wissenschaftlichen Vorarbeiten mögliche Technologien/Algorithmen zu evaluieren, um die Möglichkeiten einer deutlich verbesserten Odometrie auszuloten und empirisch zu evaluieren.

Die Odometrie ist neben der Trägheitsnavigation ein unverzichtbarer Sensor für die Umsetzung von GLAT:

- Zum einen ist der Sensor zwar stärker von Umwelteinflüssen beeinflusst als die Trägheitsnavigation aber trotzdem weit weniger anfällig auf externe Störquellen wie etwa GNSS z.B. Jamming, Spoofing,
- Zum anderen ist er bereits heute im Bereich ETRMS/ETCS eine wesentliche Komponente, deren Beibehaltung den Zulassungsprozess von z.B. GNSS und Trägheitsnavigation vereinfachen kann.

5 Sensortechnologie: Visuelle Odometrie

5.1 Management Summary

- Im PoC wurde am 27.9.2018 die Visuelle Odometrie auf der Strecke Thun/Burgdorf analysiert
- Mittels auf beiden Seiten (Lokomotive und Führerstand des Steuerwagens) installierten Stereo Kameras wurde versucht die Geschwindigkeit und den daraus abgeleiteten Weg zu erfassen.
- Bilder wurden bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen, Abschattungssituationen durch parallel fahrende Züge und Geschwindigkeitsprofilen von Kriechfahrt bis höheren Geschwindigkeiten aufgenommen und analysiert.
- Basierend auf den IMU/GNSS Daten des Messwagens kann bei der relativen Lokalisierung eine inkrementelle Bild-zu-Bild Genauigkeit von aktuell 5 mm erreicht werden, die durch weitere Verfeinerung der Translationsdetektion weiter gesteigert werden kann (erwartet ~ 0.8mm).
- Die ersten Resultate können durch folgende Massnahmen verbessert werden:
 - Optimierung Kamerainstallation, Kamerasystem, Kameraregelung und Bildverarbeitung
- In weiteren Messfahrten (idealerweise auch im Dauerbetrieb) soll die visuelle Odometrie weiter analysiert und verbessert werden.
- Es ist zu definieren, in welcher Art die in der Bahnanwendung noch nicht ausgereifte aber sehr zukunftsorientierte visuelle Odometrie weiterverfolgt werden soll.

- Visuelle Odometrie bietet das Potenzial für eine **schlupffreie Odometrie**, d.h. die Ermittlung der zurückgelegten relativen Trajektorie mit sehr kleiner Latenzzeit (Verzögerung) in allen 6 Freiheitsgeraden (3 translatorische und 3 rotatorische Parameter) – basierend auf Umgebungsmerkmalen, die natürlich im Umfeld des Gleisbettes auftreten. Im Gegensatz dazu kann die Rad-Odometrie von angetriebenen Achsen zu falschen Ergebnissen führen, wenn die Achsen ohnehin und teilweise sogar absichtlich mit Schlupf gefahren werden.
- Ein wesentlicher Vorteil der visuellen Odometrie ist die passive Messmethode, die explizit aus der Projektionsgeometrie abgeleitet wird und somit **verifizierbare und wiederholbare Ergebnisse** liefert und gleichzeitig eine **Aussage über das aktuelle Qualitätsmaß der Messung** erlaubt.
- Während der Messfahrt am 27.9.2018 wurden mit jeweils einer Stereo-Kamera auf der Lok und einer auf dem Steuerwagen insgesamt mehr als 3 TByte an Stereo-Bildern mit 60 Hz und 720p Auflösung aufgenommen. Dabei wurden unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse, Abschattungssituationen durch parallel fahrende Züge und Geschwindigkeitsprofile von Kriechfahrt bis höheren Geschwindigkeiten getestet.

- In der Auswertung wurden 2 Industrie-/Serientaugliche Forschungsansätze zur Ermittlung der relativen Position verwendet: Optischer Fluss von Merkmalen im Bild und optischer Mausansatz, bei dem die Verwechslungsgefahr von wiederkehrenden Mustern im Gleisbett durch großflächiges Template-Matching in transformierter Top-View Ansicht auf ein bisher nicht aufgetretenes Minimum reduziert wurde. Beide Ansätze wurden für beide Fahrtrichtungen untersucht.
- Beide Ansätze können **in Echtzeit** berechnet werden (Berechnung auf der GPU oder Implementierung auf einem FPGA).
- Basierend auf den IMU/GNSS Daten des Messwagens kann bei der relativen Lokalisierung eine **inkrementelle Genauigkeit von aktuell 5 mm** erreicht werden, die durch weitere Verfeinerung der Translationsdetektion weiter gesteigert werden kann (erwartet ~ 0.8mm).
- Nach dem aktuellen Stand kann das System einen mit der gefahrenen Strecke sich aufakkumulierenden Fehler aufweisen, der systembedingt ist und durch das Fehlen global gesehener Merkmale (entsprechend der GPS Satelliten) verursacht wird. Es ist angedacht, die so entstehende Drift durch **absolute und exakte Lokalisierung** von z.B. Weichen mittels digitaler Karte oder durch künstliche Erkennungstafeln (z.B. April Tags) zu kompensieren.
- Die Robustheit muss in weiteren Messfahrten bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen nachgewiesen werden – speziell interessant für die Kamera, die nach hinten sieht. Die ausgewertete Messfahrt fand bei sonnigem Wetter statt – jedoch mit Gegenlicht.
- Aufgrund der ersten Ergebnisse können die Anforderungen an die Kamera(s) für ein System der visuellen Odometrie abgeleitet werden, ebenso die Ausrichtung und Anbringung der Kamera. Ziel der bisher eingesetzten prototypisch installierten Kamera war es, möglichst viele Ansätze und Anwendungen anwenden und testen zu können.
- Das System ist jedoch so modular aufgebaut, dass lediglich die Kamera getauscht werden kann.
- **Gleisselektivität** ist bei Extraktion der Gleise jederzeit möglich, wurde aber in dieser Phase nicht betrachtet und ist eine Aufgabe in der nächsten Projektphase. Hier ist die hohe Genauigkeit der inkrementellen Lokalisation von essenziellem Vorteil, da bereits in dem bestehenden Bildmaterial jegliche Gleiswechsel deutlich sichtbar sind.

5.2 Zielsetzung

- Ermittlung des Potenzials der erreichbaren Genauigkeit und Zuverlässigkeit im Bereich visuelle Odometrie und Video Lokalisierung im bahnspezifischen Kontext
- Ermittlung der zurückgelegten relativen Trajektorie und der Geschwindigkeit für die durchgeführten Messfahrten rein aus den Videodaten
- Bestimmung von QoS (Quality of Service) abhängig von der Umgebungsstruktur
- Automatische Bild-/Beleuchtungsadaption, um optimalen Kontrast zu gewährleisten
- Adaptive Auswahl von Referenzgebern (Mouse/April Tags/Stereo) und Navigation. Die Zuverlässigkeit der Alternativen ergibt sich aus der Eindeutigkeit der Muster in der lokalen Umgebung und dem Sichtwinkel nach Berücksichtigung der Verdeckung durch andere Züge. Die Verfahren nutzen komplementär den Nah - oder Fernbereich zur Navigation aus, um Robustheit zu erhöhen.

- Vergleich mit Ground Truth: GNSS/IMU Lösung des Messwagens
- Anpassung der Algorithmen auf Bahnszenerie, wie Gleise, Schwellen und Schotter.

5.3 Ausgangslage

- Der aktuelle Stand der Technik der visuellen Odometrie ist in der Tabelle unter http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_odometry.php zu sehen und wird vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) anhand des Referenzdatensatzes KITTI ermittelt und aktuell gehalten. Die in der Tabelle enthaltenen Ansätze basieren weitgehend auf einer nachträglichen Bestimmung von Bundle Adjustment, was zum Loggen der Gesamtstrecke geeignet ist, aber eine längere Sichtbarkeit der Merkmale als es in dem Bahnszenario oft möglich ist erfordert. Es werden auch Deep Learning und Optimierungs -basierte Ansätze benutzt, die nicht verifizierbar sind und in den meisten Fällen von weitgehend statischen Szenen ausgehen. In der Bahn -Domäne trifft diese Annahme sehr häufig nicht zu.
- Stereo-Aufnahmen im Rahmen der Messfahrt mit 720p Auflösung und einer Framerate von 60 Hz (siehe Bild «Kamera_Setup» in Kapitel 6.3)
- Zwei unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der Trajektorie:
 1. Stereo-Matching mit Mono Tracking bestehend aus (siehe Video «flowtrain2013»)
 - a. Stereo-basierter Bestimmung der metrischen Referenz (Massstab) für den monokularen Tracking-Ansatz. Es werden dabei in beiden Bildern SURF-Merkmale extrahiert und versucht, Korrespondenzen in beiden Bildern zu finden. Daraus können dann 3D-Koordinaten ermittelt werden und man erhält somit einen Massstab im Bild
 - b. Filterung von Fehlkorrespondenzen: Aufgrund ähnlicher sich wiederholender Szenerie (Schotter, Schwellen, etc.) können Fehlkorrespondenzen entstehen. Diese können in verschiedenen Schritten detektiert und entfernt werden:
 - i. Aus der Stereobildgeometrie: Der optische Fluss eines rektifizierten Stereobildpaares kann nur horizontal sein kann.
 - ii. Aus den Bewegungsdaten mittels Epipolargeometrie: Der optische Fluss von Bildfolgen muss sich für die Eigenbewegung im Epipolarpunkt schneiden.
 - iii. Aus vergleichenden Rekonstruktionen aus unterschiedlichen Bildpaaren (falsche Korrespondenzen ergeben stark variierende 3D Rekonstruktionen und Massstäbe)
 2. Optischer Mausansatz bestehend aus (siehe Video «mouse_shadow2013») vollkommen monokularem Ansatz mit einer Kamera
 - a. Entzerrung eines Bereiches im Sichtfeld des eigenen Gleises bis 30m derart, dass es zu einem Topview-Bild wird (als ob die Kamera darüber schweben würde)
 - b. Korrelationsbasierte Ermittlung des Matches für Templates aus Bildern der Bildsequenz für grobe Ermittlung der Bildverschiebung – pixelgenau
 - c. Gradientenbasierter Abgleich der Lage der Templates für Subpixel-Genauigkeit.
 - d. Bestimmung des Massstabs anhand der Spurweite (siehe Bild «mouse_view», Abb. 5.1)
 - e. Schätzung des Kurvenverlaufes aus den Ein-/Austrittspunkten der im Template detektierten Schienen
 - f. Theoretische Genauigkeit $ds=px \cdot H/f$ (ds -Strecke die einem Pixel entspricht, f – Brennweite der Kamera, H -Montagehöhe der Kamera über dem Gleis, px -

Pixelgröße). Mit 1/8 Subpixelgenauigkeit würden sich mit der verwendeten Kamera 5.7mm ergeben. Es ist kein kumulativer Wert, da es nur eine Messreferenz (zur Zeit) liefern soll.

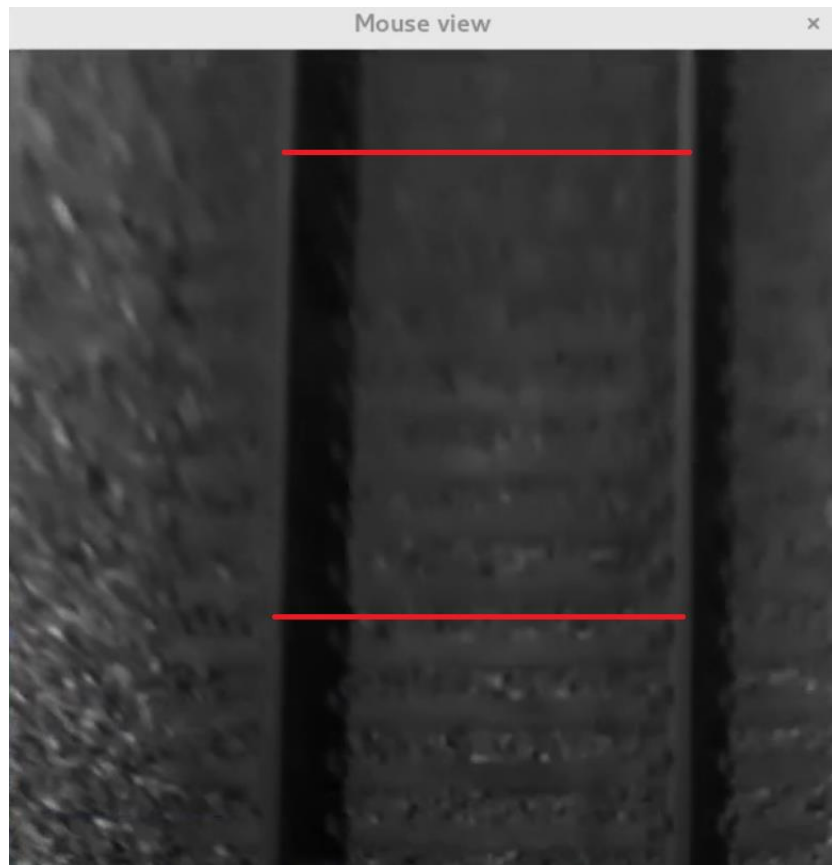


Abbildung 5-1: Mouse View

5.4 Erkenntnisse

5.4.1 Fehlkorrespondenzen bei Stereo

Stereo-Fehlkorrespondenzen lassen sich aus 3 Größen ermitteln:

- Nicht übereinstimmende Stereobild-Geometrie für rektifizierte Bildpaare. (Siehe Bilder «stereobild_mismatch», «stereobild_mismatch_filtered», Abb.5-2 und 5-3)

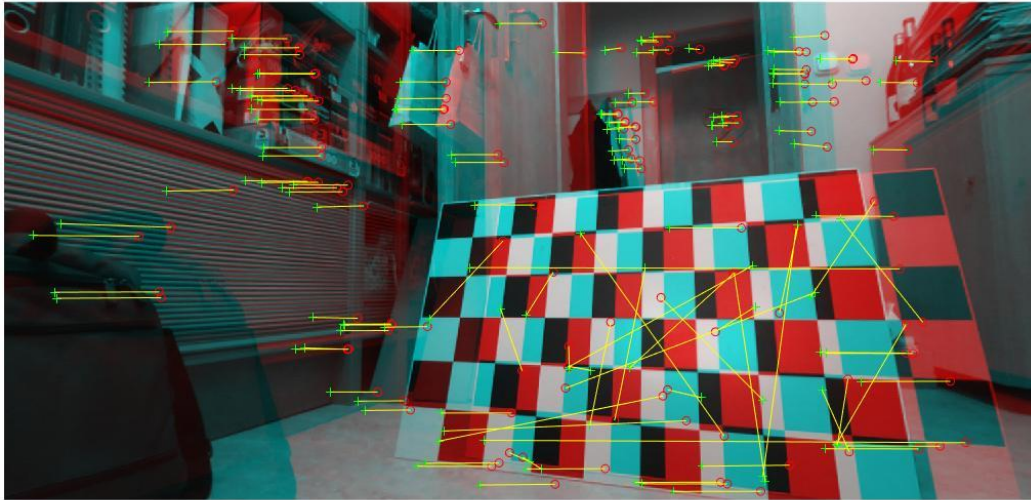


Abbildung 5-2: stereo bild mismatch

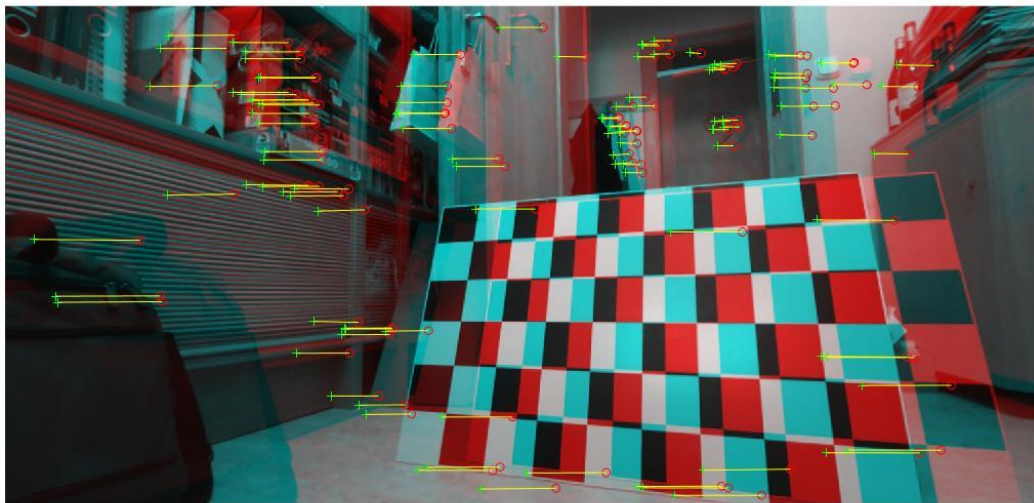


Abbildung 5-3: stereo bild mismatch filtered

- Nicht übereinstimmende Epipolar-Geometrie bei Bildfolgen (Siehe Bild «epipolar_geometry_mismatch», «epipolar_geometry_mismatch_filtered», Abb. 5-4 und 5-5)

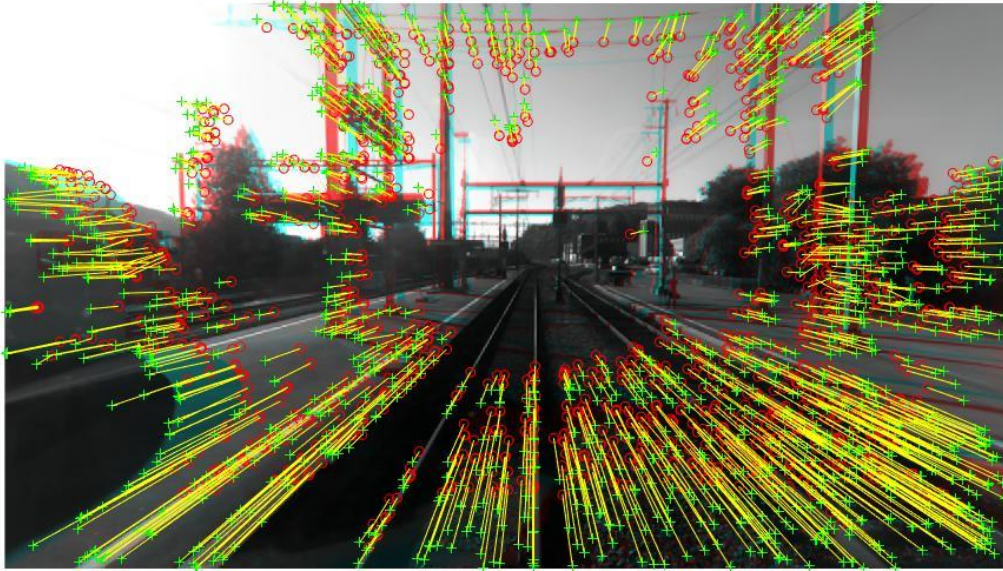


Abbildung 5-4: epipolar_geometry_mismatch



Abbildung 5-5: epipolar_geometry_mismatch_filtered

- Falsche Prädiktion ihrer Bild-Lage nach der Projektion aus ermittelten Größen der aktuellen Bewegungsparameter $R;T$ mit R als Rotationsmatrix und T als Translationsvektor.

Das Kiesbett bietet viele lokal ähnelnde Bildbereiche, die zu falschen Korrespondenzen führen können. Untersuchte Lösungsansätze sind:

- Ermittlung aktueller Bewegungsparameter im Kalman-Filter und Prädiktion der Lage aller Merkmale in das aktuelle Bild. Damit kann das Suchfenster des Trackers nur noch auf einen kleinen lokalen Bereich eingeschränkt werden, der die möglichen Beschleunigungen und Fehler kompensiert.
- Flächenmäßiger Match des Bodenbereiches (optische Maus), um eine Eindeutigkeit zu erreichen. Die Maus dient auch zur Vorwärts-Projektion des oben genannten Mono-Trackings und Massstab-Ermittlung.

5.4.2 Fehlkorrespondenzen bei Tracking

Vorwärtsprojektion führt zu Verringerung des Suchbereiches des Trackers und optische Maus. Damit wird die Verwechslungsgefahr bei starker periodischer Bildähnlichkeit vermieden.

5.4.3 Echtzeitfähigkeit

Das System erreicht im aktuellen Stand mit CUDA (Verarbeitung auf der GPU) Echtzeitfähigkeit bei 60 Hz und 720p. Die Algorithmen sind auch für eine FPGA-Verarbeitung geeignet.

Aufgrund der existierenden CUDA Implementierung wurden für den Echtzeitbetrieb SURF-Features gewählt. Die Zykluszeit beträgt bei 8000 Features 15-27ms, kann aber bei Limitierung der Anzahl der Features – es werden keine 8000 in diesem Szenario benötigt - auch auf 10ms reduziert werden.

5.4.4 Genauigkeit

Die Genauigkeit muss in 2 Bereiche unterteilt werden

- Genauigkeit der relativen Bewegung zwischen 2 Bildern. Hier spielt die Detektionsgenauigkeit eine Rolle; subpixel-genau – das Beste, was man erreichen kann. Wie weiter unten zu sehen ergeben sich Abweichungen von <2 km/h, die im Laufe der Zeit aufgrund der vorhandenen Drift und nicht synchronisierter Zeit auf 10 km/h anwachsen.
- Genauigkeit der 3D Referenzen, die die metrische Genauigkeit der Schritte beeinflusst und einen Offset-Aufbau bei Neumessungen der Referenzmerkmale verursachen kann. Schwankung der Skalierungsberechnung bei schlechten «Features» führt zu einer geringeren Genauigkeit.

Vergleich der Trajektorien und der Geschwindigkeit mit der Ground Truth vom Messwagen für die einzelnen Fahrtstrecken:

- Thun -> Ostermundigen: Kamera im Steuerwagen mit Blick nach vorne:

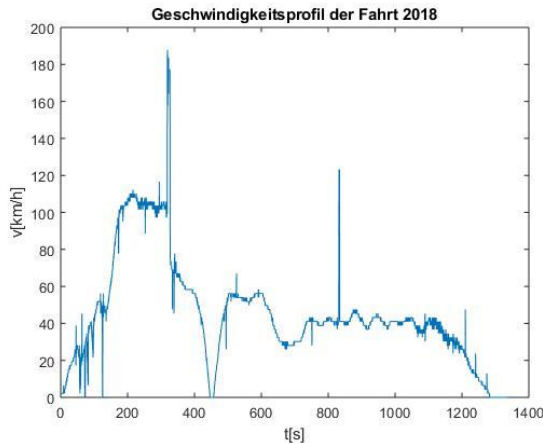


Abbildung 5-6: Geschwindigkeitsprofi der Fahrt 2018

Am Anfang gibt es hier Probleme mit Schattenwurf, dies kann mittels Beleuchtung oder Kameraregelung abgestellt werden. Die Peaks bei der Geschwindigkeit waren direkte Sonneneinstrahlung in die Kamera. Dies kann z. B. mittels Kalmanfilter behoben werden.

Referenz vom Messwagen liegt für diese Fahrt nicht vor.

- Thun -> Burgdorf: Kamera im Steuerwagen mit Blick nach vorne (Fahrt 2015):

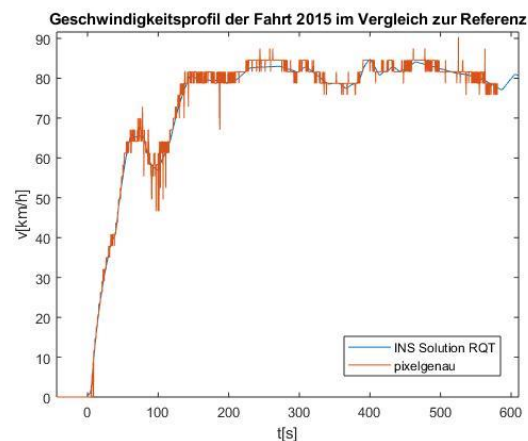


Abbildung 5-7: Geschwindigkeitsprofi der Fahrt 2015 im Vergleich zur Referenz

Es wird mit der pixelgenauen Lösung eine Geschwindigkeitsabweichung von < 3km/h gegenüber der GNSS/IMU Lösung des Messwagens erreicht. Mit der noch zu integrierenden subpixelgenauen Lösung wird eine Verbesserung auf ein Achtel erwartet, da dann die Quantisierungseffekte kleiner werden,

Mit der pixelgenauen Lösung ergibt sich eine Abweichung der Trajektorie gegenüber dem Messwagen für die ersten 4km von < 20m. Danach macht sich die Drift durch schwierige Lichtverhältnisse – speziell bei der Rotation – stark bemerkbar.

Dies kann durch eine aktive Ausleuchtung oder durch eine Kameraregelung kompensiert werden. Eine deutliche Verbesserung wird hier ebenfalls mit der subpixelgenauen Lösung erwartet, so dass die Abweichung und die Drift noch weiter reduziert werden können.

- Thun -> Zollikofen: Kamera im Steuerwagen mit Blick nach vorne (Fahrt 2013)

Ergebnisse der ermittelten Geschwindigkeit der beiden subpixelgenauen Verfahren mit der pixelgenauen Variante zu der Referenz des Messwagens (siehe Plot «velocity2013» und «velocity2013_zoom»).

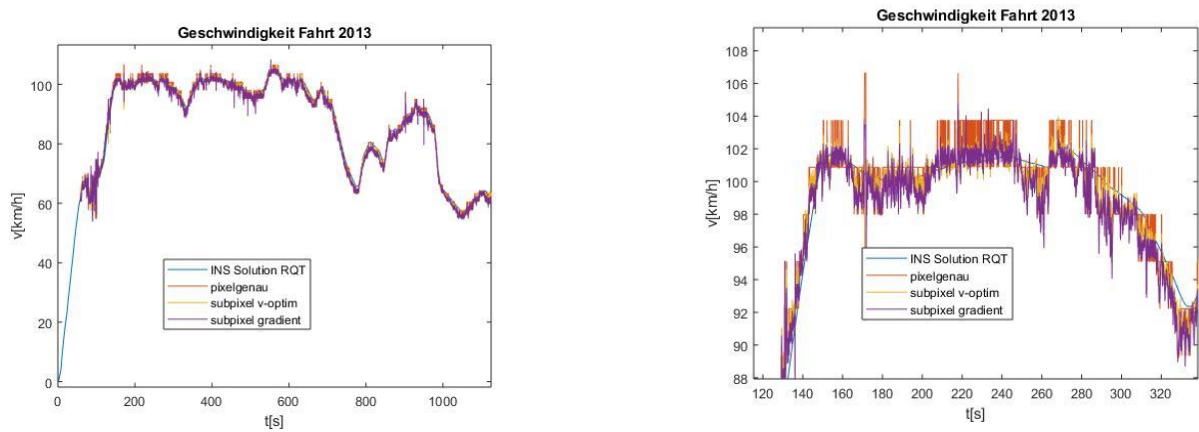


Abbildung 5-8: velocity2013 (links) und velocity2013 zoom

Es ist eine deutliche Verbesserung der Geschwindigkeitsermittlung mit den subpixelgenauen Verfahren zu sehen. Die Spitzen ergeben sich, da es sich um ungefilterte Rohdaten handelt. Es ist eine Abweichung < 3km/h zu erwarten, bei den subpixelgenauen Verfahren sieht man die Verbesserung auf < 2km/h. Eine weitere Verkleinerung der Abweichungen würde sich bei Filterung der Roh-Geschwindigkeitsdaten – z.B. mit einem Kalmanfilter – ergeben (siehe Abb. 5-9).

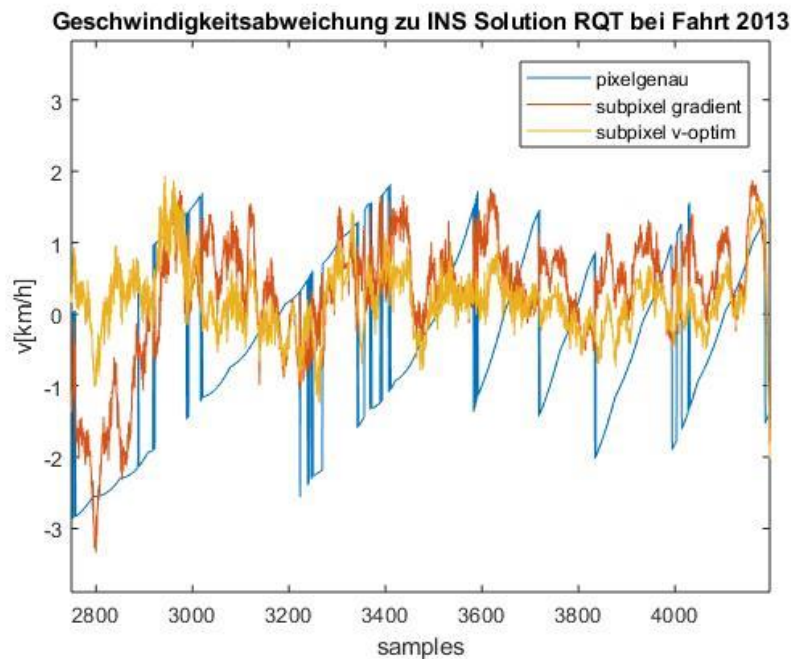


Abbildung 5-9: velocity_diff 2013

Die visuelle Odometrie liefert als Ergebnis eine 3D Trajektorie (siehe Plot «path3D_2013», Abb. 5-10). Ein Vergleich zur 2D Trajektorie der Referenz des Messwagens gestaltet sich daher schwer, da die Rotationsmatrix zwischen beiden Koordinatensystemen gefunden werden muss und diese abhängig ist von der Einbauanordnung der Kamera. In Plot «path2D_2013_comp» (Abb. 5-11) sind die Abweichungen der Referenz von der Trajektorie der visuellen Odometrie für die ersten ca. 3000m zu sehen, da hier die 3. Koordinate nur einen geringen Einfluss aufweist. Es ergeben sich hier Abweichungen von < 5-10m. Es sind jedoch noch genauere Auswertungen (Bestimmung der Rotationsmatrix) auch der anderen Fahrten notwendig, um belastbar die genauen Abweichungen zu ermitteln.

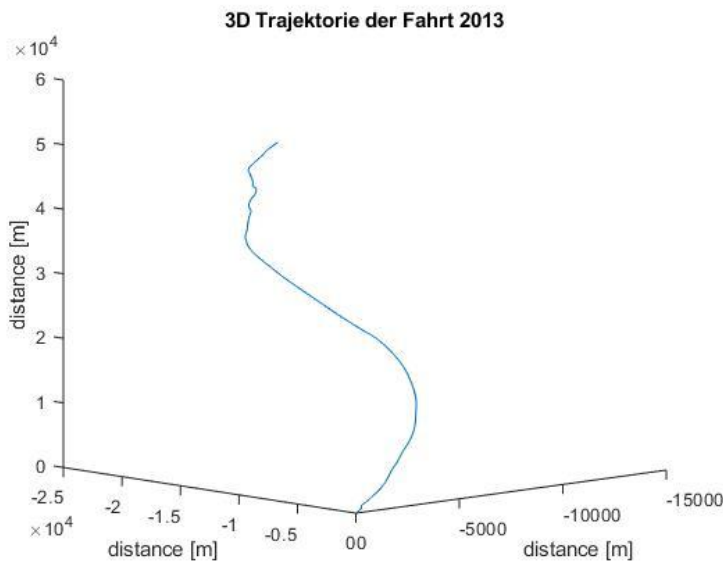


Abbildung 5-10: path3D_2013

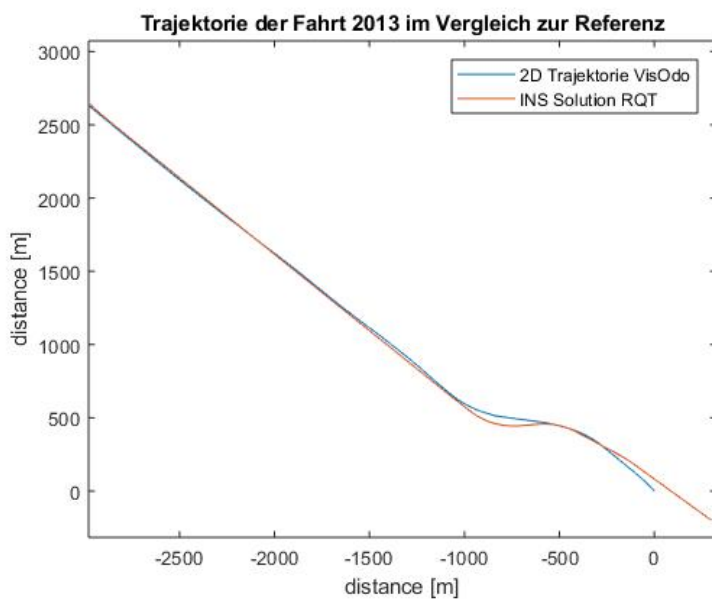


Abbildung 5-11: path2D_2013comp

5.4.5 Kopplung beider Verfahren

Kopplung erfolgt am besten wie folgt:

- Optische Maus ermittelt den metrischen Massstab und die Vorhersage der Bewegung
- Das wird zur Vorwärtsprädiktion der Merkmale im Navigationsalgorithmus benutzt, um die Suchbereiche für den Tracker auf ein Minimum einzuschränken und damit Fehlkorrespondenzen zu minimieren.
- Die Optische Maus ist auch als Alternativansatz zur Ermittlung von QoS gedacht.

5.5 Offene Punkte

5.5.1 Robustheit

- Belastbare Aussagen der Robustheit für verschiedenen Szenarien (auch aus der Messfahrt) müssen noch belegt werden. Darunter fallen die Einflüsse von:
 - Gegenlicht und Schatten
 - Dunkelheit (z. B in Tunnels),
 - »komische« Landschaft, wie z.B. Schallschutzwände
 - Zugbegegnungen und Zugüberholungen

5.5.2 Einflussfaktoren

- Nicken (Bremsen und Beschleunigen) sowie Neigen (z. B. Neigetechnikzug) der Kamera. Dies kann kompensiert werden über den Mausansatz, da hierbei die Verzerrung des Gleises bei konstanter Spurbreite bestimmt werden kann.
- Weitere Einflussfaktoren und Abhilfen können bei der vollständigen Auswertung der Messfahrt und bei weiteren Messfahrten noch identifiziert werden. Hier spielen im Wesentlichen die Wetterbedingungen eine Rolle, wie z. B.:
 - Regen, Schnee
 - Verwirbelungen bei der nach hinten schauenden Kamera
 - Etc.

5.6 Gesamtbewertung

Die erste Messfahrt hat die Eignung der Visuellen Odometrie für eine schnelle, kostengünstige Bestimmung der Bewegungsparameter des Zuges in beiden Richtungen bestätigt. In der jetzigen Phase wurden keine Probleme mit dem Geschwindigkeitsbereich der Erfassung festgestellt. Die Algorithmen sind anscheinend in der Lage, auch noch höhere Geschwindigkeiten zu erfassen. Sowohl die Framerate der Kamera wie auch der betrachtete Bildausschnitt erlaubt es, die Merkmale zwischen den Bildern zu identifizieren. Hier muss aber beachtet werden, dass es bei hohen Geschwindigkeiten bei schlechteren Lichtverhältnissen zu Bewegungsunschärfe im Bild kommen kann. Daher wird eine Zusatzbeleuchtung mit einem (IR-)Scheinwerfer empfohlen, der den Gleis-Bereich vor dem Zug ausleuchten sollte.

Unser Ansatz zur visuellen Odometrie zeigt ein sehr hohes Potenzial hinsichtlich erreichbarer Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Allerdings stellt die visuelle Odometrie nur einen inkrementellen Sensor dar, der absolute Sensoren wie GNSS stützen kann. Eine weitere Alternative mit viel Potenzial wäre die

Kopplung der visuellen Odometrie mit der digitalen Karte. Diese Kombination stellt einen Sensor dar, der absolute Lokalisierung mit der Genauigkeit der Karte ermöglicht ohne auf GNSS zurückgreifen zu müssen. Unsicherheiten wie Weichen oder Tunneldurchfahrten gibt es bei dieser Kombination nicht.

Um eine prinzipielle Zulassungsfähigkeit sicherzustellen, wurden nur deterministische Algorithmen eingesetzt. Möglicherweise könnte auch Cross Acceptance aus anderen Branchen hier unterstützend wirken. Als relevante Kosten wären die Kosten für die Kamera(s) und Verarbeitungseinheit(en) auf dem Fahrzeug zu betrachten. Das Prinzip der visuellen Odometrie an sich ist weitgehend als Lösung anerkannt und in vielen Systemen ausführlich getestet. Die Besonderheit und Neuheit besteht in der Scala-Bestimmung aus Blockmatching (TrainMaus) und der domänen-spezifische Filterung der Daten im optischen Fluss.

Unser Ansatz wurde auf den Sequenzen der Messkampagne vom 27.9.2018 ausgewertet. Die Filterung der korrespondierenden Punkte aufgrund der Epipolar-Geometrie (mögliche Bewegungsgeraden der Punkte im Bild) hilft hier die Zuordnungen zu filtern, die von der Bewegung von anderen Zügen und anderen bewegten Objekten stammen. Der Einsatz von GPU erlaubt eine signifikante Steigerung der Anzahl der verfolgten Bildpunkte, was zu einer exzellenten Bestimmung der Translationsrichtung und der Rotation des Zuges beigetragen hat. Die Trajektorie aus der Odometrie hat sich über lange Strecken im Vergleich zum GPS überlappt. Eine externe absolute Referenzierung aus der Lage von erkannten Weichen oder künstlichen Masttafeln ist dennoch empfehlenswert, da das visuelle Systeme die entstehenden Fehler durch das Fehlen einer globalen Referenz nicht kompensieren kann.

Die starke Ähnlichkeit der Punkte in der Gleisumgebung hat die höhere Robustheit des neu entstandenen Blockmatching-Verfahrens (TrainMaus) vorerst bestätigt. Die größere zu vergleichende Fläche bietet hier eine geringere Anfälligkeit zu Fehlzuordnungen. Aus den ersten Experimenten wurden nun Verfahren konzipiert, wie man die metrische Größe auch direkt aus dem optischen Fluss einschränken kann, um im System zwei komplementäre Methoden zur metrischen Bestimmung zu erhalten, woraus sich die QoS viel leichter errechnen lässt und die eine Möglichkeit des Fehlers des Systems noch weiter signifikant reduziert werden kann.

Unser Ansatz erfordert keine kontinuierliche Stereo-Bildverarbeitung und kann in Echtzeit mit bis zu 60 fps in der CUDA Umgebung ausgeführt werden. Die Grafikkarte erledigt dabei die Feature-Erkennung und das Feature Matching.

Das Verfahren ist eine vollständige geometrische Lösung des Problems. Bisherige Ergebnisse zeigen eine sehr kleine Drift. Somit sind keine Bundle-Adjustment-Verfahren notwendig, um die Ergebnisse bei höherem Rechenaufwand zu verbessern.

Das Verfahren ist schneller als die führenden Verfahren in der Benchmark-Tabelle unter 5.3.

5.7 Weiteres Vorgehen

- Weitere Auswertung aller Fahrstrecken, um eine Aussage für die Robustheit sowie für die Anforderungen des Ziel-Kamerasystems ableiten zu können. Darunter fallen:
 - Besserer Einbau der Kamera notwendig (Reflektionen von Führerstand innen), sowie zunehmendes Nicken der Kamera während der Messfahrt bei beschleunigen und bremsen.
 - Keine Verwendung von auto Gain sowie aktive Beleuchtung des Kamerasichtfelds z. B. mit Infrarot.
 - Optik, Auflösung, Framerate und Anordnung (Sichtfeld) der Zielkamera, abhängig vom verwendeten Ansatz.
- Gleiserkennung aus dem Kamerabild zur Stützung der Gleisselektivität unter Nutzung einer digitalen Karte.
- Kombination mit anderer Sensorik mittels Sensorfusion.
- Weitere Messfahrten mit der Zielkamera, idealerweise im Dauerbetrieb, um die Leistungsfähigkeit des Systems beurteilen zu können.

6 Sensortechnologie: Video Lokalisierung

6.1 Management Summary

- Im PoC wurde am 27.9.2018 die Video Lokalisierung auf der Strecke Münsingen/Uttigen analysiert
- Im Vorfeld der Messfahrt wurden 9 Referenzpunkte (April Tags) in 2 verschiedenen Größen (16x16 cm bzw. 64x64 cm) entlang der Strecke angebracht.
- Mittels auf beiden Seiten (Lokomotive und Steuerwagen) installierten Stereo Kameras wurde versucht die Referenzpunkte zu erfassen.
- Es wurden alle grossen Tags erkannt, die kleineren wurden aufgrund schwachen Kontrasts, der Größe im Bild und dem fehlenden weissen Rand nicht erkannt.
- Mittels Video Lokalisierung und geeigneten Referenzpunkten ist es möglich, die Zugposition absolut auch bei hohen Geschwindigkeiten zu lokalisieren.
- Heutige Bildverarbeitung bietet das Potenzial, Referenzpositionen wie z.B. April Tags oder QR-Codes zu detektieren und daraus die Zugposition zu ermitteln.
- Die ersten Resultate können durch folgende Massnahmen verbessert werden:
 - geeignete Anbringung der Tags
 - Optimierung Kamerainstallation, Kamerasystem und Bildverarbeitung
- In weiteren Messfahrten soll die Video Lokalisierung weiter analysiert und verbessert werden.
- Es ist zu definieren, in welcher Art, die im Bahnanwendung noch nicht ausgereifte aber vielversprechende Video Lokalisierung weiterverfolgt werden soll. Es soll versucht werden, Bahnstrommasten als Referenzpunkte zu nutzen.

6.2 Zielsetzung

- Erkennung und Identifizierung von Tags bei Vorbeifahrt auch mit höheren Geschwindigkeiten zur absoluten Referenzierung in folgenden Schritten:
 - Erkennung von künstlichen Tags in Videosequenzen
 - Ermittlung der relativen Lage in allen 6 Freiheitsgraden zum Tag
 - Zuordnung der Tags zu einer Karte mit hochgenauen Positionen der Masten
 - Mittels der bekannten relativen Lage zur Kamera ist eine absolute Positionsbestimmung möglich.
- Ableitung der notwendigen Größe der Tags sowie Ableitung der Anforderungen an die Kamera.

6.3 Ausgangslage

- Stereo-Aufnahmen der Messfahrt mit Framerate 60 Hz
- 9 April-Tags in 2 verschiedenen Größen an unterschiedlichen Stellen entlang der Strecke angebracht

- Algorithmik zur Erkennung der relativen Lage der April-Tags in Videobildern vorhanden
- Versuch der Identifizierung aller Tags anhand der extrahierten Bilder

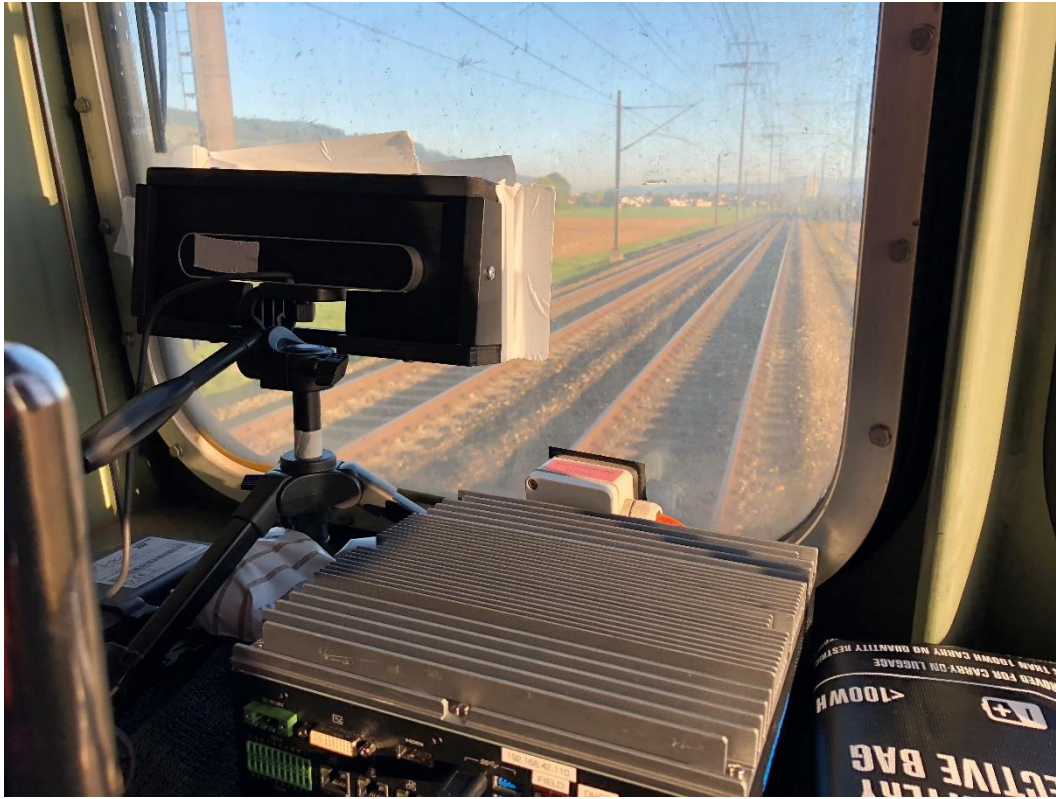


Abbildung 6-1: Kamerainstallation Messfahrt Thun-Burgdorf

6.4 Erkenntnisse

- Bessere Kontrolle der Kameraparameter notwendig, da Tags durch Gegen Sonne sehr schwach erkennbar (starke Bildnachbearbeitung notwendig)
- Längere Brennweite oder größere Tags von Vorteil. Die jetzige Kameraanordnung sollte viele verschiedene Bereiche abdecken

6.4.1 Bildqualität

- Gegenlicht und Spiegelungen an der Scheibe durch prototypischen Einbau bereiten Probleme
- Vorverarbeitung des Bildes notwendig (Kontrasterhöhung, Helligkeitsreduktion)

6.4.2 Tag-Größe

- Für die Erkennung der Tags ist die Größe des Tags im Bild relevant. Hier gilt: je größer das Tag im Bild erscheint, desto besser ist es zu detektieren – es muss jedoch vollständig im Bild sichtbar sein.
- Es existiert folgender Zusammenhang zwischen Größe des Tags w , Entfernung zum Tag z , der Brennweite der Kamera f und der Größe im Bild h : $w/z=h/f$
- Daraus lässt sich bei festgelegter Position der Tags (z.B. an Fahrleitungsmasten) und der Brennweite und Auflösung der Kamera die ideale Größe der Tags bestimmen, oder umgekehrt bei gegebener maximaler Größe der Tags (z. B. Breite von Fahrleitungsmasten) kann bei gegebener Auflösung die notwendige Brennweite der Kamera bestimmt werden.

6.4.3 Tag-Position

- Je nach Brennweite die Tags im Bild müssen jedoch vollständig (mit der weißen Umrandung) sichtbar sein. Bei längeren Brennweiten zum Beispiel müssen die Tags näher ans Gleis, müssen aber nicht so groß sein – **Optimierungsproblem**.

6.4.4 Tag-Erkennung

- Erkennung ist robust bei gutem Kontrast und wurde unabhängig von der Messfahrt getestet
- Übersichts-Tabelle von erkannten und nicht erkannten Tags bei den einzelnen Fahrtstrecken (Kameras nach vorne und hinten):

Fahrt	1008	2008	1009	2009	1010	2010	1012	1013	2013	1014	1016	1017	1015	2015
Tag														
1											x			x
2														
3	x				x		x							
4	√		√		√		√	√		√				
5			x		x		x							
6		x		x				x						
7			x		x		x							
8	x		x		x		x							
9		x		x										
10				x							x			
11		x		x				x						x
12														
13		√		√				√						√
14		√		√				√						√

Es wurden alle grossen Tags erkannt, die kleineren wurden aufgrund schwachen Kontrasts, der Größe im Bild und dem fehlenden weissen Rand nicht erkannt.

Eine Verfeinerung der Schwellwertbildung im Algorithmus würde zu einer Verbesserung der Erkennungsrate bei den kleinen Tags führen. Siehe Video «Fahrt1017_Tag104» für die prinzipielle Funktionsweise.

Beispielhafte Bilder von erkannten und nicht erkannten Tags mit Begründung



Original Aufnahmen: April Tag ist links neben der Unterführung zu erkennen.

Abbildung 6-2: Tag Erkennung Original Aufnahme

Nachbearbeitete Bilder:

April Tag wird von der Bildverarbeitung erfasst und im Bild referenziert

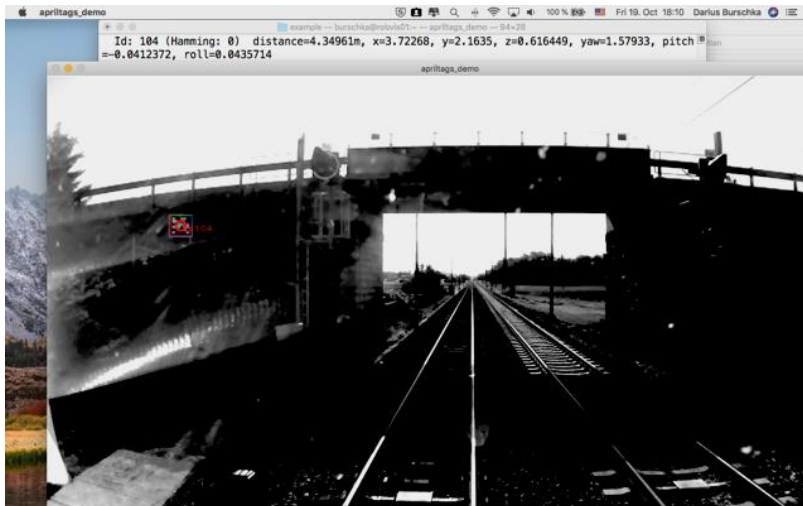


Abbildung 6-3 (links):Tag Erkennung nachbearbeitete Aufnahme (Tag wird erkannt)

Abbildung 6-4: Tag Erkennung nachbearbeitete Aufnahme (Tag wird nicht erkannt, weil weisser Rand von Mast abgedeckt wird)

6.5 Offene Punkte

6.5.1 Einflussfaktoren

- Gegensonne
- Spiegelungen des Fahrraumes in der Scheibe
- Effektive Größe des Tags im Bild
 - Grosse Tags dann auch etwas mehr seitlich angebracht (kurze Brennweite)
 - Kleinere Tags dann viel näher am Gleis angebracht (längere Brennweite)

6.5.2 Automatische Bildvorverarbeitung

- Kontrasterhöhung
- Verdunklung

6.6 Gesamtbewertung

Visuelle Odometrie und Video Lokalisierung sind eng miteinander verwoben. In der jetzigen Phase wurden keine Probleme mit dem Geschwindigkeitsbereich der Erfassung festgestellt. Die Algorithmen sind anscheinend in der Lage, auch noch höhere Geschwindigkeiten zu erfassen. Sowohl die Framerate der Kamera wie auch der betrachtete Bildausschnitt erlaubt es, die Tags zu identifizieren. Hier muss aber beachtet werden, dass es bei hohen Geschwindigkeiten bei schlechteren Lichtverhältnissen zu Bewegungsunschärfe im Bild kommen kann. Daher wäre eine Zusatzbeleuchtung mit einem (IR-)Scheinwerfer empfehlenswert, der den Bereich des zu erwartenden Tags in der Vorbeifahrt ausleuchten sollte.

Die Tagerkennung wurde erfolgreich implementiert und auf Robustheit und Geschwindigkeit getestet (siehe Video «Fahrt1017_Tag104»). In der ersten Messfahrt wurde die Taggeometrie in einigen Fällen verfälscht, wodurch eine automatische Erkennung nicht möglich war. Ein Erkennungsbeispiel aus der Testfahrt zeigt die Funktionsweise des Systems in der Bahnumgebung. Es muss noch eine bessere Steuerung der Kameraparameter und eine Vorrichtung zur Unterdrückung der Innenreflexionen in der Scheibe hinzugefügt werden.

Die Tags haben hohe Relevanz als eine der zwei identifizierten Alternativen neben der Weichendetektion zur Erhöhung der Langzeitstabilität des Systems. Das visuelle System kann mit einer sehr hohen Präzision lokal arbeiten und Fehler korrigieren, aber das Fehlen von globalen Referenzen, was auf alle Odometrie-Systeme zutrifft, erlaubt keinerlei globale Fehlerkorrektur. Die erzielten Stabilitätsergebnisse lassen aber die Aussage zu, dass eine solche Referenzierung nicht oft erforderlich ist, ggfs. genügt eine Bereitstellung der Tags auf Bahnhöfen.

Es wurden bei der Messfahrt nur die grossen Tags erkannt. Grund dafür, dass die kleinen Tags nicht erkannt wurden, waren:

- Schlechte Lichtverhältnisse, auch mit Bildvorverarbeitung nicht lösbar. Aktive Beleuchtung oder Kameraregelung notwendig
- Weißer Rand der Tags wurde bei der Befestigung abgeklebt und somit ist das Tag für den Algorithmus nicht mehr erkennbar
- Grösse der Tags im Bild war meistens zu klein.

Einsatzmöglichkeiten von Tags:

- Tags bieten die Möglichkeit Informationen wie IDs zu tragen
- Potenzial zur absoluten Lokalisierung wie z.B. durch Balisen gegeben. Business Case gegenüber Balisen muss noch gerechnet werden

Als relevante Kosten sind zu sehen:

- Aufwand für Anbringung und Wartung der Tags.
- Kosten für Kamera und Verarbeitungseinheit auf dem Fahrzeug

Die Kosten der Tags selbst sind sehr gering, Die Summe hängt von der Anzahl der benötigten Tags ab. Insgesamt sind sie jedoch wesentlich billiger als Balisen und einfacher zu montieren.

6.7 Weiteres Vorgehen

- Weitere Messfahrt mit besser platzierten Tags mit optimaler Größe (besserer Einbau der Kamera notwendig)
- Verfeinerung der Schwellwertberechnung im Algorithmus
- Bestimmung der Einflussfaktoren wie Regen, Schneefall und Dunkelheit
- Ableitung der Anforderung an das Zielkameranystem inkl. aktiver Beleuchtung (z.B. Infrarot)
- Bewertung der Robustheit nach weiteren Messfahrten
- Berechnung Business Case gegenüber Balisen

7 Sensortechnologie: FOS Fiber Optic Sensing

7.1 Management Summary

- Im PoC wurde am 27.9.2018 die FOS Technologie auf der 9000m Strecke Münsingen→Wichtrach→Kiesen→Uttigen analysiert und mit den besten OBU (GNSS/IMU/ODO) Lokalisierungsresultaten bei 8 Messfahrten verglichen.
- Bei Zugfahrten auf der Spur die neben dem Fiber Kabelkanal liegen wurde in **26% eine Lokalisierung < 2m, in 69% < 4m, in 82% eine Lokalisierung < 6m** erzielt. **Das Minimum lag bei 0,4m.**
- Die Qualität der energiebasierten Erkennung von Zugkanten (Anfang, Ende) auf Kanalebene ist abhängig vom Abstand Schiene-Glasfaserkabel, der Bodenbeschaffenheit und der Zuggeschwindigkeit.
- Aktuell ist die Lokalisierung bei Zuggeschwindigkeiten unter 40km/h noch nicht zufriedenstellend.
- Eine belastbare Aussage zum Potential von FOS für eine Zuglängenbestimmung kann aus der aktuellen Untersuchung noch nicht gemacht werden. Züge werden generell als länger erkannt, als sie sind, was an der energiebasierten Erkennung liegt.
- Da das Potential der Technologie noch nicht abschliessend beurteilt werden kann und weil die FOS Strecke für weitere Messungen bereitsteht, werden die Messungen bis Ende 2019 weitergeführt. Ziel ist die Messungen zu automatisieren, damit Langzeitmessungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erfasst und ausgewertet werden können.

- FOS bietet ein interessantes Potential als stützende Technologie und kann eine wichtige Alternative bzw. Ergänzung im Bereich **absoluter Lokalisierung**, insbesondere **bei eingeschränkter Verfügbarkeit von GNSS und Mobilfunk-Kommunikation**, sowie auch für die Bestimmung der **Zugintegrität** (Zuglängenbestimmung) sein.
- Darüber hinaus ist es mit FOS auch möglich, Objekte im Gleis zu detektieren, die nicht getaggt sind oder sich nicht selbst lokalisieren, also zum Beispiel Steinschlag, Tiere oder Menschen im Gleis (gemäß Stand der Technik).
- Damit könnte FOS auch eine wichtige Aufgabe als Überwachungsebene in direkter Kommunikation mit dem Stellwerk erfüllen - unabhängig von den sich selbst lokalisierenden Zügen.
- Aufgrund ungenauer Positionsdaten des Glasfaserkabels wurde die Messfahrt am 27.9.2018 insbesondere zur Kalibrierung des Systems eingesetzt und automatisiert eine Karte der Zuordnung FOS-Kanal zu GNSS-Position erstellt. Eine erste Betrachtung zur erreichbaren Genauigkeit wurde darauf basierend abgeleitet.
- Basierend auf den Ergebnissen der Messfahrt am 27.9.2018 und nach aktueller Einschätzung ist eine **Lokalisierungsgenauigkeit von < 2 m** denkbar. Das erzielte Optimum lag bei **0,4 m**.
- Gleiselektivität ist aktuell ohne Zusatzinformation oder -ausrüstung (z.B. Glasfaser pro Gleis) bzw. ohne Erweiterung der Algorithmik nicht einfach sicherzustellen.

- Das Potential der Zuglängenbestimmung wurde bisher noch nicht erschöpfend untersucht. Aufgrund von Erfahrungen ist eine Genauigkeit von bis zu ca. 4m denkbar, d.h. kleiner als eine Wagenlänge und damit verwendbar zur Ermittlung der Zugintegrität.
- Für eine belastbare Aussage und hinsichtlich Robustheit sind allerdings noch weitere (Langzeit-)Untersuchungen erforderlich, um Einflüsse von Zuggeschwindigkeiten, Infrastruktur, Abstand Glasfaserkabel – Schiene, Wetter, Zugbegegnungen, Zugüberholungen, etc. bewerten zu können.
- Wir empfehlen dringend eine Langzeitmessung, bei der die bestehenden ohnehin bereits installierten FOS-Systeme optimal genutzt werden können. Wesentliche Voraussetzung für die Langzeitmessung sind ein stabiles Standalone System, das im Dauerbetrieb läuft, sowie ein höherer Automatisierungsgrad in Datenzugriff-/transfer und Auswertung und weiterhin referenzierte Messfahrten bzw. Aufzeichnungen.

7.2 Zielsetzung

- Untersuchung des Potentials von **Zugerkennung, Lokalisierung** und Bestimmung der **Zugintegrität** über FOS (Fiber Optic Sensing).
- **Quantitative** Untersuchung der erreichbaren **Lokalisierungsgenauigkeit** durch **Vergleich mit Referenz eines Messwagens**
- Qualitative Untersuchung von Einflüssen lokaler Gegebenheiten (Bahnhöfe, Brücken, ...) auf die Lokalisierung

7.3 Ausgangslage

7.3.1 Marktanalyse FOS

- Aktuell gibt es eine überschaubare Anzahl von Anbietern für FOS-Systeme am Markt. Die wesentlichen Anbieter sind: Optasense (UK), Frauscher (A), NBG (A), AP Sensing (D).
- Der Einsatz von FOS findet bereits langjährige Anwendung in anderen Branchen, z.B. Pipelines (Oil & Gas) sowie Borders & Military für nicht-sicherheitskritische Applikationen.
- In der Bahntechnik ist FOS aktuell u.a. bei großen Betreibern als Machbarkeitsstudie oder im Testbetrieb im Einsatz und zeigt ein vielversprechendes Potenzial, u.a. für
 - Monitoring (u.a. Gleis, Radsatz, Oberleitungskurzschluss)
 - Ereignisdetektion (u.a. Felssturz, Tierherden, Kabel-Diebstahl)
 - Zuglängenbestimmung (Zugintegrität) und Zugerennung für zeitnahe Fahrgastinformation
 - Teststrecke (Straße & Schiene) im Betrieb zur Erkennung von Murenabgängen (~SIL2) und Zugortung
- Im Bereich Lokalisierung gibt es aktuell auf dem Markt noch keine Aussagen zur erreichbaren Genauigkeit, Integrität (Zuverlässigkeit) und Anforderungen an die Zulassung.

7.3.2 FOS-relevante Eckdaten zur Messfahrt am 27.9.2018

7.3.2.1 Strecke

- Betrachtet wurde die Strecke Münsingen→Wichtrach→Kiesen→Uttigen mit ca. 9000m
- FOS Messsystem **von OptaSense (ODH3)** unterteilt die Strecke in **Segmente (=> Kanäle)** von **8m** Länge

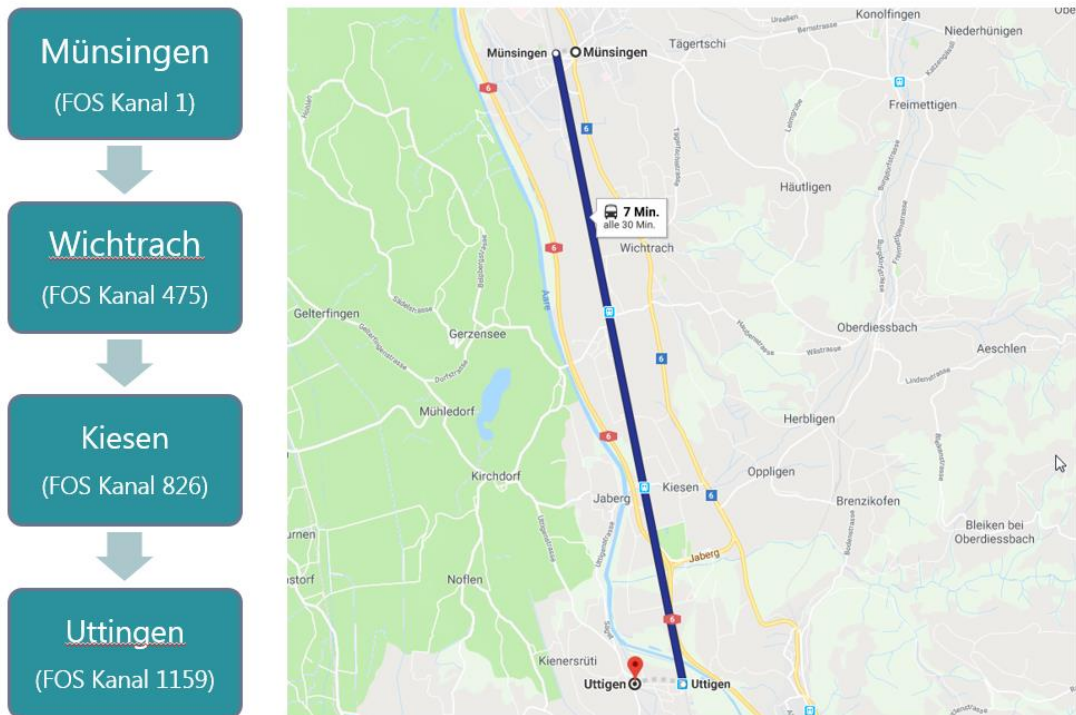


Abbildung 7-1: FOS Teststrecke

7.3.2.2 Daten

- Am 27.9.2018 wurden 10 Fahrten mit Messwagen entlang der Strecke durchgeführt. Allerdings umfassen die aufgezeichneten FOS Daten nur die Fahrten 1-7 und 10 (2 Fahrten fehlen).
- Verfügbare Referenzdaten mit hoher Lokalisierungs Genauigkeit des Messwagens durch Fusion von GNSS und Inertialsensor liegen vor.
- FOS Daten von der gesamten Strecke liegen vor.

7.3.2.3 Zug inkl. Messwagen und Position GNSS-Antenne

- Der Messzug besteht aus 3 Wagen (Lok – Messwagen – Steuerwagen)
- Abstand Vorderachse Lok zu Hinterachse Steuerwagen: 60.1m
- Abstand Vorderachse Lok zu Position GNSS Antenne: 20.7m
- Bei Fahrten mit Steuerwagen vorne ist der Abstand 39,4m (Differenz zur Gesamtlänge)

Der Messzug besteht aus 3 Wagen

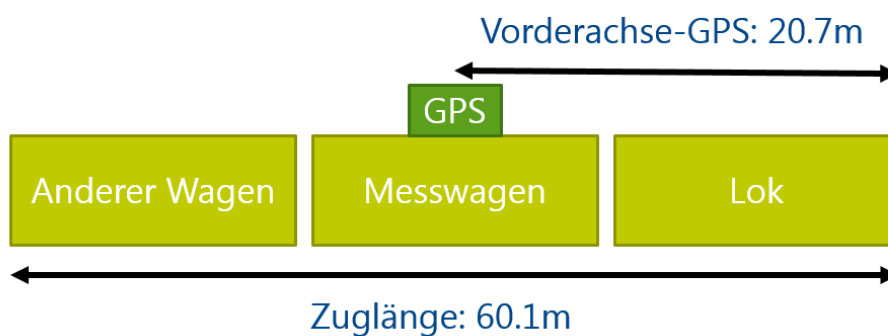


Abbildung 7-2: Abmessung mewa12

7.3.3 Analyse Methoden

7.3.3.1 Eingesetzter Algorithmus zur Zugerkennung (im Postprocessing)

- Energiebasierte Erkennung der Zugkanten (Anfang, Ende) auf Kanalebene
- Bei der energiebasierten Detektion wird das Rohsignal über einen Hochpassfilter gefiltert, dann gepuffert und schließlich die Signalenergie des Buffers berechnet. Dies ist analog zum Verfahren z.B. bei Audiodetektion. Man misst quasi die Lautstärke des vorbeifahrenden Zuges.

7.3.3.2 Bestimmung «Zugspur»

- Die erkannten Zugkanten werden über einen Zugverfolgungsalgorithmus gefiltert und zu einer Spur zusammengefügt. Die „Zugspur“ ist quasi die örtlich-zeitliche Abbildung (Trace) des sich fortbewegenden Zugs in den Pegeln der erfassten Daten/Signale.
- Wir bestimmen für jede Fahrt des Zugs (inkl. Messwagen) eine Spur.

7.3.3.3 Bewertungskriterium Lokalisierung

- Um die FOS Daten (Meter, 1Dimensional) mit der Referenz (GNSS Koordinaten, 2-dimensional) vergleichen zu können, müssen wir jedem FOS Segment eindeutige GNSS Koordinaten zuordnen können:

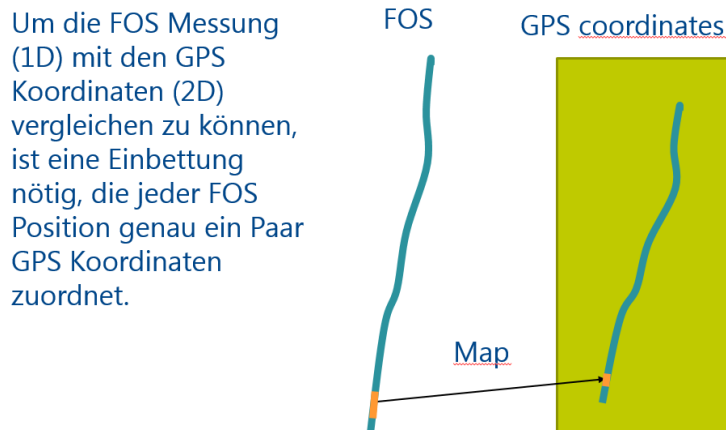


Abbildung 7-3: Koordinaten Vergleich FOS GNSS

- Die Zuordnung wird durch Mittelung der bestimmten Zugspur der 8 Fahrten des Messwagens erstellt. Dies ergibt die erforderliche Ground Truth für FOS.
- Gleichzeitig leitet sich aus der Varianz der Zuordnung ein Kriterium für die Genauigkeit der Lokalisierung ab, welches in Metern angegeben wird.
- Die Aussagen zur Genauigkeit beziehen sich im Wesentlichen auf die Längsrichtung (entlang der Gleise). Zur separaten Betrachtung der Querrichtung (Gleisselektivität) bedarf es nach aktuellem Stand zusätzlicher Informationen oder einer deutlichen Entwicklung neuer Ideen und Ansätze.

7.3.3.4 Bestimmung von Fahrtrichtung und Gleisabstand

- Die Fahrtrichtung wird aus der «Zugspur» bestimmt. Diese wird mit einem Gleis in Verbindung gebracht.
- Die Fahrten Münsingen → Uttigen befanden sich alle auf dem Gleis, welches näher an der Glasfaser liegt.
- Die Fahrten Uttigen → Münsingen befanden sich auf dem weiter entfernten Gleis.
- Der Abstand zwischen den Gleisen beträgt ca. 7,5m

7.4 Erkenntnisse

7.4.1 Analyse-Methoden

Auf einen Blick:

- Die Qualität der energiebasierten Erkennung von Zugkanten (Anfang, Ende) auf Kanalebene ist abhängig vom **Abstand Schiene-Glasfaserkabel**, der **Bodenbeschaffenheit** und der **Zuggeschwindigkeit**.

- Aktuell ist die Erkennung bei Zuggeschwindigkeiten unter 40km/h noch nicht zufriedenstellend.

7.4.1.1 Einfluss Abstand Schiene - Glasfaserkabel

- Der unterschiedliche Abstand der Gleise vom verlegten FOS-Kabel führt zu einer unterschiedlichen Qualität in der Zugkantenerkennung der Fahrten Münsingen→ Uttigen und Uttigen→Münsingen
- Deshalb werden die Fahrten im Folgenden nach Fahrtrichtung getrennt analysiert.

7.4.1.2 Einfluss Kanalsprünge

- Das Verfolgen der Zugspur zeigt einen Sprung über manche Kanäle. In diesen Kanälen wird kein Zug erkannt. Dies hat folgenden Hintergrund:
 - Entfernung von Kanal 22 zu Kanal 1134 laut vorliegenden Daten der SBB ist: 8896m.
 - Aufsummieren der FOS Kanäle (8m Segmente) verglichen mit der Streckenlänge Karte ergibt ein Längendefizit von ca. 300 m.
 - Dies entspricht **37 Kanälen, die „übersprungen“ werden.**
 - Das FOS Kabel scheint an diesen Stellen aufgerollt oder senkrecht zum Gleis verlegt zu sein, was bei der Verlegung von Glasfaserkabeln üblich ist.
 - Auffälligste Stelle: **Bahnhof Wichtrach** mit einem Kabelsprung von **~144m**:

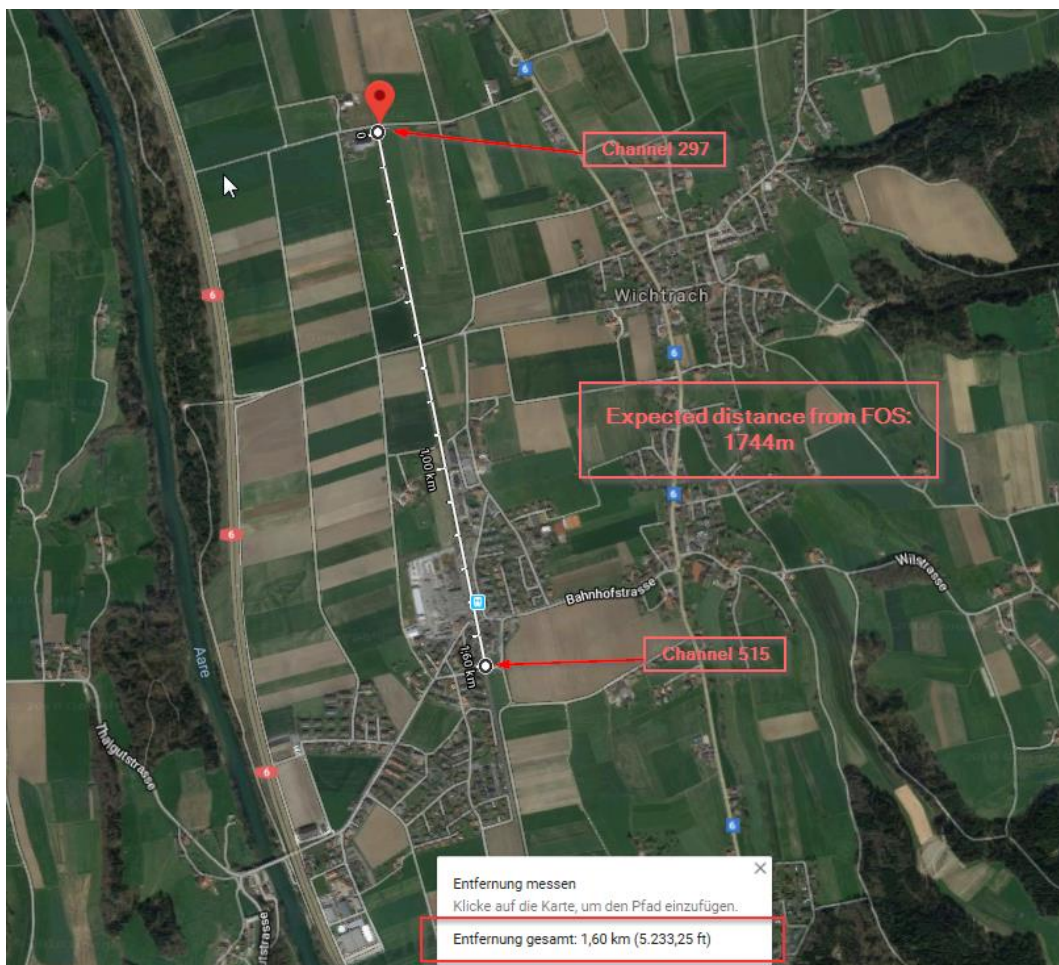


Abbildung 7-4: FOS Kanalsprung Wichtrach

- Eine vollständige Identifikation der Sprungstellen wird empfohlen.

7.4.2 Zuglokalisierung

Auf einen Blick – Details s. in den folgenden Unterkapiteln:

- Die Zuggeschwindigkeit hat bei dem aktuell eingesetzten Algorithmus den größten Einfluss auf die Lokalisierungsgenauigkeit.
- Die Infrastruktur macht sich leicht bemerkbar. Störstellen sind prinzipiell Bahnhöfe, Brücken, nahegelegene Autobahn.
- Bei Fahrten von Münsingen → Uttigen wurde in **26% eine Lokalisierung < 2m, in 69% < 4m, in 82% eine Lokalisierung < 6m** erzielt. **Das Minimum lag bei 0,4m.**
- Bei Fahrten Uttigen → Münsingen wurde in 63% der Fälle eine Lokalisierung < 6m erzielt.
- **Lokalisierung im Bereich < 2m** scheint **möglich** (Ergebnis Fahrten Münsingen → Uttigen).
- Erkennungsprobleme bei langsamen Geschwindigkeiten müssten gelöst werden.

7.4.2.1 Vorgehen bei der Lokalisierung und Definition des Lokalisierungsfehlers

- Bei FOS wird die Position des Zuges im Glasfaserkabel bestimmt => Segmente/Kanäle.
- Die Koordinaten des Glasfaserkabels und der genaue Verlauf sind allerdings unbekannt. Es wird ein Verlauf des Kabels parallel zum Gleis angenommen. Sprünge im Kabel sind hier ein Problem.
- Für die Kalibrierung, d.h. die Zuordnung der einzelnen Glasfaser-Segmente zu GNSS Koordinaten wurden die 8 aufgezeichneten Fahrten mit dem Messwagen benutzt, um automatisch die fehlende Karte zu erstellen.
- Die Varianz der einzelnen Fahrten wird als Lokalisierungsfehler verwendet.
- Der Lokalisierungsfehler (kanalweise) beschreibt also die durchschnittliche Abweichung (in Metern) der 8 Fahrten von der selbst erstellten Zuordnung FOS -> GNSS.

7.4.2.2 Markante Infrastruktur

- Auffälligkeiten in der Lokalisierungsqualität konnten an den **Bahnhöfen**, an zwei **Brücken** und einem Streckenabschnitt nahe der **Autobahn** festgestellt werden.
- Die Durchfahrgeschwindigkeit des Zuges scheint einen wesentlich größeren Einfluss auf die Lokalisierungsqualität zu haben, als die Infrastruktur an sich. Das liegt u.a. auch am eingesetzten Zugverfolgungsalgorithmus.

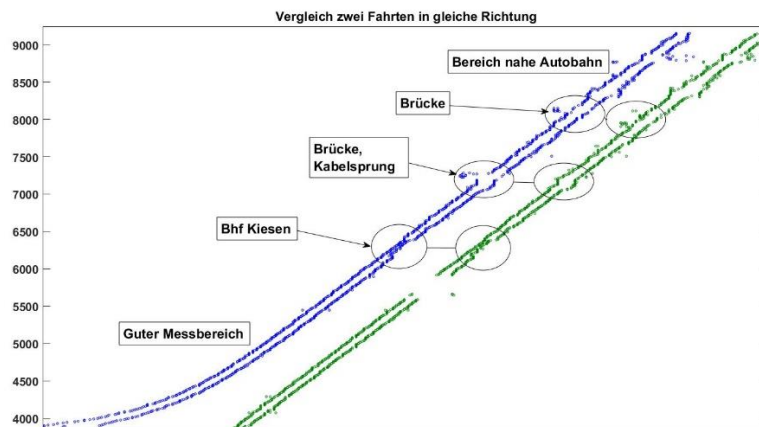


Abbildung 7-5: Detailplot zweier Fahrten Münsingen - Uttigen

- Bahnhof Wichtrach:
 - Oft langsame Durchfahrt => schlechte Erkennung
- Bahnhof Kiesen:
 - Langsame Durchfahrt nur bei Fahrten Uttigen → Münsingen => Gute Erkennung in eine Fahrtrichtung
 - Der Einfluss ist bemerkbar aber nicht hoch
- Bahnhof Münsingen/Uttigen:
 - Nicht bewertet, da am Rand der Messstrecke
- Brücken:
 - An der ersten Brücke ist ein deutlicher Kabelsprung
 - Der Einfluss der Brücken selbst ist bemerkbar, aber nicht hoch
- Autobahn:
 - Die Zugerkenennung resp. Lokalisierung wird durch die nahe Autobahn gestört
 - Gleichzeitig ist die Geschwindigkeit vieler Fahrten hier sehr gering
 - Es ist unklar, ob die Autobahn, oder die Zuggeschwindigkeit die Fehler verursacht
- Die Stellen mit der markanten Infrastruktur sind aus den nachfolgenden Histogrammen ausgenommen

7.4.2.3 Fahrten Münsingen→Uttigen

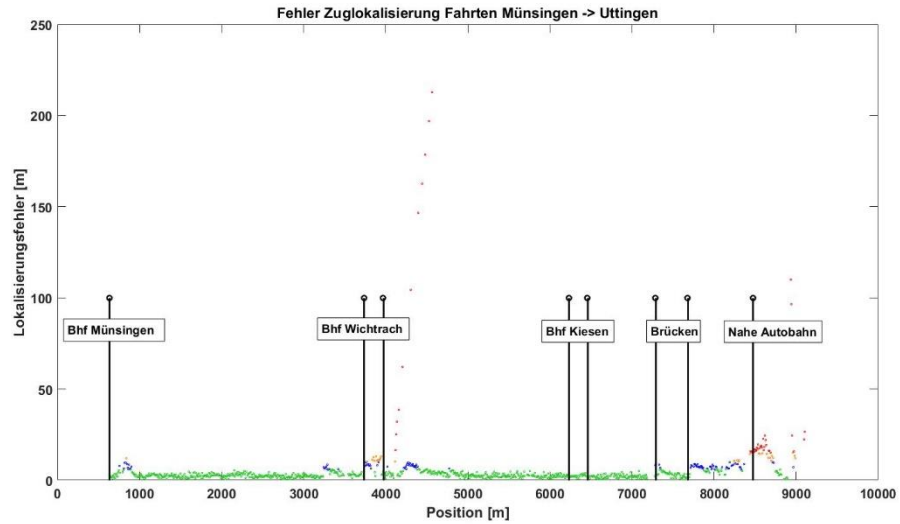


Abbildung 7-6: Fehler Zuglokalisierung Münsingen – Uttigen (Gleis neben Kabelkanal)

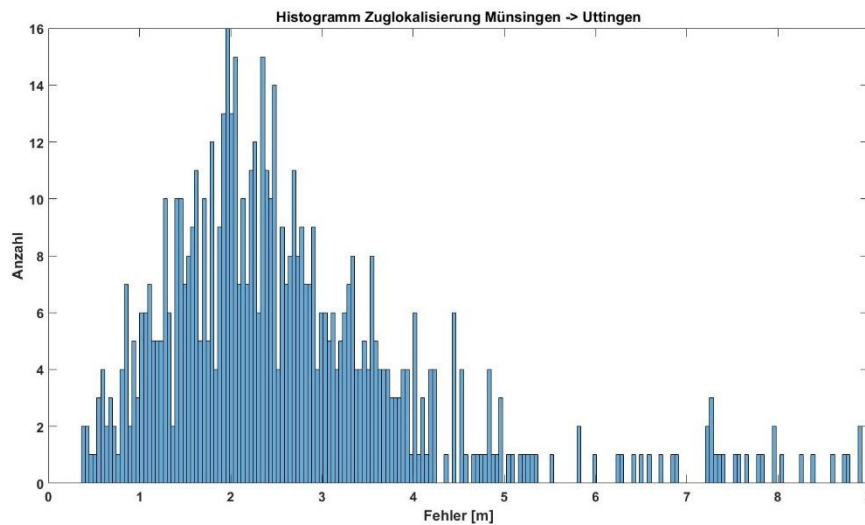


Abbildung 7-7: Histogramm Zuglokalisierung Münsingen - Uttigen (Gleis neben Kabelkanal)

- **Lokalisierungsfehler** (kanalweise mittlere Abweichung aller Fahrten von zugeordneter GNSS-Koordinate gem. Referenz):
 - **Meist < 4m, möglich 1-2m oder besser, Minimum bei 0,4 m**
 - < 2m 26%
 - < 4m 69%
 - < 6m: 82%
 - 6-10m: 11%
 - 10-15m: 3%

- > 15m: 4%
- **Bhf Wichtrach: 10-15m**
- Sehr gute Lokalisierung möglich
- Nach aktueller Einschätzung wegen der Nähe von Gleis zu Glasfaser und der fast durchgehend hohen Geschwindigkeit
- Alle Fahrten in diese Richtung durchfahren den Bahnhof Kiesen mit mittlerer bis höherer Geschwindigkeit (> 40km/h). Die Lokalisierung war dennoch sehr gut. Der Einfluss des Bahnhofs selbst scheint also geringer, als der der Geschwindigkeit am Bahnhof.
- Der Einfluss der Brücken ist bemerkbar, aber nicht hoch.

7.4.2.4 Fahrten Uttingen→Münsingen

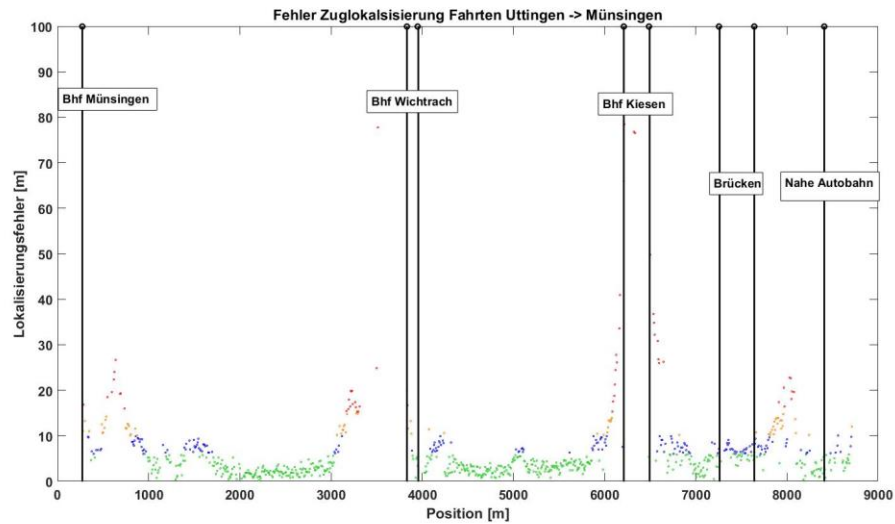


Abbildung 7-8: Fehler Uttingen - Zuglokalisierung Münsingen (Gleis nicht neben Kabelkanal)

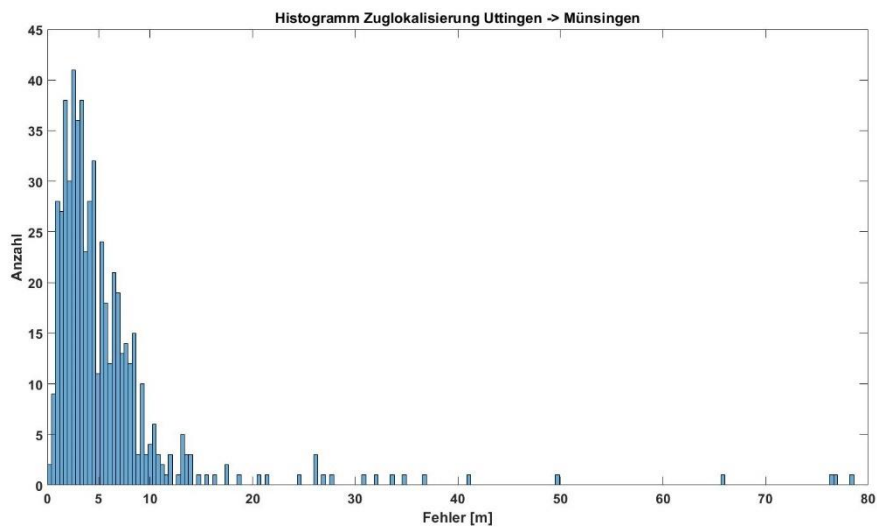


Abbildung 7-9: Histogramm Zuglokalisierung Uttingen - Münsingen (Gleis nicht neben Kabelkanal)

- **Lokalisierungsfehler** (kanalweise mittlere Abweichung aller Fahrten von zugeordneter GNSS-Koordinate gem. Referenz):
 - **< 6m: 63%**
 - 6-10m: 22%
 - 10-15m: 8%
 - > 15m: 7%
 - **Bahnhöfe: 10-15m**
- Langsame Durchfahrt an den markanten Stellen führt zu schlechterer Lokalisierung
- Höherer Abstand vom Gleis zum Kabel führt zu schlechterer Lokalisierung

7.4.3 Zuglänge

Auf einen Blick:

- Der Fokus der bisherigen Untersuchung lag auf der Zugerennung und Lokalisierung, und insbesondere auch stärker auf der Erkennung der Zugspitze als des Zugendes.
- Daher lässt sich zum Potential bzgl. Zuglängenbestimmung aus der aktuellen Untersuchung noch keine belastbare Aussage treffen.
- Die Ergebnisse der Längenbestimmung aus der aktuellen Untersuchung fallen dadurch deutlich schlechter aus, als sie sein könnten. Die Längenbestimmung kann erfahrungsgemäß bis zu 4m genau werden, insbesondere bei Fokus auf Abschnitte mit guter Lokalisierung.
- Züge werden generell als länger erkannt, als sie sind, was an der energiebasierten Erkennung liegt: Die durch den Zug erzeugten Vibrationen werden durch den Boden um die Zugachsen in alle Richtungen übertragen. Das Gleis vibriert also schon an einem Messpunkt, bevor die Zugachse diesen erreicht. Da die Übertragung der Vibrationsenergie durch den Boden je nach Kanal variiert, ist eine punktgenaue Erkennung sehr unzuverlässig. Daher gilt der Ansatz, die Zugachse etwas zu früh, aber dafür sicher zu erkennen. Das Gleiche gilt für die letzte Achse des Zugs, bei der das Gleis noch nachvibriert.
- Dieser Effekt lässt sich aber durch einen konstanten Offset korrigieren.
- Züge in Fahrtrichtung Münsingen→Uttigen werden deutlich länger erkannt, als in die andere Richtung. Dies ist unabhängig von der Zugkonfiguration (Steuerwagen vorn/hinten), da die Zuglänge unabhängig von der FOS -> GNSS Zuordnung bestimmt wird.

7.4.3.1 Zuglänge Münsingen→Uttigen

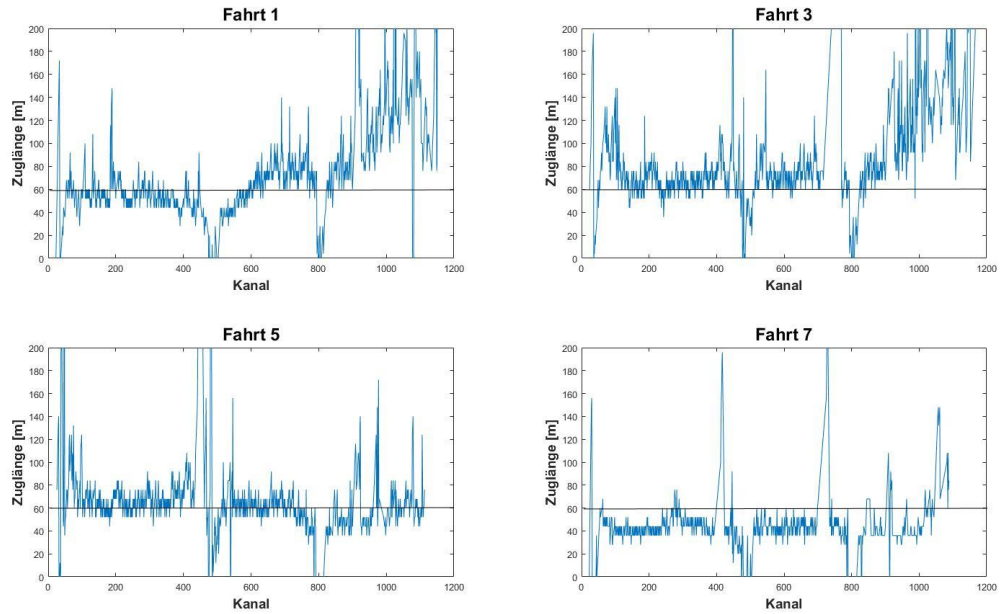


Abbildung 7-10: Zuglänge Münsingen - Uttigen

7.4.3.2 Zuglänge Uttigen→Münsingen

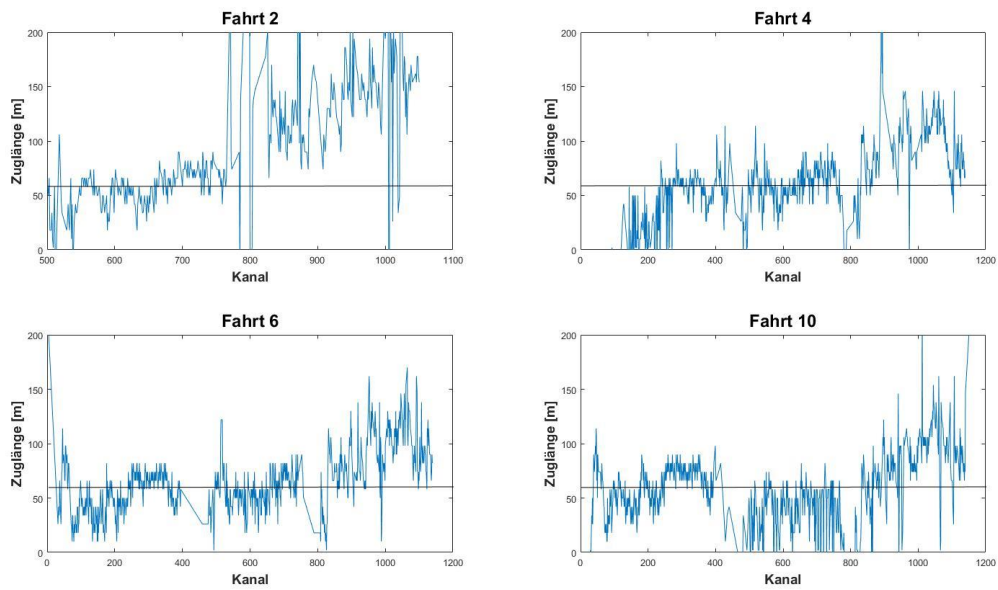


Abbildung 7-11: Zuglänge Münsingen - Uttigen

7.5 Offene Punkte

Zur Erzielung einer belastbaren Aussage:

- Weiterführende Untersuchung mit mindestens weiteren 15 bis 20 Fahrten, insbesondere mit langsamer Geschwindigkeit an mehreren Stellen, zur Erzielung einer belastbaren Aussage zur erreichbaren Genauigkeit und Zuverlässigkeit
 - Genauere Untersuchung des Einflusses der Infrastruktur ohne Einfluss von niedriger Zuggeschwindigkeit.
 - Genauere Untersuchung der erreichbaren Genauigkeit bzgl. Zuglängenbestimmung (Zugintegrität)
 - Entwicklung einer nicht energiebasierten Zugerkennung, die unabhängig von der Zuggeschwindigkeit ist.
 - alternativ deutliche Verbesserung der energiebasierten Zugerkennung.
- Durchführung einer Langzeitmessung zur Bewertung von Umwelteinflüssen, idealerweise über verschiedene Jahreszeiten hinweg (z.B. Winter bis Sommer) und unter Berücksichtigung aller durchfahrenden Züge (speziell auch Zugbegegnungen und Zugüberholungen)
- vollständige Identifikation der Sprungstellen (Kanalsprünge)

7.6 Gesamtbewertung

- FOS bietet ein interessantes Potential als stützende Technologie und kann eine wichtige Alternative bzw. Ergänzung im Bereich **absoluter Lokalisierung**, insbesondere **bei eingeschränkter Verfügbarkeit von GNSS und Mobilfunk-Kommunikation**, sowie auch für die Bestimmung der **Zugintegrität** (Zuglängenbestimmung) sein.
- Basierend auf den Ergebnissen der Messfahrt am 27.9.2018 und nach aktueller Einschätzung ist eine Lokalisierungsgenauigkeit von < 2 m denkbar. Das erzielte Optimum lag bei 0,4 m.
- Gleiselektivität ist aktuell ohne Zusatzinformation oder-ausrüstung (z.B. Glasfaser pro Gleis) bzw. ohne Erweiterung der Algorithmik nicht einfach sicherzustellen.
- Für die Zuglängenbestimmung ist eine Genauigkeit von bis zu 4m denkbar, d.h. kleiner als eine Wagenlänge und damit verwendbar zur Ermittlung der Zugintegrität.
- Eine durchgängige Lokalisierung mit FOS mit konstant hoher Genauigkeit scheint basierend auf den aktuellen Algorithmen heute schwierig. Probleme bereiten insbesondere infrastruktureitige Störstellen, z.B. Bahnhofsbereiche, sowie niedrige Zuggeschwindigkeiten.
- Allerdings liegt **ein großes, noch zu hebendes Potenzial in der (Weiter-)Entwicklung der Algorithmen** oder auch in neuen algorithmischen Ansätzen (z.B. Mustererkennung). Diese könnten die o.a. Probleme weitestgehend lösen.
- Für eine belastbare Aussage zu Genauigkeit und Zuverlässigkeit und hinsichtlich Robustheit ist darüber hinaus eine Langzeit-Untersuchung absolut erforderlich, um Einflüsse von Zuggeschwindigkeiten, Infrastruktur, Abstand Glasfaserkabel – Schiene, Wetter, etc. besser bewerten zu können. Dadurch ließe sich auch das installierte System optimal nutzen.
- Darüber hinaus ist es mit FOS auch möglich, Objekte im Gleis zu detektieren, die nicht getaggt sind oder sich nicht selbst lokalisieren, also zum Beispiel Steinschlag, Tiere oder Menschen im Gleis (gemäß Stand der Technik).

- Daher könnte FOS im Rollout von SR40 für dedizierte Use Cases zum Einsatz kommen, z.B.
 - in Bereichen verminderter Verfügbarkeit anderer Sensorik und Mobilfunk-Kommunikation (z.B. Tunnel, kurvenreiche Strecken mit ungünstiger Topographie)
 - als unabhängige Technologie zur Bestimmung der Zugintegrität
 - zur Erkennung von (nicht-getagten) Objekten, Personen und Tieren im Gleis
- Damit könnte FOS auch eine wichtige Aufgabe als Überwachungsebene in direkter Kommunikation mit dem Stellwerk erfüllen - unabhängig von den sich selbst lokalisierenden Zügen.

7.7 Weiteres Vorgehen

- Vorbereitung einer Langzeitmessung unter Erhöhung des Automatisierungsgrades
 - Standalone-fähiges System im Dauerbetrieb
 - Remote-Zugriff auf die Daten seitens SBB/
 - Unkomplizierter automatisierter Datentransfer zu SBB
 - Geeignete Vorfilterung der Daten zur Reduktion der zu transferierenden Datenmenge
 - Synchronisation mit GPS-Zeit in 100ms (anstatt 1 sec)
 - Referenzierte Messfahrten bzw. Aufzeichnungen
- Planung und Durchführung einer weiteren Messfahrt zur Konkretisierung und Validierung der erzielbaren Genauigkeit und Zuverlässigkeit, idealerweise bereits im Rahmen der Langzeitmessung:
 - Weiterführende Untersuchung mit mindestens weiteren 15 bis 20 Fahrten
 - mindestens 2 langsamere Fahrten mit unter 40 km/h jeweils in eine Richtung. Je variabler die Langsamfahrten gestaltet werden können, umso besser.
 - Aufzeichnung aller Zugfahrten (auch regulär verkehrende Züge)

Parallel dazu:

- Entwicklung einer nicht energiebasierten Zugererkennung, die unabhängig von der Zuggeschwindigkeit ist.
 - Ein möglicher Ansatz wäre, die Zugkanten durch Mustererkennung zu erkennen. Das wäre präzise und unabhängig von Geschwindigkeit oder Gleisabstand. Evtl. ließe sich sogar der Gleisabstand daraus bestimmen.
- alternativ deutliche Verbesserung der energiebasierten Zugererkennung, z.B.
 - Frequenzbänder statt nur Hochpassfilter
 - Einteilung der Erkennung in mehrere Energieklassen (hoch, mittel, niedrig) => Es werden mehrere Kanten mit unterschiedlicher Energie erkannt.
 - Der Zugverfolgungsalgorithmus schätzt auf Basis der bisherigen Energielevel und der aktuellen Geschwindigkeit eines Zugs, welche Energieklasse als nächstes erwartet wird. Die Kante der erwarteten Energie wird dann verwendet.
 - Verbesserung des dynamischen Modells (Filters) im Zugverfolgungsalgorithmus.

- Kompensation des Einflusses des Abstands von Gleis zu Glasfaser => Gleichschalten der Gleise.
- Kompensation der Einflüsse der Infrastruktur.

8 Ground Truth Technologien

8.1 Management Summary

Die Ermittlung der «Ground Truth» ist eine wesentliche Komponente der «PoC Experimental Data Processing» Plattform. Sie dient der Ermittlung des tatsächlichen Fahrweges und zum direkten Vergleich von Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit verschiedener (Lokalisierungs-)Sensoren und deren Kombinationen.

Im Zuge des PoC werden für die «Ground Truth» aufbauend auf Daten aus Stellwerk und Leittechnik («BigData Anabel» System) und auf Basis der Sensoren des Telekommesswagens mewa12 (www.railcom.org) eine hoch genaue Trajektorie (geographisch und topologisch) ermittelt. Die dafür notwendigen Verfahren wurden bzw. werden eigens im PoC entwickelt.

8.2 Ausgangslage und Zielsetzung

Um verschiedene Lokalisierungstechnologien effektiv vergleichen zu können, wird eine möglichst exakte Referenz benötigt. Diese Referenz – oder «ground truth» – soll den Verlauf des wahren Zustandsvektors (Ort, Ortsänderungen, Lage im Raum und Zeit) möglichst entsprechen d.h. der bzw. die Fehler sollen möglichst klein und bekannt sein.

Als Referenz bieten sich für GLAT zwei Möglichkeiten an:

- 1) die Nutzung von Daten aus dem Stellwerk und der Leittechnik, um den Fahrweg des Zuges in Ort(-änderung) und Zeit zu rekonstruieren, und
- 2) die Nutzung von Daten aus den zu evaluierenden Sensoren in Kombination mit einer exakten Karte in einem «post processing».

Der Vorteil der ersten Möglichkeit liegt in einer Unabhängigkeit der Referenz von den zu evaluierenden Sensoren, der Nachteil bisweilen, dass die Daten aus dem Stellwerk in Dichte und Genauigkeit (insbesondere Ort und Zeit) lückenhaft sind.

Der Vorteil der zweiten Möglichkeit liegt in einer großen Dichte und durch «post processing» sehr genauen Bestimmung des Verlaufes des wahren Zustandsvektors und Fahrweges (in Kombination mit einer geographischen und topologischen Projektion auf die Gleiskarte), der Nachteil in der Verwendung der gleichen Datenquellen für Messgrößen und Referenz wenigstens plausibilisiert durch eine Karte, die wiederum mit Fehlern behaftet sein kann.

8.3 Erkenntnisse

Die Kombination der beiden Methoden liefert für die Zwecke von GLAT die besten Ergebnisse und in Folge für den CENELEC Prozess eine brauchbare und notwendige «ground truth»

Die Generierung der «ground truth» und Evaluierung der Sensoren bzw. Sensorkombinationen (siehe Train Transponder und TrainEnd Transponder) muss weitestgehend automatisch erfolgen, um große Datenmengen ökonomisch verarbeiten zu können.

Im Rahmen des CENELEC Zulassungsprozesses wird bedingt durch SIL4 und neue Technologien ein großer Aufwand in der Evaluierung und Dokumentation entstehen.

An dieser Stelle muss mit den Zulassungsstellen und Lieferanten effektiv zusammengearbeitet werden.

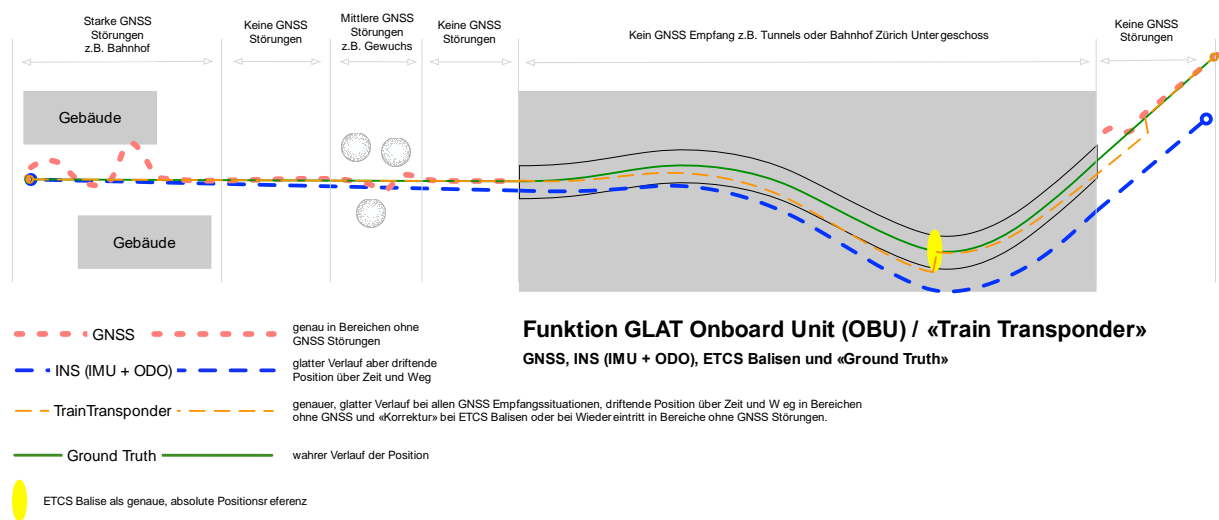


Abbildung 8-1: Zusammenhang "ground truth", GNSS, INS und ETCS Balisen

Die obige Grafik zeigt den Zusammenhang zwischen «ground truth», GNSS, INS (IMU + ODO) und ETCS Balisen in einem typischen Bahnumfeld. Durch ein optimales Kombinieren von Technologien entsteht ein robustes, sicheres Lokalisierungssystem, dessen Eigenschaften im Rahmen des PoC in Bezug auf die Genauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit aufgearbeitet wird.

Die folgende Grafik zeigt ein Beispiel zur «ground truth» anhand einer Gotthard Passage Nord > Süd im Rahmen einer Messfahrt mit dem mewa12. Am südlichen Portal beträgt der Fehler quer zum Gleis ca. 5 Meter. Eine Stützung der Trägheitsplattform durch integritätsbewehrtes GNSS erfolgt erst ca. 1,8 km nach dem südlichen Portal bei guten, stabilen GNSS Bedingungen.

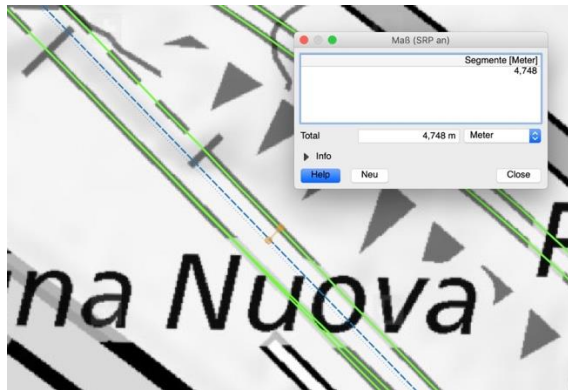


Abbildung 8-2: Beispiel "ground truth" GBT (Strecke)

8.3.1 Fahrwegermittlung mit Daten aus dem Stellwerk

Die gleisgenauen Fahrwege jedes mit einer Zugnummer versehenen Zuges werden über die Stellwerksinformationen wie Leittechnik und IT-Dispositionssystem der Big Data Plattform „ANABEL“ geliefert. In Kombination mit den Inventardaten zu den Gleisverläufen ist damit die „laterale Ground Truth“ bekannt. Das System liefert in geringer Dichte auch longitudinale Informationen, insbesondere wenn Blockgrenzen überschritten werden. Eine Herausforderung ist die Bereitstellung einer genauen Zeitreferenz bei der Überschreitung der Blockgrenzen.

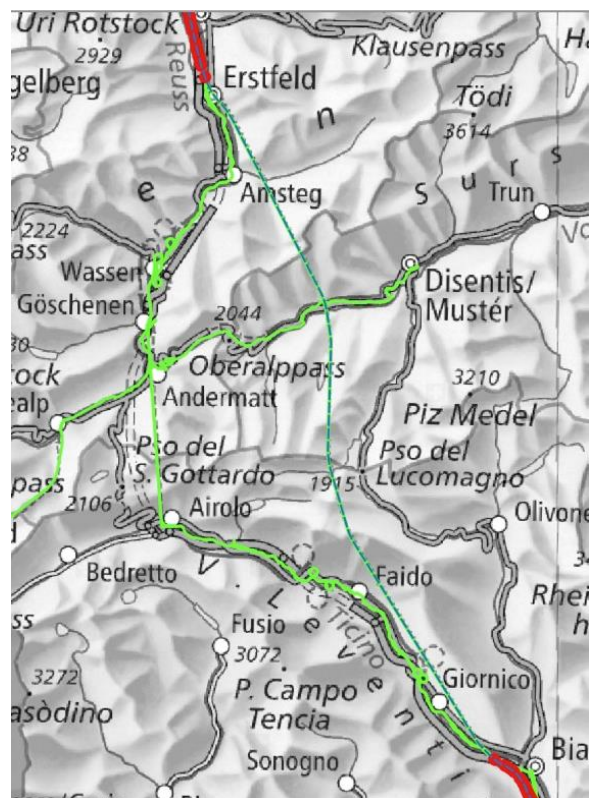
8.3.2 Nutzung von Daten aus den zu evaluierenden Sensoren in Kombination mit einer exakten Karte

Im Rahmen der Ermittlung der «ground truth» wurde ein Verfahren zur Rekonstruktion des Fahrweges entwickelt, das es erlaubt, anhand der Lokalisierung – Kombination GNSS/IMU/Odometrie – auf den Fahrweg zu schließen (ähnlich der «Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)» Verfahren in der Robotik).

Das Verfahren basiert auf exakter Lokalisierung in Kombination mit «map- und topologie matching». An dieser Stelle kommt eine exakte digitale Karte zu Anwendung, die einerseits die Geographie als auch die Topologie des Gleisverlaufes enthält.

Die erreichbare Qualität der Fahrwegermittlung auf Basis exakter Lokalisierung ist ein Gradmesser für die Umsetzbarkeit von Lokalisierungs-Technologien im Rahmen der PoC und als Grundlage für den CENELEC Prozess.

Abbildung 8-3: Beispiel "ground truth" GBT (Abweichung nach 57 km)



8.4 Offene Punkte

Die Arbeiten zum Aufbau einer «Big Data» Plattform zur automatisierten Generierung der «ground truth» und Evaluierung von Sensoren und Anwendungen (siehe Train Transponder und TrainEnd Transponder) haben im Rahmen des PoC begonnen.

Neben den eigentlichen GLAT Technologien stellt eine «Big Data» Plattform zur effektiven Unterstützung der CENELEC Zulassung eine Schlüsselfunktion dar, die in dieser Form bisweilen nicht existiert aber notwendig ist.

8.5 Zulassung

Neben der eigentlichen Zulassung von Sensoren und Anwendungen (siehe Train Transponder und TrainEnd Transponder) wird auch die «Big Data» Plattform zur automatisierten Generierung der «ground truth» und Evaluierung eine Zulassung erfordern bzw. muss in einen Zulassungsprozess mit eingebunden sein.

8.6 Weiteres Vorgehen

- Realisierung «Big Data»; diese steht derzeit am Beginn.
- Konzept zur Einbindung in den CENELEC Prozess (SBB, Behörde und Lieferanten) und Unterstützung der Zulassung.
- Mit Beginn der eigentlichen CENELEC Phasen müssen die Arbeiten/Aufgaben/Lieferleistungen der Lieferanten auch mit dem Hinblick auf die Einbindung der Komponenten in den Zulassungsprozess (i.e. «Big Data») spezifiziert und organisiert werden. D.h. der Zulassungsprozess ist integrativer Bestandteil des Lieferprozesses und der Projektorganisation!

9 Sensorfusionen: GNSS, IMU, Odometrie, Ground Truth

9.1 Management Summary

Mit der Zunahme der Sensoren und der Datenquellen explodiert die Anzahl Fusionsmöglichkeiten. Eine gründliche Betrachtung deren Eigenschaften in Bezug auf Systemdesign, erwartete operative Performanz und Integritätsprüfung hilft, das Untersuchungsfeld zu reduzieren.

9.2 Zielsetzung

Die Aktivitäten um die Problematik Fusion dienen der Orientierung in einer Vielfalt von Möglichkeiten. Nach einem Überflug der Grundlagen der für GLAT relevanten Fusionsmethoden werden die Auswirkungen kritischer Designentscheide bemessen. Auswertungen des Beitrages bestimmter Technologien in einer fusionierten Lösung werden demnächst durchgeführt.

9.3 Ausgangslage

9.3.1 Grundlage

Die Sensor Fusion ist der funktionale Block, der Daten von mehreren Quellen zusammen nutzt. Sie soll das Kompromiss zwischen Integrität, Verfügbarkeit und Genauigkeit der Lokalisierung optimieren.

Die Datenquellen, die für die Lokalisierung betrachtet werden, lassen sich in zwei Gruppen aufteilen: *absolute* und *relative* Datenquellen. Absolute Informationen beziehen sich auf einen globalen Referenzrahmen – ein geografisches Koordinatensystem oder ein bahnnetzbezogenes Koordinatensystem. Relative Informationen beziehen sich auf eine vorherige Position oder Lage des lokalisierten Objektes. Zu absoluten Informationsquellen zählen unter anderen Eurobalisen, GNSS Beobachtungen, Map Matching, optische Lesung referenzierter Tags, Erkennung von stabilen Signaturen (Erdmagnetfeldstörungen, Ground Penetration Radar), Funkortung und Erfassung durch gleisseitige Ausrüstung. Zu relativen Informationsquellen zählen primär Odometrie (Rad, Radar, Doppler, Wirbelstromsensor, optisch) und Inertialsensoren.

Datenquellen lassen sich auch in 1D und 3D aufteilen. Ein Odometer ist typischerweise ein 1D Sensor, während GNSS und 6- oder 9-Achsen Inertialsensoren im 3D Raum rechnen. Das Zusammenbringen von 1D und 3D Daten benötigt eine Gleiskarte, es sei denn, 3D Daten werden zu 1D degradiert.

In der Sphäre der GNSS-gestützten Koppelnavigation wird von tight, ultra-tight und lose Kopplung geredet. Die Begriffe beziehen sich auf die Art der GNSS Beobachtungen, die mit den inertialen Messungen fusioniert werden. Je näher am GNSS Frontend, desto enger die Koppelung aber desto geringer die Chance, COTS Komponenten zu verwenden.

In der Koppelnavigation werden oft Filter verwendet. Das bekannteste ist das Kalman Filter, das mehrere Varianten und Alternativen kennt. Das Prinzip nähert sich einer State Maschine. Ein Filter hat in einem Moment t_n einen Zustand – typischerweise Positions- P , Geschwindigkeitsvektor V und systembedingte Parameter, inklusive Varianzen. Anhand des Zustands und Annahmen zur Systemdynamik erfolgt eine kurzfristige Prädiktion des nächsten Zustandes. In der Anwesenheit von neuen Messungen werden diese zur Korrektur des Zustandes verwendet.

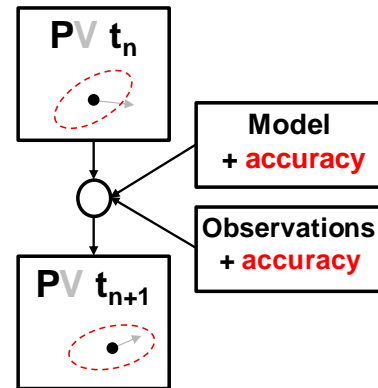


Abbildung 9-1 : Prädiktion und Korrektur

Natürlich kann auch Fusion algorithmisch ohne Kalman Filter erfolgen. Für eine gute Selektivität in der Fehlerdetektion ist es aber wichtig, dass Varianzen oder Konfidenzintervalle zusammen mit dem Zustandsvektor gepflegt werden.

9.3.2 Beispiele

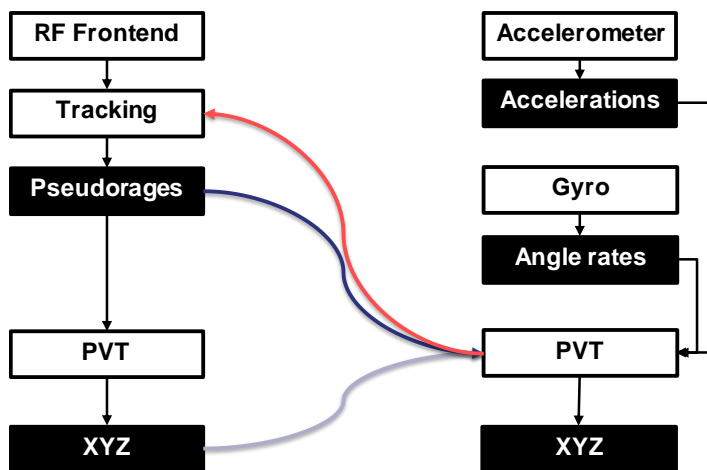


Abbildung 9-2 : Lose (hellblau), enge und ultra-enge (rot) Kopplung zwischen GNSS Empfänger und Inertialsensor

Abbildung 9-2 zeigt die möglichen Kopplungen zwischen Inertialsensor und GNSS Empfänger. Die ultra-enge Kopplung (in rot) erlaubt einen Einfluss des inertialen Sensors auf das Tracking des GNSS Signals, was eine frühe Detektion von Cycle Slips ermöglicht. Dieser technische Vorteil ist aber nur auf spezifischen zusammenentwickelten Systemen zu finden. Hingegen ist die lose Kopplung (hellblau)

zwischen zwei COTS Komponenten immer möglich. Die dazwischenliegende enge Kopplung benötigt komplexere Filter auf der rechten Seite, sie bietet aber eine frühe Fehlerdetektion an, die die Verfügbarkeit erhöhen soll. Sie ist jetzt mit der Mehrheit der Consumer Grade GNSS Empfänger möglich.

Unter Map Matching können unterschiedliche Vorgehensweisen gemeint werden: die einfache Projektion eines Punktes auf dem Gleis (links in Abbildung 9-3) oder die Erkennung der Form des Gleises (rechts). Die zweite Variante ermittelt eine absolute Position anhand von relativen Inertialmessungen und Karte. Sie kann auch die Überhöhung als Signatur verwenden.

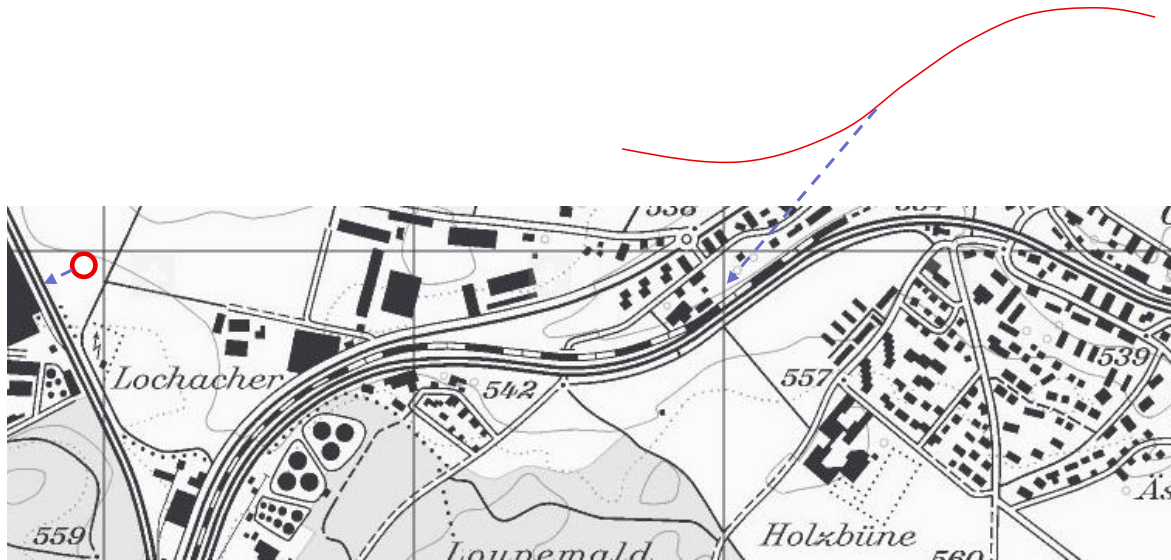


Abbildung 9-3 : Map Matching

Abbildung 9-4 und Abbildung 9-5 zeigen respektiv 3D und 1D Fusion zwischen GNSS und Inertialsensor. Die Pseudoranges sind die Beobachtungen, die von einem GNSS Empfänger kommen.

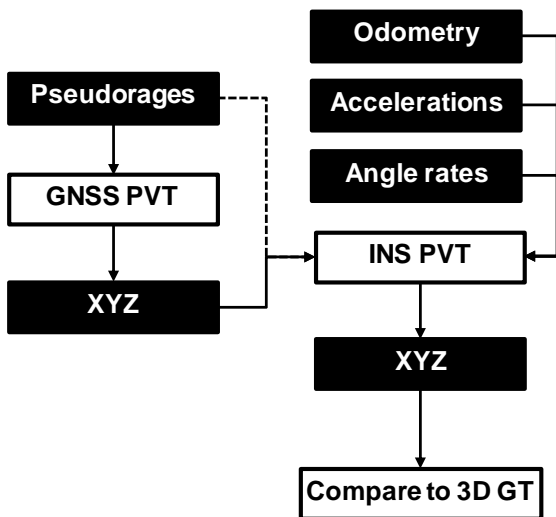


Abbildung 9-4 : GNSS INS Fusion in 3D

zur 3D Fusion einen besseren Kompromiss Integrität/Verfügbarkeit anbieten. Implizit erfolgt die Weichenlagedetektion mittels Inertialmessungen, mittels eines Wahrscheinlichkeitstests, oder mittels gleisseitiger Information.

Die Möglichkeit besteht, eine bordseitige Gleiskarte zur 3D Fusion zu addieren. Sie dient dann gleichzeitig der Erhöhung der Integrität und der

Die 3D Fusion erfolgt in einer engen oder in einer losen Kupplung. Die Methode ist nicht Bahn-spezifisch. Das Resultat ist ein 3D Koordinatenvektor. Idealerweise findet diese Fusion bordseitig statt, und die Koordinaten werden einem streckenseitigen GLAT Server übergeben.

Die 1D Fusion ist absolut Bahn-spezifisch und benötigt die Gleiskarte. In Theorie sollte sie aufgrund einer höheren Redundanz im Vergleich

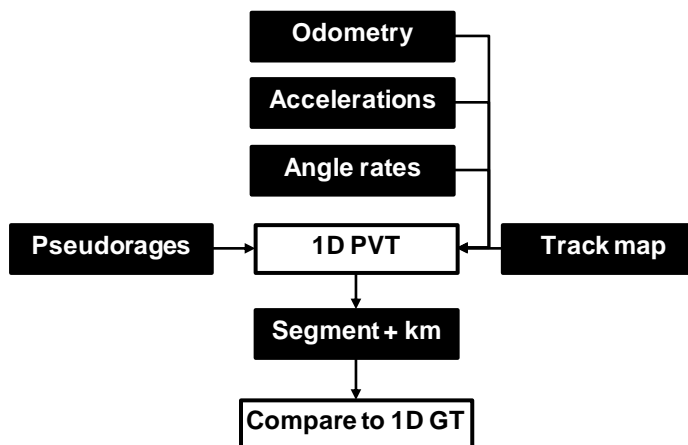


Abbildung 9-5 : GNSS INS Fusion in 1D

Konversion in die 1D ERTMS Welt. Obwohl nicht die allereffizienteste, ist diese Lösung sehr flexibel, indem sie COTS Komponenten gebrauchen kann.

9.4 Betrachtungen

Die Fusion GNSS und Odometer kann ohne Karte erfolgen, wenn von GNSS nur der Geschwindigkeitsvektor verwendet wird. Diese Fusion dient der *Verbesserung der Odometrie*.

Mit Karte erfolgt die Fusion GNSS und Odometer im 3D Raum. Rein theoretisch genügt sie, um im Netz zu navigieren, vorausgesetzt die Gleisselektivität kommt von GNSS oder von der Gleisseite.

Die 3D Fusion GNSS, Inertialsensor und Odometer ist in den Proof-of-Concepts bevorzugt. Sie braucht viele Sensoren, bietet dafür eine hohe Flexibilität in deren Auswahl. Sie eignet sich für Integritätsprüfung. Die Karte (bzgl. die Weichenlage) ist notwendig, wenn die GNSS Performanz zu niedrig ist, wenn Map Matching angewandt wird, oder wenn eine Transformation der Position in 1D für ETCS durchgeführt wird. Wenn die Gleisselektivität nicht bewiesen werden kann, sind Eurobalisen bzgl. gleisseitige Informationen notwendig.

9.5 Offene Punkte

Mit den in Big Data gesammelten Messdaten können Ansätze bewertet werden. Die Abwesenheit einer unabhängigen Sollposition erschwert aber das systematische und zuverlässige direkte Testen der Integrität der Lokalisierung.

9.6 Gesamtbewertung

Durch theoretische Betrachtungen ist die Anzahl der für GLAT einsetzbaren Fusionen begrenzt worden. Da im Jahr 2018 noch wenig Messdaten verfügbar waren, werden Auswertungen im Jahr 2019 stattfinden.

9.7 Weiteres Vorgehen

Auswertungen werden weitergeführt, basierend auf eine 3D Fusion von GNSS, INS und Odometer. Es wird versucht, den Beitrag von einzelnen Datenquellen zu charakterisieren, um die Performanz-Anforderungen an einzelne Komponenten zu ermitteln. Die Wirksamkeit der Integritätsprüfung wird weiter getestet.

10 Anwendung: GLAT Onboard Unit (OBU) Train Transponder

10.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Aufbauend auf den Erkenntnissen und Ergebnissen des Projektes GLAT Phase 0 hinsichtlich «Use Cases», der Arbeitshypothese zur Architektur und möglicher Sensoren sowie Kombinationen, soll die Leistungsfähigkeit einer GLAT Onboard Unit (OBU) durch geeignete Modellierung gestützt auf Empirie technologisch abgeschätzt werden.

Die folgende Grafik zeigt exemplarisch zwei «Use Cases», die Gleisfreimeldung und die Lokalisierung der Zugposition mit den Anforderungen an den SIL Level, die Genauigkeit (in Bezug zum Gleis), die «Mean Time To Failure (MTTF)», die «Mean Time To Recover (MTTR)», die Verfügbarkeit und die Latenz. Die angegebenen Werte sind im Kontext des sich in Entwicklung befindenden Gesamtsystems von smartrail 4.0 noch nicht final verifiziert.



Use Case Nr	Lokalisierungsobjekt	SIL	Genauigkeit	MTTF	MTTR	Verfügbarkeit	Latenz o. Periode
1.1	Gleisfreimeldung (GFM)	SIL3/ SIL4	$x \leq 66,4 \text{ m R}$ $y \pm 1,5 \text{ m R}$	1 Jahr	0,5h	0,9999375	1s
1.2 – 1.7 8.1 – 8.2	Zugposition Fahrzeuge	SIL 3	10 m R	1 Jahr	0,5h	0,9999375	0,5 s 0.5 s

Abbildung 10-1: Integrity "Cuboid"

Der Begriff «TrainTransponder» entsteht aus einer Analogie zur Flugsicherung. Der ETCS Balisenleser in Kombination mit der Balise ist vergleichbar einem modernen Mode S Transponder in der Luftfahrt (siehe: https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_surveillance_radar#Mode_S). In beiden Fällen wird über den Austausch von Radiotelegrammen der geographische Ort des zu lokalisierenden Objektes (Flugzeug, Zug) ermittelt, der wiederum für die Freigabe zur Befahrung/Befliegung eines definierten Weges (Abschnittes) notwendig ist.

In der Flugsicherung wird der Mode S Transponder neuerdings durch GNSS basierte Lokalisierung ergänzt (ADS-B), was wiederum zu geringeren Staffeln und damit besserer Ausnutzung der Lufträume führen wird (siehe: https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_dependent_surveillance_-_broadcast).

Entscheidend in der Analogie ist der Umstand, dass GNSS in Kombination mit Multilateration zum Einsatz kommen wird. Das erlaubt bekannte Schwachpunkte von GNSS zu kompensieren (siehe: <https://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration>). D.h. die Sensorik GNSS wird mit einer diversitären, begleitenden Überwachungsfunktion versehen, exakt demselben Ansatz folgend, wie er für die GLAT Architektur angenommen wird.

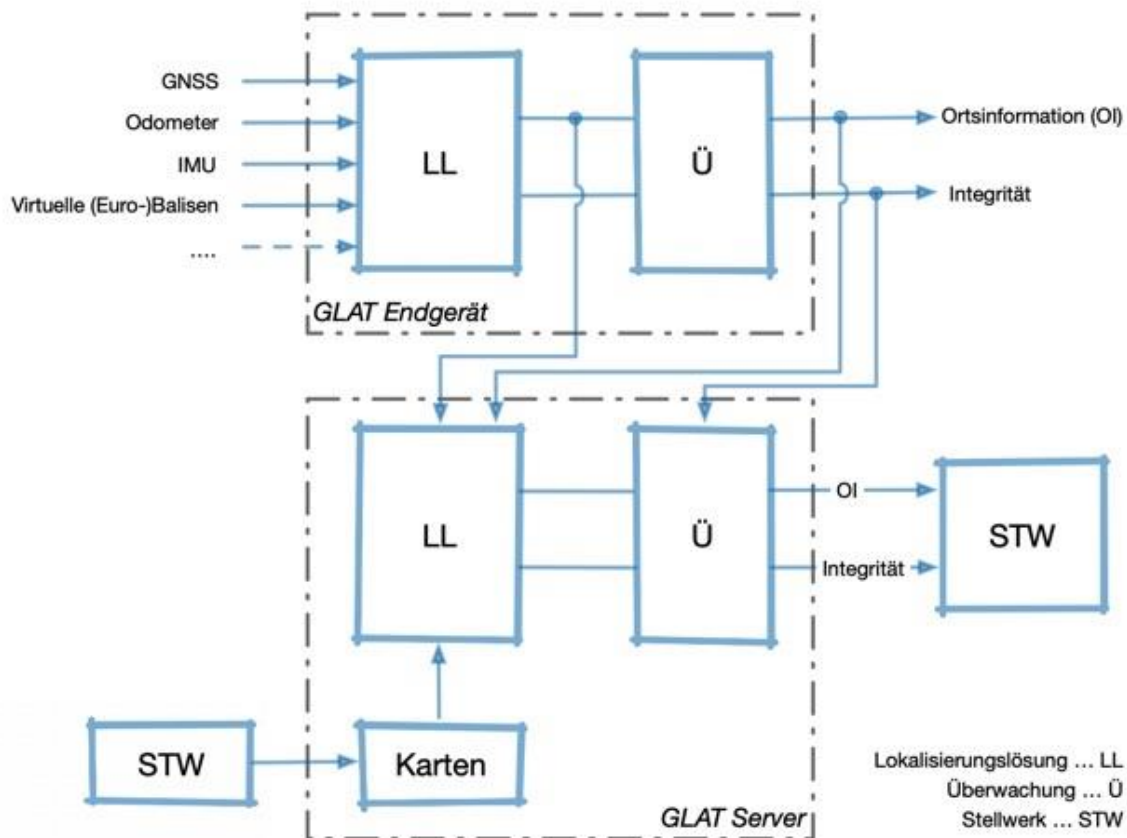


Abbildung 10-2: GLAT Architektur (1)

Für die GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. den Train Transponder wird im Rahmen der PoC, aufbauend auf den Sensoren GNSS, Trägheitsnavigation (~IMU) und Odometrie unter Bezug auf die Gleiskarte die

- Genauigkeit, und
- Verfügbarkeit

pro Streckenabschnitt – im Sinne einer «available navigation performance» - modelliert. Auf dieser Basis soll die Notwendigkeit von ETCS Balisen Infrastruktur oder Alternativen sowohl geographisch als auch mengentechnisch abgeschätzt werden. Das folgende Bild veranschaulicht das Vorgehen.

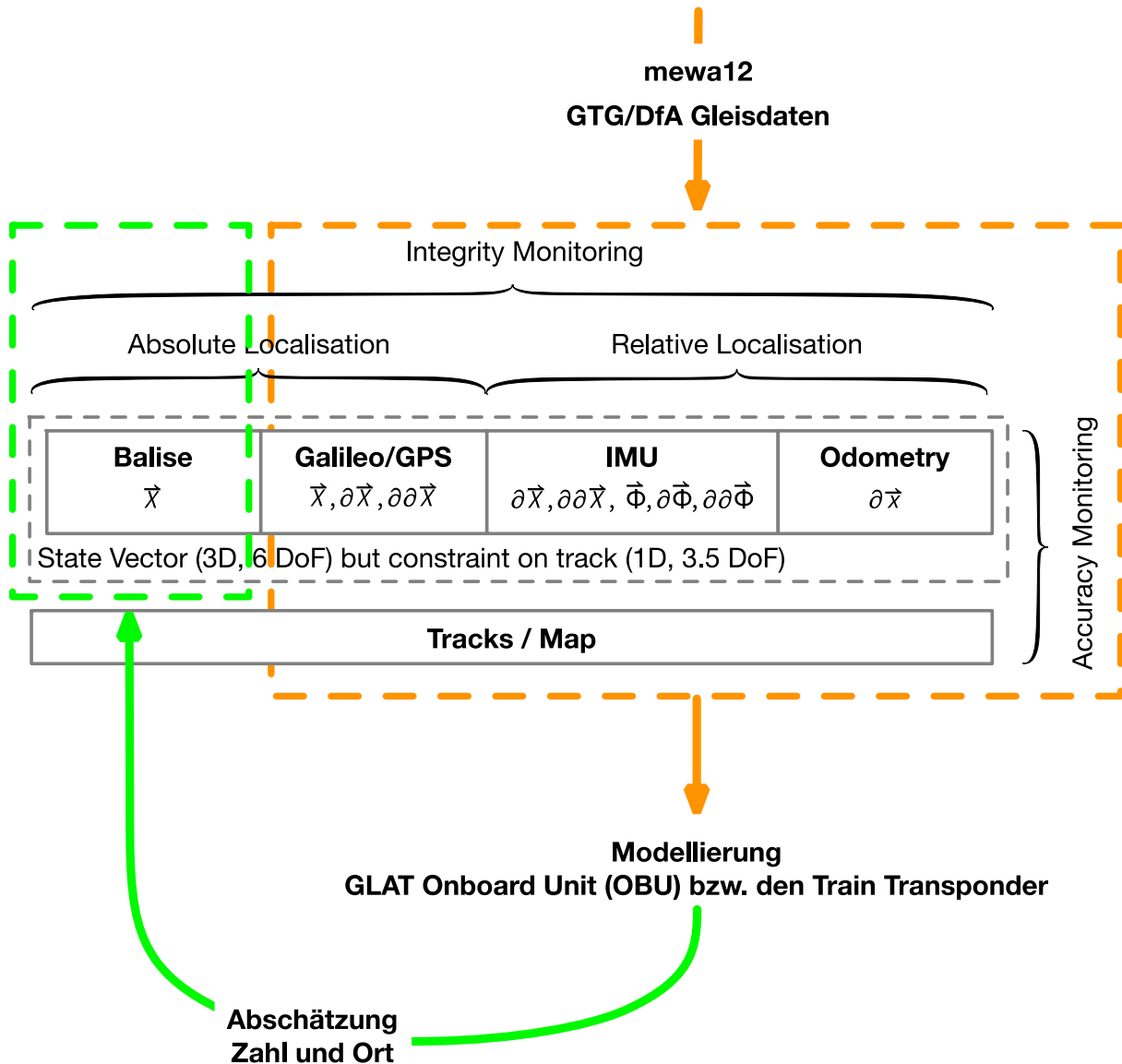


Abbildung 10-3: GLAT Architektur (2)

10.2 Erkenntnisse

- Die ersten Auswertungen der Daten mit der Kombination der Sensoren aus dem mewa12 zeigen konsistent gute, vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Verfügbarkeit (siehe Kapitel GNSS, Trägheitsnavigation und Odometrie).
- Das Kartenmaterial für die Modellierung liegt mit GTG bzw. MUD/DfA vor und kann als Grundlage für die Abschätzung der Genauigkeit der Lokalisierung herangezogen werden (siehe Blockdiagramm „PoC Experimental Data Processing“ – Block 15).

- Unsicherheit besteht in der Odometrie hinsichtlich angetriebener Achsen und dem damit verbundenen Schlupf.
- die Einbindung des GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. den Train Transponder in die bestehende ETCS Struktur in Bezug auf die Odometrie (Rückwirkungsfreiheit).

10.3 Weiteres Vorgehen

Im Block 14 des Blockdiagramm „PoC Experimental Data Processing“ wird als Lösung (2) «INS fusion forward trajectory» die GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. der Train Transponder experimentell entwickelt und anschließend als Modul «Big Data» umgesetzt.

In Folge werden im Block 21 und 22 die notwendigen geospatialen Berechnungen durchgeführt und daraus die «Available Navigation Performance (ANP)» auf dem Gleisnetz in Bezug zu «Required Navigation Performance (RNP)», die wiederum aus den Use Cases der GLAT Phase 0 abgeleitet werden, hochgerechnet. Auch diese Funktionalität wird nach einer experimentellen Entwicklung in ein «Big Data» Modul übergeleitet bzw. implementiert.

Das Ergebnis stellt der Block 24 als geostatistisches Information Systems (in «BigData») dar, der es erlaubt, gleiskartenbasiert Auswertungen und Darstellungen auf Ebene einzelner Fahrzeuge oder Fahrten bis zur aggregierten Flotte und Gleiskarte über die Zeit vorzunehmen und zu dokumentieren.

11 Anwendung: GLAT Zug Ende Tag (ZET) / TrainEnd Transponder

11.1 Management Summary

Da die Bestimmung der Zuglänge und insbesondere die Sicherstellung der Zugintegrität entscheidend für die Lokalisierung des Zuges sind, kommt dieser Anwendung im Rahmen des PoC ein besonderer Stellenwert zu.

Es werden zwei technische Ansätze für ein «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» untersucht:

- eine GNSS/(IMU) Einheit anstelle des heutigen Zugendsignals, und
- eine integrierte GNSS/Trägheitsplattform (IMU + Odometrie) angebracht an der Radachse.

Für den ersten Ansatz wurden im Rahmen des PoC Messgeräte gebaut, erste Fahrten mit Güterzügen durchgeführt und die Daten analysiert. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass eine relativ genaue Lokalisierung des Zuges möglich ist und die Bestimmung der Zuglänge jedenfalls die Gleiskarte benötigt. Die Hauptproblematik liegt in der mäßigen Verfügbarkeit der Lokalisierung (schlechte IMU, keine Odometrie), Sicherstellung der Integrität und die Notwendigkeit, ein derartiges Gerät mittels Akkus zu versorgen.

Der zweite Ansatz löst die Problematik der Stromversorgung (Generator an der Achse, Stützakku mit Energiemanagement), integriert eine gute Trägheitsplattform (IMU + Odometrie), bedeutet aber für GNSS potentiell widrige Bedingungen aufgrund der schlechten Position der Antennen (an der Radachse). Im Rahmen PoC wird in mehreren Phasen ein Funktionsmuster für diesen Ansatz entwickelt und getestet. In der ersten Phase (bis April 2019) werden bei Versuchsaufbauten mit einem Güterwagen vor allem die Empfangscharakteristiken von GNSS untersucht. Sind diese zufriedenstellend (lösbar), hat der Ansatz das Potential, eine ähnliche Leistungsfähigkeit wie eine GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. Train Transponder zu erbringen, wenn auch mit Einschränkungen bei der Verfügbarkeit, weil ETCS Balisen als absolute Positionsreferenz entfallen.

11.2 Ausgangslage und Zielsetzung

Neben einer genauen, sicheren und hoch verfügbaren Bestimmung der Zugposition durch eine GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. den Train Transponder muss bekannt sein, wo ein Zug beginnt und wo er endet, d.h. parallel zur Lokalisierung des Zuges muss die Zuglänge permanent bestimmt werden.

Die Bestimmung der Zuglänge hat zwei Aspekte, die Bestimmung der Zuglänge an sich und das Sicherstellen der Zugintegrität, d.h. sicherzustellen, dass sich durch z.B. Abkopplung eines oder mehrerer Wagen die Zuglänge nicht ändert. Im Rahmen des PoC wird untersucht, inwieweit eine Kombination der in den Kapiteln zuvor dargestellten Sensoren alleine oder in Kombination in der Lage ist, die Zuglänge zu bestimmen und die Zugintegrität sicherzustellen.

Im Rahmen des PoC werden zwei technische Ansätze für ein «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» untersucht:

- eine GNSS/(IMU) Einheit anstelle des heutigen Zugendsignals (Variante 1), und
- eine integrierte GNSS, Trägheitsplattform (IMU + Odometrie) angebracht an der Radachse (Variante 2).

Die Bestimmung der Zuglänge kann über einen Vergleich der geographischen bzw. topologischen¹ Position des ersten Fahrzeuges und des letzten Fahrzeuges einer Zug-Komposition anhand einer Gleiskarte erfolgen. Der Bezug auf die Gleiskarte ist notwendig, um bei langen (Güter-)Zügen veränderliche Längen durch Kurven richtig zu erfassen.



Abbildung 11-1: Zug Ende Tag Variante 1

Die Bestimmung der Zugintegrität kann über einen Vergleich der Geschwindigkeiten des ersten und letzten Fahrzeuges mit der Annahme, dass diese bei einem integren Zug im Mittel gleich sein müssen, erfolgen. Bei diesem Ansatz ist kein Bezug zur Gleiskarte notwendig.

Inwieweit diese Ansätze praktikabel, welche Wertebereiche für Länge und Geschwindigkeiten(-differenzen) notwendig und wie diese genau, sicher und hoch verfügbar zu ermitteln sind, ist Gegenstand des PoC.

Die große technische Herausforderung ist, dass eine Zuglängenbestimmung und Zugintegrität bei allen Fahrzeugen und Kompositionen für in- und ausländische Züge möglich sein muss.

Vor diesem Hintergrund ist die Realisierung eines «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» im Bereich Lokalisierung die größere Herausforderung als die Realisierung einer GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. Train Transponders.

¹ d.h. bezogen auf das Gleis.

Die «GNSS/(IMU) Einheit angebracht anstelle des heutigen Zugendsignals» (siehe Abb. oben) wurde mittels der Kombination einer GNSS Einheit angebracht an einer eigens im Rahmen PoC entwickelten Haltevorrichtung für das Zugendsignal realisiert.

Die GNSS Einheit ist mit einem Knopfdruck ein- und auszuschalten, zeichnet im Betrieb permanent GNSS L1 Rohdaten für die Systeme GPS, GLONASS und GALILEO sowie EGNOS auf und speichert sie für ein «post-processing» auf einer integrierten Speicherkarte.

Die ebenfalls in der Einheit integrierte Batterie erlaubt ca. 30 Stunden permanenten Betrieb der Einheit für die Datenerfassung.

In der Einheit ist ein «low cost / low quality» IMU integriert, der bisweilen aber noch nicht genutzt wurde, weil die Software dafür (noch) nicht verfügbar ist.

Die Haltevorrichtung wurde so entworfen, dass Zug- oder Lokführer diese möglichst rasch (mit einer Hand) und sicher an der Zugendsignal-Haltevorrichtung anbringen und entfernen können.

Die Lösung «integrierte GNSS, Trägheitsplattform (IMU + Odometrie) angebracht an der Radachse» stellt technisch gesehen zwar kein komplettes Novum dar, ist aber in ihrer geplanten Realisierung, nämlich komplett integriert in den Radlagerdeckel, und bezüglich der Anforderungen an Genauigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit eine technische Innovation.

Die Besonderheit dieses technischen Ansatzes liegt vor allem auch in der elektrischen Versorgungssicherheit der Einheit mittels eines an der Radachse angebrachten Generators. Der Generator versorgt während der Bewegung des Fahrzeuges die Einheit mit Strom. Ein Akku sorgt in Kombination mit intelligentem Energiemanagement für die Versorgung der Einheit während des Stillstandes.

Die Lösung «integrierte GNSS, Trägheitsplattform (IMU + Odometrie) angebracht an der Radachse» wird in drei Phasen als Funktionsträger realisiert und getestet:

- in der Phase 1 wird in einem vereinfachten, d.h. noch nicht hochintegrierten Aufbau, die Verfügbarkeit und Genauigkeit von GNSS mit der Antenne direkt angebracht am Radachsendeckel untersucht. Zwei Antennentypen und verschiedene Winkel der Anbringung (45°, 90°) werden im Betrieb getestet. Der Radachsengenerator dient in dieser ersten Phase nur zu Anbringung eines Hall Sensors für die Odometrie. Es wird Strom erzeugt, aber nicht zur Versorgung der Einheit genutzt. Die akkugestützte Stromversorgung sowie die Trägheitsplattform und die Recheneinheit werden in einer Box auf der Ladefläche eines Güterwagens angebracht. Wenn diese ersten Tests hinsichtlich Genauigkeit und Verfügbarkeit der Lösung innerhalb der Anforderungen für die Bestimmung der Zuglänge und Integrität liegen, werden
- in einer Phase 2 Designoptionen hinsichtlich der Integration aller Komponenten in ein Radlagergehäuse bei Einhaltung der Bestimmungen und des Lichtraumprofils geprüft und wenn konstruktiv lösbar und wirtschaftlich sinnvoll,
- in einer Phase 3 ein integrierter Funktionsträger hergestellt und im laufenden Betrieb mit allen Funktionalitäten (Genauigkeit, Sicherheit, Verfügbarkeit und Energiemanagement) getestet.

Die folgenden Grafiken zeigen den für das Funktionsmuster vorgesehenen Achsgenerator und den Aufbau des Radachsendeckel mit GNSS Antenne aus dem CAD Entwurf.



Abbildung 11-2: Zug Ende Tag Variante 2

Zur Analyse der Daten für die beiden technische Ansätze für ein «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» wurde mit der Entwicklung eines Programms für die experimentelle Auswertung der Daten und Modellierung von Genauigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit mittels Wolfram Mathematica begonnen.

Die daraus entstehenden Module werden wie zuvor in «Big Data» übernommen. Der Verarbeitungsschritt 3 im Blockdiagramm „PoC Experimental Data Processing“ zeigt das Einbringen der Daten der «GNSS/(IMU) Einheit angebracht anstelle des heutigen Zugendsignals» in die Auswertung.

11.3 Erkenntnisse

11.3.1 Design TrainEnd Transponder in zwei Varianten

Eine Realisierung eines «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» als elektronisches Zugendsignal macht die Notwendigkeit einer voraussichtlich akkugestützten Stromversorgung, wie bei PoC implementiert, notwendig und birgt damit operative und sicherheitstechnische Probleme. Auch lässt sich in dieser Variante ohne Odometrie keine hochwertige Trägheitsnavigation realisieren, was einerseits die Integritätsbestimmung von GNSS erschwert und andererseits das Überbrücken von Lücken d.h. «virtuelle» und physische Tunnels nicht gestattet.

Die Realisierung eines «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» an der Radachse eines Fahrzeuges erlaubt die oben angeführten Schwachstellen zu kompensieren und hat, vorbehaltlich ausreichendem GNSS Empfang, das Potential eine ähnliche Leistungsfähigkeit wie eine GLAT Onboard Unit (OBU) bzw. Train Transponder aber mit Einschränkungen bei der Verfügbarkeit zu erbringen, weil ETCS Balisen als absolute Positionsreferenz entfallen.

Eine integrierte GNSS, Trägheitsplattform (IMU + Odometrie) angebracht an der Radachse würde neben der Lokalisierungsfunktionalität auch Daten, die z.B. in den Bereichen Güterlogistik, Leerwagenlokalisierung, Diagnosedaten (Wage, Gleis), u.a. großen Wert haben, liefern. Das bedeutet, dass die Kosten dieser Lösung auf mehrere Anwendungen umgelegt werden könnten.

11.3.2 (Erste) Auswertungen zur Leistungsfähigkeit Transponder Variante 1

Die folgenden Beispiele zeigen exemplarisch Ergebnisse zur «GNSS/(IMU) Einheit angebracht anstelle des heutigen Zugendsignals» für eine Fahrt von Basel nach Brig. Dabei wurden zwei Einheiten, zet001 und zet002, an einem ca. 538 Meter langen Güterzug angebracht.

Die Einheit zet001 war vorne am ersten Fahrzeug hinter der Lok und die Einheit zet002 am letzten Fahrzeug angebracht (Foto unten).



Abbildung 11-3: zet 001



Abbildung 11-4: zet 002

Aus der Auswertung der GNSS Daten (PPP Verfahren) ergibt sich rechnerisch im Median eine Zuglänge von 536 Metern.

Die folgenden Grafiken zeigen den Verlauf der Positionen von zet001 (orange Punkte) entlang des Gleises (jeweils Bild links oben), den Höhenverlauf von zet001 (blaue Linie) und zet002 (orange Linie) über die verfügbaren Messpunkte (jeweils Bild rechts oben), die Geschwindigkeiten von zet001 (blaue Linie) und zet002 (orange Linie) sowie deren Differenz (grüne Linie) über die verfügbaren Messpunkte (jeweils Bild links unten) und die Länge des Zuges als Differenz der Positionen zet001 und zet002 ohne Berücksichtigung der Gleiskarte über die verfügbaren Messpunkte (jeweils Bild rechts unten).

Bei Verlassen des Bahnhofes in Basel (rechte Grafik) zeigt sich über den Verlauf der Geschwindigkeiten das Anfahren des Zuges und über den Verlauf der Länge, die Schwankungen, die sich bei Beschleunigungsprozessen aufgrund der Kupplungen proportional der Länge des Zuges ergeben. Beim Höhenverlauf von zet001 und zet002 zeigt sich die zeitliche Abfolge d.h. zet001 passiert eine leichte Steigung früher als zet002.

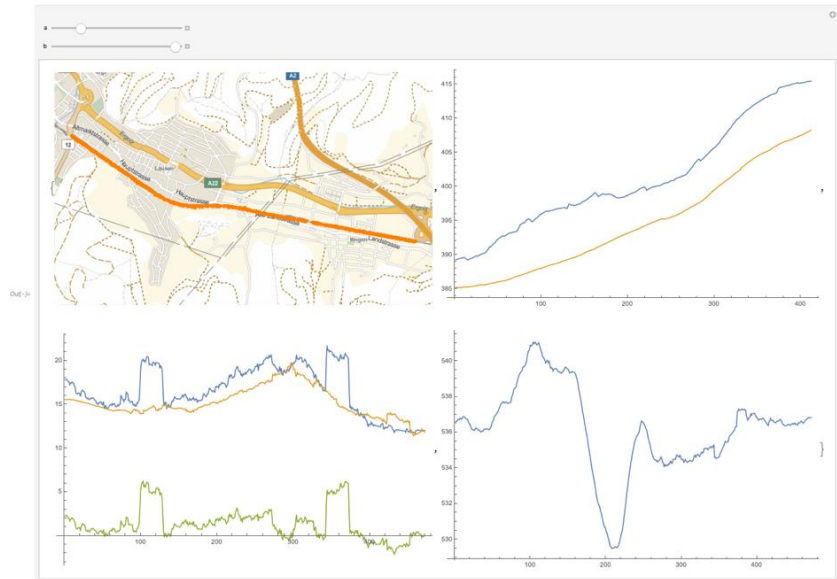


Abbildung 11-5: Teil-Messfahrt 1 mit ZugEndeTag / Verlauf Länge

Die nächste Grafik zeigt denselben Zug auf einem Streckenabschnitt mit Bebauung d.h. Bereichen mit GNSS Störungen. Zet001, das zwischen erstem Fahrzeug und Lok angebracht ist und daher fahrzeugbedingt schlechten GNSS Bedingungen ausgesetzt ist, zeigt in Bereichen mit Bebauung Unstetigkeit im Geschwindigkeitsverlauf. Die Variation in der Länge des Zuges entsteht durch den kurvigen Verlauf der Strecke.

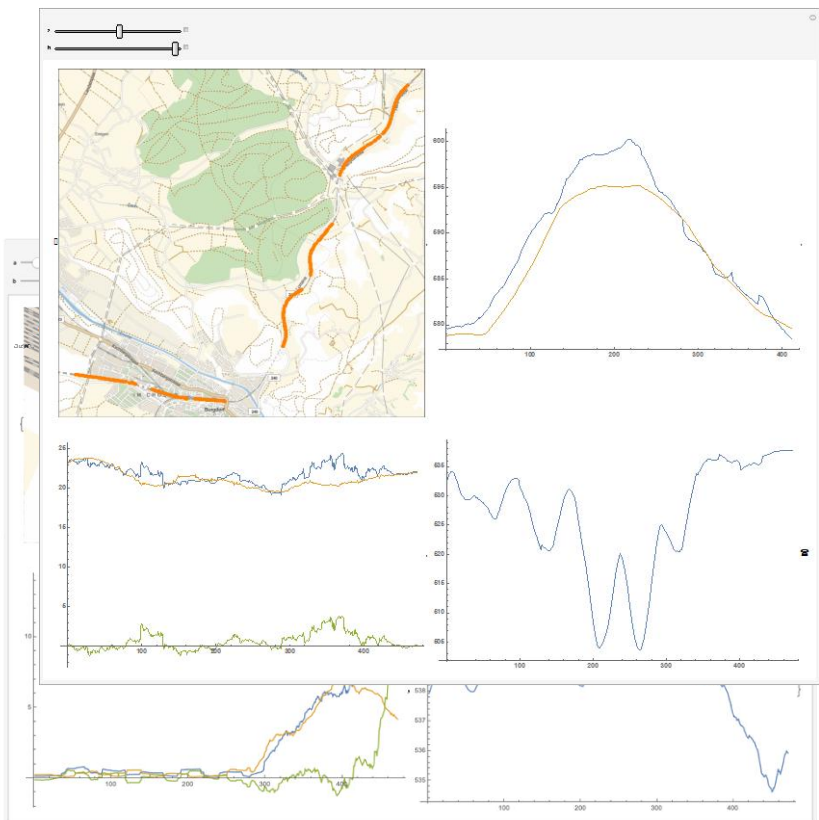


Abbildung 11-6: Teil-Messfahrt 1 mit ZugEndeTag / Verlauf Länge

Die abschließende Grafik zeigt einen Verlauf von Tunnels entlang einem kurvenreichen Streckenverlaufs. Der Verlauf der Geschwindigkeiten bei verfügbarem GNSS (Tunnels werden nicht als Lücken dargestellt, weil die x-Achse die verfügbaren Punkte und nicht die Zeit darstellt) ist relativ stetig, wobei zet002 erneut aufgrund besserer Empfangssituation einen ruhigeren Verlauf zeigt. Der Verlauf der Zuglänge zeigt die Schwankungen, die sich durch die (noch nicht) berücksichtigte Gleiskarte bei der Auswertung ergeben.

Der Verlauf der Geschwindigkeiten bei verfügbarem GNSS (Tunnels werden nicht als Lücken dargestellt, weil die x-Achse die verfügbaren Punkte und nicht die Zeit darstellt) ist relativ stetig, wobei zet002 erneut aufgrund besserer Empfangssituation einen ruhigeren Verlauf zeigt. Der Verlauf der Zuglänge zeigt die Schwankungen, die sich durch die (noch nicht) berücksichtigte Gleiskarte bei der Auswertung ergeben.

11.4 Weiteres Vorgehen

Die Arbeiten bei der Anwendung «GLAT Zug Ende Tag bzw. TrainEnd Transponder» haben im Herbst 2018 begonnen und die ersten Ergebnisse liegen vor. Im Laufe 2019 werden die Arbeiten, mit dem Ziel eine belastbare Aussage zur technischen Machbarkeit vorlegen zu können, fortgesetzt.

Die folgenden Aktivitäten stehen im Vordergrund:

- Fortführen der Datenerfassung und Auswertungen mit TrainEnd Transponder Variante 1,
- Einbinden der Auswertungen als Module in die «Big Data» Plattform,
- Projektsteuerung und Realisierung TrainEnd Transponder Variante 2.

12 Anwendung: sichere Zuglänge, Zugintegrität

12.1 Management Summary

Im Rahmen der Analyse von Veröffentlichungs- und Schutzrechtsdokumenten (Patente, Offenlegungsschriften, Gebrauchsmuster) wurden insgesamt 609 Dokumente gefunden und bezüglich der darin beschriebenen Möglichkeiten zur Bestimmung der sicheren Zuglänge und Zugintegritätsüberwachung ausgewertet. Bei den 609 Dokumenten handelt es sich um 195 Ergebnisse der Veröffentlichungsrecherche, die übrigen 414 Dokumente sind Schutzrechtsdokumente, die in drei Recherchedurchgängen gesammelt wurden. Die betrachteten Lösungsansätze sind rein theoretischer Natur oder Versuchsmuster.

Ausgehend von dieser Erkenntnis ist ein morphologischer Kasten entwickelt worden, der die verschiedenen Lösungsansätze listet und sie an den Anforderungen (z.B. aus den Subsets von ETCS) spiegelt. Dieser muss in der nächsten Phase gefüllt und bewertet werden, um eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl möglicher zu verfolgender Lösungsansätze zu haben, die als Alternative oder Ergänzung der in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Ansätze dienen können.

12.2 Zielsetzung

Recherche und Analyse von Schutzrechtsdokumenten und Veröffentlichungen aus Forschung und Entwicklung zur Prüfung der sicheren Zuglänge bzw. Zugintegrität

12.3 Ausgangslage

Für den zukünftigen Schienenverkehr mindestens mit ETCS Level 3 ist die Bestimmung der sicheren Zuglänge und Zugintegrität zwingend notwendig. Insbesondere für den Güterverkehr sind diese Anforderungen bisher nicht zu erfüllen.

12.4 Erkenntnisse

Bei der Analyse der Veröffentlichungs- und Schutzrechtsdokumente wurden die folgenden Möglichkeiten zur sicheren Zuglängenbestimmung und Zugintegritätsprüfung recherchiert:

- Hauptluftleitung
- Gyroskop
- Wirbelstromsensor
- Radar
- Ultraschall

- Funk
- Optische Systeme/Bildgebende Sensorik
- Wireless Sensor Network (WSN) / Kurzstanz-Funknetzwerk
- Global Navigation Satellite System (GNSS)
- Global Navigation Satellite System (GNSS) und Global System for Mobile Communications – Rail(way) (GSM-R/GSM-Rail)
- Global System for Mobile Communications – Rail(way) (GSM-R/GSM-Rail)
- Achszähler
- Balise
- Distributed Acoustic Sensing (DAS)
- Akustische Sensorik
- Gleisstromkreis
- Leitung über gesamte Zuglänge
- Kraftmessung
- Kupplungen
- Magnetfeldsensorik
- RFID
- Wellenleiter
- Vibration

In einer zusätzlichen Kategorie *Ergänzungen* sind zusätzliche technische Lösungen enthalten, die durch eine Überarbeitung oder in Ergänzung zu einer der oben aufgeführten Realisierungsmöglichkeiten zur Prüfung und Überwachung der Zugintegrität genutzt werden können.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen recherchierten Realisierungsoptionen bezüglich der genutzten Verfahren dargestellt.

12.4.1 Hauptluftleitung

In der Kategorie *Hauptluftleitung* findet sich eine große Anzahl von Schutzrechtsdokumenten und weiteren Veröffentlichungen mit vielen unterschiedlichen Ausführungen.

Ausführungsform 1: End-of-Train-Einheit (EOT-Einheit) zur Überwachung des Luftdrucks: Die am häufigsten vorgeschlagene Variante zur Überwachung der Zugintegrität sieht die Nutzung einer EOT-Einheit zur Überwachung von Druck (und Volumen) in der Hauptluftleitung am Ende des Zuges vor. Dabei ist ein Vergleich der erfassten Werte mit Sollwerten durchzuführen. Abweichende Werte sind ein Indiz für den Verlust der Zugvollständigkeit. In der Regel werden die Daten der EOT-Einheit über Funk an eine Head-of-Train-Einheit (HOT-Einheit) gesendet.

Ausführungsform 2: Auswertung von Reflexionsmustern: Bei dieser Variante werden am Triebfahrzeug Schall (Ultra- oder Infraschall) in die Hauptluftleitung eingespeist und am Ende des Zuges reflektiert. Der reflektierte Schall wird in einer Auswerteeinheit am Zugsanfang empfangen und ausgewertet. Dabei werden Reflexionsmuster oder auch die Laufzeit der Reflexionen für eine Feststellung der Zugintegrität genutzt.

Ausführungsform 3: Es werden Druckwellen unterschiedlicher Frequenz an der Zugschlusseinheit in die Hauptluftleitung eingespeist und am Triebfahrzeug empfangen. Ein Ausbleiben des Empfangs dieser Druckwellen deutet auf den Verlust der Zugvollständigkeit hin.

Ausführungsform 4: Am Triebfahrzeug werden Druckmodulationen in die Hauptluftleitung eingespeist und am Zugende empfangen. Mit einer EOT-Einheit wird der Druck gemessen. Die Messergebnisse der EOT-Einheit werden dem Triebfahrzeug über Funk mitgeteilt.

Ausführungsform 5: Diese Variante sieht die Bestimmung der Zuglänge als Indikator für die Zugintegrität vor. Bei den recherchierten Verfahren werden entweder nur der Luftvolumenstrom oder zusätzlich auch der Druck und die Umgebungstemperatur überwacht, um aus den auf diese Weise gesammelten Daten die Zuglänge zu bestimmen. Durch Abgleich der momentanen Zuglänge mit der Sollzuglänge kann die Zugvollständigkeit festgestellt werden.

Ausführungsform 6: Auch bei dieser Variante wird die Zuglänge zur Feststellung der Zugvollständigkeit herangezogen. Bei diesem Verfahren wird eingesetzt, dass es bei einer Bremsung zu einem Druckabfall in der Hauptluftleitung kommt. Auf Basis der Zeit bis zum Druckabfall am Ende des Zuges wird die Zuglänge bestimmt und mit der Sollzuglänge verglichen.

Ausführungsform 7: Bei diesem Verfahren wird der Druck für die Hauptluftleitung am Triebfahrzeug vorgegeben, welcher sich durch die Hauptluftleitung bis zum Ende des Zuges ausbreitet. Am Ende des Zuges befindet sich ein Sensor, der darauf eingestellt ist, bei Detektion des HÖR vorgegebenen Drucks ein die Zugintegrität bestätigendes Signal auszulösen.

Ergänzend zu den genannten Ausführungsbeispielen zum Einsatz der Hauptluftleitung zur Zugvollständigkeitsüberwachung sind Vorschläge zu nennen, die Möglichkeiten einer eigenständigen und kontinuierlichen Energieversorgung der Zugschlusseinheiten und/oder Zugschlussfunksender zur Übermittlung der Messergebnisse oder zur Bestätigung der Zugintegrität darstellen. Bei diesen Vorschlägen wird die Druckluft aus der Hauptluftleitung zum Betrieb eines Generators zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt.

12.4.2 Gyroskop

Gyroskope können zur zusätzlichen Beschaffung von Ortungsinformationen in einem Navigationssystem eingesetzt werden. Ein Einsatzgebiet ist die Verwendung an Weichen um sofort nach Verlassen der Weiche zu wissen, welchen Weg der Zug genommen hat. Zur Umrechnung der vom Gyroskop gewonnenen Daten wird ein Odometer genutzt.

12.4.3 Wirbelstromsensor

In dieser Kategorie werden fahrzeugseitige Wirbelstromsensoren zur bordautonomen Ortung eingesetzt. Diese Aufgabe wird durch die Messung von Geschwindigkeit (Laufzeit-Korrelation und Frequenzanalyse) und der Bestimmung der absoluten Position erfüllt.

12.4.4 Radar

Ausführungsform 1: Bestimmung der Zuglänge: Bei diesem Verfahren werden Zugspitze und Zugende mit Radargeräten ausgestattet. Es werden die Entfernung zwischen der Zugspitze und einer ersten Streckeneinrichtung und die Entfernung zwischen dem Zugende und einer Streckeneinrichtung gemessen. Auf Basis dieser Ergebnisse wird anschließend die Zuglänge ermittelt und mit der Sollzuglänge verglichen.

Ausführungsform 2: Positionsbestimmung durch Reflexionen: Fahrzeugseitig emittierte Radarsignale werden von streckenseitigen Vorrichtungen reflektiert. Die Reflexionen werden vom Zug wieder empfangen und zur Ermittlung der Position der Reflektoren verwendet. Im Anschluss werden die bei der Auswertung der Reflexionen gewonnenen Daten mit den fahrzeugseitig gespeicherten Positionsdaten von Reflektoren entlang der Strecke verglichen

Ausführungsform 3: Positionsbestimmung durch Zeitdifferenz: Ein Radarsignal wird vom Zug ausgesendet und von zwei unterschiedlichen streckenseitig fest installierten Vorrichtungen mit bekannter Position empfangen. Auf Basis der ermittelten Zeitdifferenz zwischen dem Empfang des Signals an den beiden Vorrichtungen wird die Position ermittelt.

Ausführungsform 4: Ein Radargerät auf dem Triebfahrzeug wird entgegen der Fahrtrichtung auf den Zugschlusswagen, der mit einer aktiven oder passiven Rückstrahlvorrichtung ausgestattet ist, ausgerichtet. Nach Erhalt des Rückstrahlimpulses am Triebfahrzeug wird die Zugschlussmeldung vom Triebfahrzeug an eine streckenseitige Zentrale gesendet.

Ausführungsform 5: An den beiden Enden jedes Gleisabschnitts werden Sekundärradar-Sende- und Empfangsstationen (SSE-Stationen) installiert. Die Züge werden mit Antwortgeräten ausgestattet. Ein Antwortgerät dient dabei der Positionsbestimmung des Zuges. Zur Zugschlusskontrolle wird zusätzlich ein zweites Antwortgerät am Zugende angebracht. Die SSE-Stationen fragen periodisch alle Antwortgeräte in ihrem Gleisabschnitt mit einem Radarsignal ab, die Antwortgeräte senden daraufhin einen Radarantwortimpuls zurück. Aus der Laufzeitauswertung des Signals resultiert die Entfernung zwischen Antwortgerät und SSE-Einheit, welche wiederum der Positionsbestimmung dient.

Ausführungsform 6: Jeder Wagen eines Zugverbandes wird mit zwei Radar-Einheiten ausgerüstet. Eine Radareinheit ist dabei auf den vorausfahrenden Wagen gerichtet, die zweite Radareinheit zeigt auf den folgenden Wagen. Die Radar-Einheiten kommunizieren drahtlos miteinander und überwachen die Zugvollständigkeit. Des Weiteren sind sie in der Lage den Zugschluss zu erkennen und eine Freiraumkontrolle vorzunehmen.

Ausführungsform 7: Durch eine auf die Strecke ausgerichtete Radarvorrichtung am vorderen Ende des Zuges werden Radarabbildungen aufgenommen, welche durch einen fahrzeugseitigen Vergleich mit im System hinterlegten Abbildungen der gesamten Strecke eine Positionsbestimmung erlauben. Diese Verfahrensart kann auch alternativ mit oder ergänzt durch Infrarot- und/oder Videoabbildungen durchgeführt werden.

Ausführungsform 8: Positionsbestimmung für die Zugschlusseinheit eines Zuges mit defekter Ortungsfunktion: Für den Fall, dass ein Zug eine defekte Ortungsfunktion meldet, wird ein Verfahren zur Positionsbestimmung des Zugschlusses durch den folgenden Zugverband vorgeschlagen. Ein Streckenüberwachungsgerät veranlasst den defekten Zug zum Anhalten und sendet eine Information an den nachfolgenden Zug. Der nachfolgende Zug nähert sich langsam, detektiert den defekten Zug und hält im Sicherheitsabstand. Mit Radar wird der Abstand zwischen Zugschluss des defekten Zuges und dem nachfolgenden Zug bestimmt. Der gemessene Abstand zwischen den Zügen und die Position des nachfolgenden Zuges werden an das Streckenüberwachungsgerät gesendet, welches aus den gesendeten Informationen die Position des Zugschlusses des defekten Zuges berechnet.

12.4.5 Ultraschall

In der Kategorie Ultraschall werden fahrzeugseitig Ultraschallsender eingesetzt, die je nach Verfahrensausführung am Triebfahrzeug oder am Zugschlusswagen platziert werden.

Ausführungsform 1: Einspeisung von Ultraschallsignalen vom Triebfahrzeug aus in mindestens eine Schiene. Die Ultraschallsignale werden an den Fahrzeigrädern reflektiert und am Triebfahrzeug wieder erfasst. Die Auswertung der Reflexionen lässt einen Rückschluss auf die Achszahl des Zuges zu.

Ausführungsform 2: Streckenseitige Ultraschallempfänger erfassen Signale von Ultraschallsendern in der Zugschlusseinheit.

Ausführungsform 3: Übertragung von Ultraschallsignalen über die Hauptluftleitung vom Ende des Zuges bis zur Zugspitze.

Ausführungsform 4: Aussenden eines Ultraschallsignals vom Triebfahrzeug aus. Die Signale werden am Ende des Zuges reflektiert und die Reflexionen werden im Triebfahrzeug wieder empfangen und ausgewertet.

12.4.6 Funk

Ausführungsform 1: Bei diesen Verfahren erfolgt eine periodische Kommunikation zwischen Zugspitze und Zugschluss über Funk zur Überwachung der Zugvollständigkeit. Bestandteil der Kommunikation vom Zugschluss aus können auch am Ende des Zuges erfasste Daten, wie z. B. die Geschwindigkeit des Zugschlusswagens, sein. In diesem Fall werden die Geschwindigkeiten des Zuganfangs und des Zugendes zusätzlich zur Kommunikation miteinander verglichen, um eine Aussage über die Zugintegrität zu treffen.

Ausführungsform 2: Es handelt sich um eine weitere Form der Kommunikation zwischen Zugspitze und Zugschluss, bei der die Kommunikation mittels Schwingungskompression und –expansion der Funksignale erfolgt.

Ausführungsform 3: Positionsbestimmung durch Kommunikation zwischen streckenseitigen Transpondern und fahrzeugseitigen Transpondern: Bei den zu dieser Kategorie recherchierten Verfahren

übermittelt entweder ein streckenseitiger Transponder seine Identifikation an den Zug, woraufhin die passierten Transponder einer Zentrale gemeldet werden, oder ein Zug sendet seine ID an den Transponder und erhält dafür Informationen zur Identität des Transponders (und damit auch zur eigenen Position).

Ausführungsform 4: Ferner kann die Zugintegrität durch die Überwachung und Auswertung der Laufdauer, Signalstärke und Amplitude elektromagnetische Signale zwischen Triebfahrzeug und Zugschlusswagen überprüft werden.

Zusätzlich wurden einige Verfahren recherchiert, die die Funkkommunikation zwischen Zügen, Streckeneinrichtungen und Zentralen ermöglichen oder vereinfachen sollen.

12.4.7 Optische Systeme/Bildgebende Sensorik

In dieser Kategorie existieren sowohl fahrzeugseitige als auch streckenseitige Ausführungsformen der genutzten Technik.

Ausführungsform 1: Bei dieser Variante wird ein streckenseitiger bildgebender Sensor in Form einer Videokamera eingesetzt, um den Zugschlusswagen oder den gesamten Zug zu erkennen und aufzunehmen.

Ausführungsform 2: Es wird eine am Triebfahrzeug angebrachte Kamera zur Aufnahme der Fahrtrasse oder der Gleise zum Erhalt von (gleisselektiven) Ortungsinformationen eingesetzt.

Ausführungsform 3: Es wird eine am Triebfahrzeug angebrachte Kamera zur Detektion von Bahnanlagen, Signalen und Hindernissen eingesetzt.

Ausführungsform 4: Eine Kamera wird entgegen der Fahrtrichtung am Triebfahrzeug angebracht und überwacht den gesamten Zug. Dieses Verfahren ist allerdings nur bei kurzen Zuglängen realisierbar.

Ausführungsform 5: Einsatz von fahrzeugseitigen optischen Sensoren als Hilfssensorik zur Validierung von anderweitig gewonnenen Positionsdaten

12.4.8 Wireless Sensor Network (WSN) / Kurzstanz-Funknetzwerk

Ausführungsform 1: Master-Slave-Einheiten und ihre Kommunikation untereinander: Die Realisierungskonzepte im Bereich WSN sehen in großer Zahl vor, ein WSN zu nutzen, welches neben einer Master-Einheit (in der Regel am Triebfahrzeug und mit Auswerte- oder weiteren Kommunikationseinheiten verbunden) eine Vielzahl von Slave-Einheiten (mindestens eine an jedem angehängten Wagen) nutzt. In diesem WSN werden Kommunikationsregeln und -reihenfolgen festgelegt. Die am meisten genutzte Variante sieht vor, dass eine von der Master-Einheit initiierte Nachricht über alle Slave-Einheiten (Kommunikation lediglich mit benachbarten Einheiten möglich) bis zum Zugende weitergeleitet, dort zur Zugintegritätsbestätigung von der letzten Slave-Einheit verändert und anschließend über die gesamte Zuglänge wieder bis zur Master-Einheit durchgereicht wird. Es werden auch Verfahren vorgelegt, in denen die Master-Einheit im ständigen Austausch mit allen Slave-Einheiten ihres Netzwerkes steht oder periodisch alle erreichbaren Slave-Einheiten anspricht, aus den Empfangsbestätigungen eine Liste erstellt

und diese Liste mit einer Soll-Liste oder der letzten erstellten Liste abgleicht. Bei Verlust der Zugintegrität würde der Verlust eines Wagens durch eine reduzierte Anzahl von Antwortsignalen auffallen. Durch die genannten Kommunikationsformen lassen sich die Anzahl der angehängten Wagen und in den meisten Fällen die Wagenreihung feststellen. Einige der recherchierten Konzepte befassen sich ausschließlich mit der geeigneten Kommunikationsform in einem zur Zugintegritätsüberwachung ausgelegten WSN.

Ausführungsform 2: Master-Slave-Einheiten und unterstützende Sensorik: Die Einheiten des WSN sind mit Sensoren, die unterschiedlichste Funktionen oder Systeme des Zuges überwachen, verbunden. Dabei kann es sich um Sensoren zur Überwachung der Funktionen von Türen, Temperaturregelung oder Bremsen und auch um Sensorik zum Messen von Druck in der Hauptluftleitung und Geschwindigkeitssensoren handeln. Die Slave-Einheiten des WSN senden in diesem Fall mit ihrer Antwort an die Mastereinheit gleichzeitig Zustandsdaten bezüglich der überwachten Systeme und Funktionen. Es ist z. B. möglich, einen Verlust der Zugintegrität durch die Vergrößerung des Abstandes zwischen Triebfahrzeug und einem angehängten Wagen durch Nutzung eines WSN mit GNSS-Empfängern festzustellen. Dazu werden alle Einheiten des WSN mit GNSS-Empfängern ausgestattet. Zu Bewegungsbeginn werden durch die Mastereinheit alle Positionen der Slave-Einheiten abgefragt. Mit der Position der Master-Einheit kann der Abstand jeder Slave-Einheit zur Lokomotive berechnet werden. Die Abfrage der Positionsdaten wird periodisch wiederholt, wobei die Abstände sich nicht verändern sollten. Ein Verlust der Zugintegrität wird festgestellt, wenn sich der Abstand zwischen einer Slave- und der Master-Einheit vergrößert. Ferner wird auch unterstützende Sensorik in Form von GNSS-Empfängern und/oder Geschwindigkeitssensoren eingesetzt, um eine Unterscheidung zwischen den Signalen des eigenen und eines fremden Zuges sicherzustellen.

Ausführungsform 3: Smart Buffer: An den Kupplungen werden Sensoren zur Erfassung des Kupplungszustandes angebracht. Der festgestellte Kupplungszustand wird über WSN-Sensoren kommuniziert.

12.4.9 Global Navigation Satellite System (GNSS)

Zu der Realisierungsoption GNSS finden sich sehr viele Verfahren, deren größte Unterschiede die Anzahl und der Ort der verwendeten GNSS-Empfänger sind.

Ausführungsform 1: Das bei weitem am häufigsten genannte Verfahren setzt jeweils einen GNSS-Empfänger an beiden Enden des Zuges ein. Die Überwachung der Zugintegrität erfolgt ergo durch Ortung der Zugspitze und des Zugendes, wobei der weitere Umgang mit den erhaltenen Ortungsdaten bei den unterschiedlichen Umsetzungen verschieden ist. Eine Möglichkeit, die erhaltenen Daten weiter einzusetzen, um eine Aussage über die Zugintegrität zu treffen, ist, aus den beiden Positionen direkt die aktuelle Zuglänge zu berechnen und mit der Soll-Zuglänge zu vergleichen, wobei eine Kommunikation zwischen den beiden GNSS-Empfängern stattfindet. Alternativ können auch streckenseitige Punkte (z. B. Weichen) zur Integritätsprüfung mithinzugezogen werden. In diesem Fall wird beim Passieren eines bestimmten Punktes mit der Zugspitze durch den GNSS-Empfänger am HOT die Position der Zugspitze bestimmt. Nach dem Zurücklegen einer Strecke, die der Länge des Zuges entspricht, wird die Position

des EOT-GNSS-Empfängers bestimmt. Bei dem anschließenden Abgleich der EOT-Position und der Position des Streckenpunktes sollte eine Übereinstimmung festgestellt werden.

Ausführungsform 2: Es ist auch möglich, lediglich eine GNSS-Einheit zur Zugintegritätsprüfung zu verwenden. Diese befindet sich am Ende des Zuges und wird meist in Verbindung mit EOT-Einheiten mit entsprechender Sensorik zur Zugvollständigkeitskontrolle und einer Einheit zur Kommunikation mit der Zugspitze verwendet. So können die Messdaten einer Zugschlusseinheit zur Überwachung der Hauptluftleitung um eine Ortungsinformation erweitert werden. Es ist somit möglich, den Ort des Verlusts der Zugintegrität festzustellen.

Ausführungsform 3: Weiterhin gibt es Verfahren, die an jedem Wagen des Zugverbandes einen GNSS-Empfänger vorsehen. Auf diese Weise kann die Position aller Elemente des Zuges überwacht werden.

Ausführungsform 4: Neben fest am Zug installierten GNSS-Empfängern werden auch tragbare Navigationsgeräte/GNSS-Empfänger, z. B. in Form von Satelliten-Mobiltelefon, vorgeschlagen. Ein an oder in einer Vorrichtung am Güterwagen befestigtes Mobiltelefon kann auf diese Weise die Ortung des Zuges oder des Wagens übernehmen.

Ausführungsform 5: GNSS Double Difference Approach: Der Double Difference-Ansatz wird verwendet um die Zugintegrität zu überwachen.

Ausführungsform 6: Switching Linear Dynamic System (LDS): Neben Ortungsinformationen basierend auf GNSS werden auch Distanz, Beschleunigung und Geschwindigkeit des ersten und letzten Wagens erfasst und für ein Switching LDS- Model verwendet.

Ausführungsform 7: GNSS ist in vielen Fällen Teil eines Ortungs- und Zugintegritätsüberwachungssystems, welches Multisensorik einsetzt. So werden neben GNSS-Vorrichtungen auch Odometer, Beschleunigungsdaten, digitale Karten, Wirbelstromsensoren und Ausrichtungssensoren in unterschiedlichen Zusammensetzungen zur Korrektur des Ergebnisses, zum Erhalt eines genaueren Ergebnisses oder als Rückfallebene eingesetzt.

Ergänzend wurden Veröffentlichungen und Schutzrechtsdokumente recherchiert, welche die genannten Methoden unterstützen.

12.4.10 Global Navigation Satellite System (GNSS) und Global System for Mobile Communications – Rail(way) (GSM-R / GSM-Rail)

Durch die Kombination der Ortung mit GNSS und GSM-R kann eine Erhöhung der Verfügbarkeit erreicht werden. Für beide Verfahren werden Empfänger HOT und EOT verwendet. Aus den erhaltenen Positionsdaten wird die Distanz zwischen beiden Empfängern berechnet und überwacht. Eine Veränderung der Distanz zeigt einen Verlust der zugintegrität an.

12.4.11 Global System for Mobile Communications – Rail(way) (GSM-R / GSM-Rail)

Ausführungsform 1: Analog zur Kategorie GNSS können der erste und der letzte Wagen mit GSM-R-Einheiten ausgestattet werden. Bei diesen GSM-R-Einheiten handelt es sich um GSM-R-Funkmodule,

über die die Ortung von Zugspitze und Zugende erfolgt. Im Anschluss wird mit den erfassten Positionsdaten die Zuglänge berechnet.

GSM-R wird selten ausschließlich oder direkt zur Zugvollständigkeitskontrolle eingesetzt, wird jedoch häufig bei der Übertragung der Daten an Zentralen oder streckenseitige Vorrichtungen verwendet und wird auch zur Kommunikation der Züge untereinander eingesetzt.

12.4.12 Achszähler

Ausführungsform 1: Es wurden unterschiedliche Arten von Achszählern zum Zählen von Achsen recherchiert: TMC-AZ 2.0, induktive Achszähler, Glasfaserkabel, Faser-Bragg-Gitter.

Ausführungsform 2: Achszählersysteme können nach dem Diversitätsprinzip auch zwei unterschiedliche Arten von Achszählern enthalten.

Ausführungsform 3: Unterschiedliche Formen der Meldung des Zählerstandes: Es wurden einige Dokumente recherchiert, welche unterschiedliche Vorschläge zum Umgang mit den ermittelten Zählerständen des Achszählers vorschlagen. Mögliche Techniken sind Meldetelegramme, das Übermitteln mittels GSM-R, die direkte Übertragung des Zählstandes an den Zug oder die sofortige Anzeige des Zählerstandes auf einer streckenseitigen Meldetafel, die im Abstand von einer Zuglänge hinter dem Achszähler montiert ist.

Ausführungsform 4: Darüber hinaus können Abstandsmessvorrichtungen zur Messung von Achsabständen und eine darauf aufbauende Detektion von Achsen eingesetzt werden.

Ausführungsform 5: Zur gezielten Prüfung der Zugintegrität können Achszähler zusätzlich mit einem Signalempfänger ausgerüstet werden, der zur Aufnahme von Signalen von Zugschlussendern dient.

Ausführungsform 6: Durch Ergänzung des Achszählsystems mit einer Wiegevorrichtung wird ein Verfahren zur Überprüfung der Funktion des Achszählers gegeben.

12.4.13 Balise

Ausführungsform 1: Es wurden unterschiedliche Umsetzungsformen von Balisen zur streckenseitigen Detektion von Zuganfang und Zugende recherchiert. Dazu gehören Mikrowellen-, Magnet- und Eurobalisen.

Ausführungsform 2: Es ist möglich, Balisen als Referenzpunkte bei Verfahren, die eine Ortung von Zuganfang und Zugende vorsehen, zu verwenden.

Ausführungsform 3: Balisen können hinsichtlich ihrer Funktion zur Datenübertragung überprüft werden, indem eine zusätzliche Empfangsantenne an der Balise montiert wird.

12.4.14 Akustische Sensorik

Ausführungsform 1: Durch den Einsatz akustischer Sensoren werden Betriebsgeräusche aufgenommen, welche anschließend hinsichtlich der aufgenommenen Spektren untersucht werden. Bei einer Unterstützung mit GNSS können auffällige Ergebnisse der akustischen Analyse zeitlich und örtlich zugeordnet werden.

Ausführungsform 2: Detektion von herannahenden Zügen: Es findet sich eine Vielzahl deutscher, europäischer und internationaler Schutzrechtsdokumente, welche Verfahren zum Einsatz eines akustischen Wandlers zur Detektion von Zügen vorschlagen. Der akustische Wandler wird in der Nähe der Gleise an einem zu überwachenden Ort aufgestellt. Durch den akustischen Wandler werden durch den Zug verursachte und durch die Schienen übertragene akustische Signale in Form von Körperschall empfangen und in elektrische Signale umgewandelt. Die elektrischen Signale werden beispielsweise zum Betrieb von Einrichtungen zur akustischen oder optischen Warnung vor dem eintreffenden Zug genutzt.

Ausführungsform 3: Akustische Signalwandler können auch fahrzeugseitig eingesetzt werden und dienen in einem solchen Fall der Überwachung wichtiger Elemente, Funktionen oder Systeme im Zugverband. Die Signalwandler werden zu diesem Zweck an zu überwachenden Elementen angebracht, um dort die beim Betrieb auftretenden akustischen Signale zu erfassen. Durch Umwandlung, Auswertung und Abgleich mit Referenzdaten lassen sich Defekte detektieren.

12.4.15 Distributed Acoustic Sensing (DAS)

Bezüglich der Kategorie Distributed Acoustic Sensing existieren mehrere Ausführungsformen. Neben dem Grundverfahren, das neben den Gleisen verlegte Glasfaserkabel nutzt, gibt es weitere Verfahren, die das Grundverfahren um bekannte strecken- oder fahrzeugseitige Methoden erweitern.

Verfahrensausführung 1: Bei dem Grundverfahren von DAS werden Lichtreflexionen in streckenseitig verlegten Glasfaserkabeln erfasst und mittels optischer Zeitbereichsreflektometrie (OTDR) ausgewertet.

Verfahrensausführung 2: Das Grundverfahren wird durch den Einsatz von Positionssensoren erweitert.

Verfahrensausführung 3: Das Grundverfahren wird durch Kombination mit Achszählern erweitert.

Verfahrensausführung 4: Das Human Machine Interface (HMI) erlaubt die Darstellung aller durch DAS und seiner Erweiterungen gewonnen Informationen auf übersichtliche Art und Weise.

12.4.16 Gleisstromkreis

Ausführungsform 1: unterschiedliche Ausführungsformen von Gleisstromkreisen: zu den recherchierten Gleisstromkreisen gehören: NF-Schwingkreis, virtueller Gleisstromkreis, phasensynchron gesteuerter Gleisstromkreisempfänger, gleichstromgespeister Gleisstromkreis, Tonfrequenz-Gleisstromkreis, Gleisstromkreis mit Kreuzkorrelation und Gleisstromkreis mit optischem Sensor.

Ausführungsform 2: Verlängerung des Gleisstromkreises: Um einen über die übliche Maximallänge eines Gleisstromkreises hinausgehenden Abschnitt überwachen zu können, werden Verfahren zur

Verlängerung des Gleisstromkreises angegeben. Dazu wird ein Gleisabschnitt entweder in mehrere sich überlappende Abschnitte aufgeteilt oder es werden parallel geschaltete Kondensatoren zwischen den Schienen montiert.

Ausführungsform 3: Verfahren zur Bestimmung der Zuglänge. Zur Erfassung der Zuglänge werden mittels Gleisstromkreis entweder Achszahl, Wagenzahl, Geschwindigkeitsänderung und mittlerer Zuggeschwindigkeit erfasst und zur Berechnung der Zuglänge verwendet oder es wird durch die Berechnung minimaler und maximaler Zuglängen für jeden Belegungszustand iterativ ein Intervall für die Zuglänge gefunden.

Ausführungsform 4: Verfahren zur Verbesserung von Gleisstromkreisen hinsichtlich Sensitivität, Verlässlichkeit oder Instandhaltung

12.4.17 Leitung über gesamte Zuglänge

Ausführungsform 1: Die bereits existierende durchgehende Leitung in Personenzügen wird zum Anschluss von je nach Verfahren unterschiedlichen Überprüfungs-, Steuerungs- oder Kommunikationseinrichtungen genutzt.

Ausführungsform 2: In einigen Veröffentlichungen ist auch das Verlegen einer neuen Leitung durch den gesamten Zug zur Verbindung einer EOT-Einheit mit einer HOT-Einheit vorgesehen. Am Ende des Zuges befindet sich dabei beispielsweise eine Überwachungseinrichtung mit Sensoren zur Überwachung der Hauptluftleitung, welche über die zusätzliche Leitung zum Datenaustausch mit der Steuerungseinrichtung im Triebfahrzeug verbunden wird.

Ausführungsform 3: In weiteren Verfahren sind geeignete Kupplungssysteme zur Verbindung von Leitungsabschnitten in jedem Wagen zu einer durchgehenden Leitung ausgeführt.

12.4.18 Kraftmessung

In der Kategorie der Kraftmessung werden hauptsächlich Zugkräfte betrachtet.

Ausführungsform 1: Zur Kraftmessung wird ein Kraftsensor an der Kupplung zwischen Triebfahrzeug und erstem Waggon, der Zug- und Druckkräfte überwacht, verwendet.

Ausführungsform 2: Mit einem inertialen Messsystem und einer Geschwindigkeitsmesseinrichtung werden momentane Einzelfahrwiderstände erfasst und zu einem momentanen Gesamtfahrwiderstand aufsummiert, mit dessen Kenntnis die Zugkraft bestimmt werden kann.

Ausführungsform 3: Durch die Messung der Zugkraft und weiterer physikalischer Größen (Geschwindigkeit, Masse, ...) ist es möglich, die Bewegungsphase, in der sich ein Zug befindet, zu bestimmen.

12.4.19 Kupplungen

In dieser Kategorie sind unterschiedlichste Sensoren an den Kupplungen zwischen den Wagen oder an der freien Kupplung des Zugschlusswagens vorgesehen.

Ausführungsform 1: Am Ende jedes Wagens wird eine Fahrzeugstation angebracht, welche den Kuppelungszustand überwacht. Durch Auswertung der Kuppelkontakte wird die Zuglänge berechnet.

Ausführungsform 2: Es wird ein passives Signalgerät aus radioaktivem, reflektierendem oder emittierendem Material oder in Form eines Permanentmagneten an der freien Kupplung des Zugschlusswagens befestigt. Das Signalgerät wird durch nachfolgende Fahrzeuge detektiert.

Ausführungsform 3: Bei dieser Ausführungsform werden Abstandssensoren an den Kupplungen angebracht, um den Abstand zwischen zwei Wagen zu überwachen.

Ausführungsform 4: Es wird eine Schraubenkupplung mit Neigungssensor im Kupplungselement verwendet.

12.4.20 Magnetfeldsensorik

Magnetfeldsensorik kann durch die Nutzung geeigneter Magnetfeldsensoren zur Zugerfassung sowie zur Messung von Geschwindigkeit, Position und Zuglänge eingesetzt werden.

Ausführungsform 1: Geschwindigkeits- und Positionsbestimmung eines Güterwagens: Dem Verfahren liegt eine Messung der Magnetfeldsignatur eines Güterwagens mit bekannter Länge mit einem Referenz-Magnetfeldsensor zugrunde. Es werden streckenseitige Magnetfeldsensoren eingesetzt. Bei Anwesenheit eines Zuges ändert sich das Magnetfeld, wodurch der Zug detektiert wird. Die Position des Zuges ist damit bekannt. Die Geschwindigkeitsbestimmung erfolgt durch den Vergleich der Magnetfeldsignatur mit der Referenz-Magnetfeldsignatur.

Ausführungsform 2: Dieses Verfahren sieht die Verwendung der streckenseitigen Magnetfeldsensoren zur Zuglängenmessung vor.

Ausführungsform 3: Anisotrope magnetoresistive Sensoren (AMR-Sensoren): Es werden AMR-Sensoren in der Nähe der Gleise installiert. Die AMR-Sensoren ermöglichen eine Zugerfassung und eine Geschwindigkeitsmessung.

Ausführungsform 4: Magnetbalisen: Die Gleisfreimeldung erfolgt durch Einsatz einer Magnetbalise mit Permanentmagnet. Die Züge sind mit einem entsprechenden Zugspitzen- und Zugschlussgerät ausgestattet.

12.4.21 Radio-frequency identification (RFID)

Ausführungsform 1: Durch die fahrzeug- und streckenseitige Nutzung von RFID-Sendern und -Empfängern, kann der Abstand zwischen zwei Streckenpunkten oder einem Streckenpunkt und einem Schienenfahrzeug bestimmt werden. Die Bestimmung der Abstände erfolgt über eine Laufzeitmessung des RFID-Signals. Wird neben der Laufzeit auch die zeitliche Veränderung des Signals erfasst, ist eine Möglichkeit zur Bestimmung von Weg und Geschwindigkeit gegeben.

Ausführungsform 2: Es werden streckenseitig RFID-Sensoren eingesetzt, welche die fahrzeugseitig gesendete Fahrzeug-ID mit Fahrzeugdaten erfassen. Dadurch wird festgestellt, ob ein Fahrzeug einen bestimmten Punkt passiert hat.

12.4.22 Wellenleiter

Ausführungsform 1: Züge können mithilfe eines Wellenleiters geortet werden. Dazu wird ein elektromagnetischer Puls in den Wellenleiter eingespeist. Durch einen Zug auf den Gleisen wird das Signal reflektiert. Durch Auswertung des Rückstreumusters oder eine Einrichtung zur Messung der Entfernung zu den Reflexionspunkten lässt sich die Position des Zuges bestimmen.

Ausführungsform 2: Korrektur von Positionsinformationen: In jeden Gleisabschnitt werden Signale unterschiedlicher Frequenz eingespeist. Beim Übergang eines Zuges von einem Abschnitt in einen nächsten wird der Frequenzwechsel registriert. Durch einen Abgleich der auf anderem Weg (etwa mit GNSS) erhaltenen Ortungsinformationen mit der Position des Frequenzwechsels ist bei Feststellung von Abweichungen eine Korrektur der Ortungsinformationen möglich.

Ausführungsform 3: Ein vorausfahrender Zug speist elektromagnetische Wellen oder Schallwellen in einen Wellenleiter ein, wobei die Intensität des gesendeten Signals von der Geschwindigkeit des Zuges abhängt. Ein nachfolgender Zug erfasst das Signal und regelt seine Geschwindigkeit auf Grundlage der Intensität der empfangenen Signale.

Ausführungsform 4: Bei diesem Verfahren erfolgt die Zuglängenbestimmung durch Auswertung des Schwingverhaltens eines Wellenleiters.

12.4.23 Vibration

Im Bereich der Vibrationen kommen je nach Ausführungsform strecken- oder fahrzeugseitige Vibrationsensoren zum Einsatz.

Ausführungsform 1: Durch das Anbringen von Vibrationssensoren an allen Achsen oder an allen Rädern des Zugverbandes können Entgleisungen erkannt werden.

Ausführungsform 2: Durch die Installation von Vibrationssensoren an den Gleisen können Züge detektiert werden.

12.5 Gesamtbewertung

Die Recherche hat gezeigt, dass es bisher keine verwertbare kommerzielle Lösung insbesondere für Güterwagen für die Bestimmung der sicheren Zuglänge bzw. Zugintegrität gibt, die für dicht befahrene Netze den Anforderungen genügt. Die Herausforderung besteht, aus den ganzen Ansätzen eine zulassungsfähige Lösung zu extrahieren. Als Hilfsmittel für eine ganzheitliche Bewertung steht der morphologische Kasten zur Verfügung.

Eine weitere Herausforderung ist die Energieversorgung auf den Güterwagen. Hier bestehen inzwischen auch erfolgversprechende Ansätze.

13 Anwendung: Von der virtuellen Balise zum Vehicle Locator

13.1 Management Summary

In den letzten Jahren wurde die Verwendung der GNSS Ortung für die Detektion von ERTMS virtuellen Balisen als Game-changing Funktion identifiziert. Die Umsetzung der virtuellen Balise als 1:1 Ersatz für (diskrete) physische Balisen bringt für smartrail4.0 nur einen geringen Nutzen. Vielversprechender wird seine Evolution zu einem Multi-Sensor Vehicle Locator.

Um den Bedarf an physischen Balisen als Ergänzung zu einer sicheren Satelliten-basierten Ortung einzuschätzen, wurde eine provisorische Karte des GNSS-Empfangs im Schweizer Bahnnetz erstellt, die den zu bestätigenden Eindruck gibt, dass die Verfügbarkeit von GNSS Signalen in bergigen Regionen beschränkt wäre.

In der Perspektive der Nachweisführung einer GNSS-gestützten Lokalisierung sind offene Forschungs- und Entwicklungsfragen identifiziert worden.

13.2 Erkenntnisse und Perspektiven

13.2.1 Einführung, Erkenntnisse aus bestehenden Projekten

Aus STARS und Shift2Rail lassen sich die möglichen Beiträge der unterschiedlichen Sensoren zur Lokalisierung ableiten.

In einer sicheren Anwendung, in der GNSS zur absoluten Ortung beiträgt, kann die Performance des EGNOS Safety of Life Service als Anfangspunkt genommen werden. Dieser Service wird in der Luftfahrt verwendet. Obwohl statistisch gesehen die Positionen eine geringe Streuung aufweisen, wird für sichere Anwendungen auf Flugzeugen eine horizontale Alarmgrenze (Horizontal Alarm Limit) von 40 m betrachtet. Da die Bedingungen auf der Erdoberfläche für GNSS Signale schwieriger sind und angenommen, dass die Berechnungsmethoden für eine sichere Nutzung auf der Erdoberfläche angepasst werden – was noch nicht der Fall ist, wäre die Performance von EGNOS im Bahnbereich vergleichbar oder schlechter als die des heutigen Safety of Life Service.

Die Benutzung von EGNOS als Augmentation System erfordert keine spezifische gleisseitige Ausrüstung ausser Bandbreite für die Übertragung der Daten. Verbesserungen der EGNOS Performance sind mit EGNOS V3 ab 2023 erwartet. Die Chance, dass EGNOS V3 eine sichere Gleisselektivität ermöglicht, bleibt aber gering.

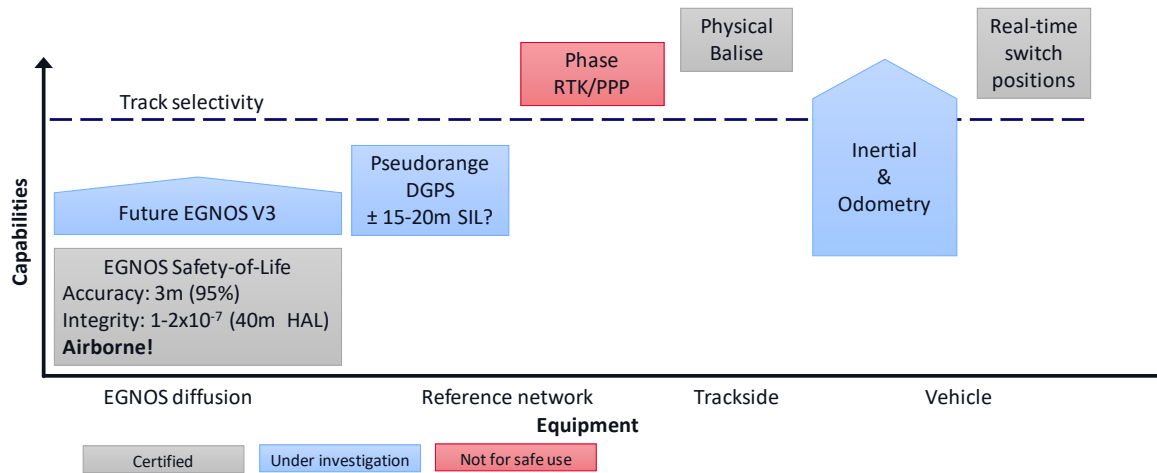


Abbildung 13-1: Beitrag der Ausrüstung zur Fähigkeit der Lokalisierung

Als Alternative zu EGNOS bietet sich ein GNSS Referenznetzwerk, das mit sich Installation-, Wartungskosten und Verantwortlichkeit bringt. Je nach Dichte der Referenzstationen sollten Vertrauensintervalle von 15-20 m mit einer noch zu bestimmenden Sicherheitsanforderungsstufe erreichbar sein. Obwohl Galileo genauere Signale bringt, bleibt die Chance gering, mit DGNSS die Gleisselektivität zu erreichen.

Genauere Algorithmen sind bekannt, die nicht nur die GNSS Pseudoranges nutzen, sondern auch Phasen-Messungen. Je nach Form der Korrekturen, die sie brauchen, werden sie Real-Time Kinematic oder Precise Point Positioning genannt. Sie sind aber bisher für sichere Anwendungen als nicht geeignet eingestuft.

Die Kombination von GNSS mit Odometern und Inertialsystemen wird als vielversprechend erachtet. Wenn einmal korrekt initialisiert, sollte sie im weiteren Verlauf die Gleisselektivität liefern können. Zur Redundanz könnte aber die Weichenlage nötig sein. Beim Hochstarten und wenn GNSS Signale dauerhaft fehlen sind physische Balisen oder anderweitige (auch prozessuale) Workarounds unverzichtbar.

Map Matching – die Erkennung einer Position auf der Gleiskarte anhand der inertialen Messungen – ist in Abbildung 13- nicht dargestellt, weil diese Methode in den analysierten Projekten - wenn überhaupt - nur am Rande studiert wird, so dass seine Performance und seine Anwendungsbedingungen sehr vage sind. Der mögliche Beitrag von Map Matching zu einer geeigneten Lösung sollte aber in Zukunft vertieft werden.

13.2.2 Kombinierte Lösungen

Das ERTMS Ortungssystem kombiniert in seiner Weise diskrete absolute Ortung mit kontinuierlicher Koppelnavigation. Absolute Positionen kommen von den Eurobalisen, während die Odometrie die Zugposition kontinuierlich auffrischt. Diese einfache Fusion findet auf dem European Vital Computer statt.

Wenn Balisegruppen verlinkt sind, kann der EVC die Integrität der Ortung bestätigen, indem er seine Position mit der der erwarteten Balise vergleicht.

Die ursprüngliche Idee der virtuellen Balise wollte anhand von reinen GNSS-Messungen Eurobalisen ersetzen. Festgestellt wurde aber, dass Verfügbarkeit, Integrität und Genauigkeit ungenügend sind. Deshalb werden für den Virtual Balise Reader kombinierte Lösungen betrachtet. In einer kombinierten Lösung werden mindestens eine absolute und eine relative Datenquelle fusioniert. Zu den in Projekten erwogenen absoluten Datenquellen zählen Eurobalise, GNSS, Gleiskarte und Map Matching. Als relative Datenquellen werden Inertialsensoren und Odometer betrachtet. Erwähnenswert ist, dass die Fusion mehrerer Datenquellen nicht nur die Verfügbarkeit der Positionen erhöhen soll, sondern auch ihre Integrität und ihre Genauigkeit.

Wenn ein Virtual Balise Reader sich nicht mehr exklusiv auf GNSS verlässt, sondern auf eine Vielfalt von anderen Sensoren, rechnet er intern eine Position kontinuierlich. Die Virtuellen Balisen sind nur noch da, um diese Position dem ERTMS Kernel über die BTM Schnittstelle zu geben, weil es keine andere Schnittstelle gibt. Das heisst, die Virtuelle Balise wird zum reinen architektonischen Artefakt im ERTMS System. Dies wurde in Arbeitsgruppen wie RCA

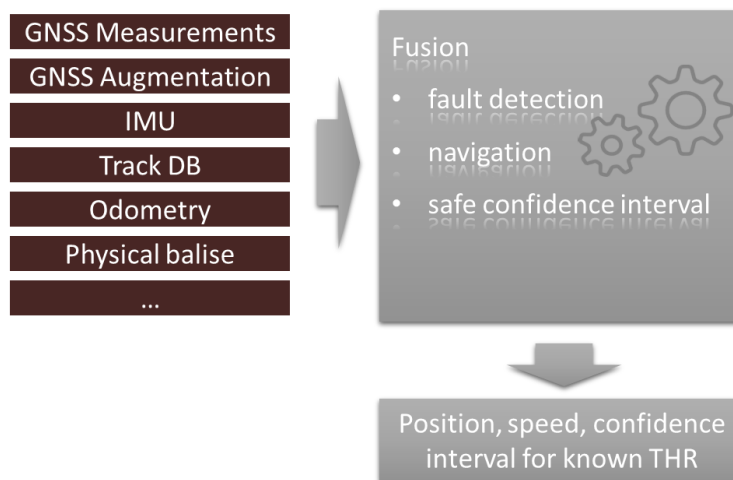


Abbildung 13-2: Multi-Sensor Lokalisierung

und ERTMS Users Group erkannt: das Virtuelle Balise Konzept liesse sich in kommenden Architekturvorschlägen durch eine kontinuierliche Lokalisierungseinheit ersetzen.

Aufgrund der Vielfältigkeit der verfügbaren Datenquellen sind mehrere Architekturen für eine kombinierte Lokalisierungseinheit möglich, deren gemeinsamer Nenner ist die Fusion der Daten als Herz der Architektur. Im oder nah am Fusionsblock werden Messfehler detektiert, Positionen gerechnet, Integrität geprüft und Vertrauensintervalle ermittelt.

13.2.3 GNSS Verfügbarkeit im Schweizer Netz

Seit 2015 werden bei der SBB Fahrzeuge mit Energiezähler ausgerüstet, die einen einfachen GNSS Empfänger beinhalten. Unter anderen werden berechnete geografischen Positionen und Anzahl empfangenen Satelliten jede Sekunde gespeichert. Die Positionen sind nicht genau; die Menge ermöglicht aber eine statistische Schätzung des GNSS-Empfangs entlang einer Strecke, die zwar nicht für die Projektierung, aber für die Schätzung der Anzahl nötigen Balisen dienen kann.

Für jeden Datensatz wird der Empfang als *genügend* oder *ungenügend* benannt. Der Schwellwert hängt von dem Typ installierten Empfänger ab, weil die Empfänger unterschiedliche Fähigkeiten besitzen. Für

GPS Empfänger werden im offenen Gelände im Minimum 6 Satelliten erwartet, für Multi-Konstellations-Empfänger 13. Diese minimale Anzahl empfangener Satelliten lassen sich auf zwei Arten begründen. Einerseits entsprechen sie einer eher pessimistischen Vorhersage der sichtbaren Satelliten im freien Himmel, andererseits berücksichtigen sie eine Redundanz von 2 Satelliten für die zwei ersten Konstellationen, um Fehler detektieren zu können.

Die punktförmigen genügend/ungenügend Informationen werden auf dem Streckennetz aggregiert. Das Netz wird in 100m lange Segmente zerlegt. Pro Segment wird der Prozentsatz genügende Messungen in der Umgebung gerechnet. Somit sind sehr lokalisierte Signalunterbrüche unsichtbar, die vom Odometer oder von Inertialsensoren überbrückt werden können. Der Empfang wird als genügend erachtet, wenn mehr als 95% der Züge mehr als das Minimum der Anzahl Satelliten sehen.

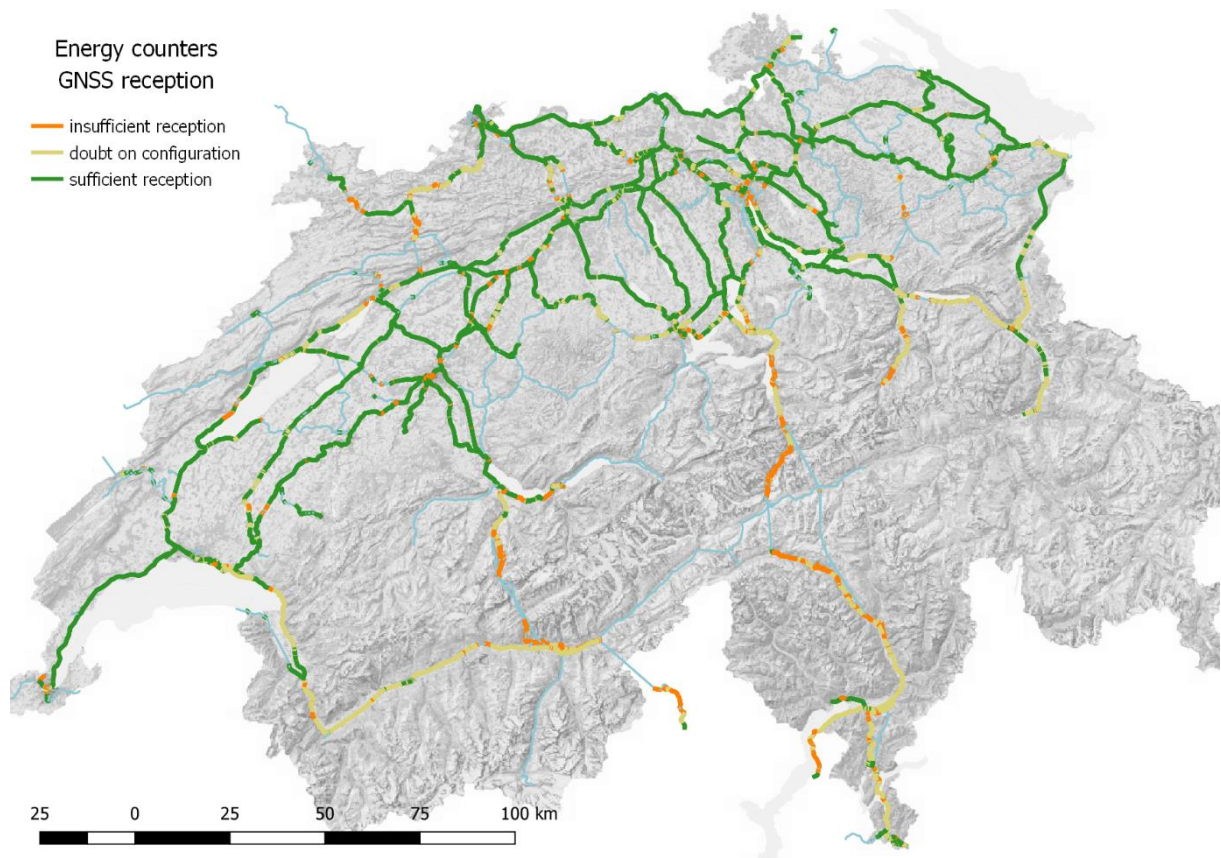


Abbildung 13-3: Schätzung der GNSS Verfügbarkeit im Schweizer Netz

Die gelben Portionen in Abbildung 13- entsprechen Strecken wo eine verbleibende Ungewissheit bezüglich Konfiguration der Empfänger eine genaue Interpretation des etwas mässigen Empfangs verbietet. Es ist noch zu klären, ob das Defizit an empfangenen Satelliten im Wallis geostationäre Satelliten oder allgemeine Konstellationen betrifft. Enge Täler beeinträchtigen den Empfang am meisten. Hohe Hindernisse im Süden, typischerweise im Wallis, beeinträchtigen den Empfang von geostationären Satelliten, die für einen Vehicle Locator nicht wichtig sind, weil EGNOS Informationen über einen anderen Kanal übermittelt werden können.

Die Analyse der Energiezählerdaten in Big Data ist eine laufende Arbeit. Im ersten Durchstich sind nur einige Wochen an Daten verarbeitet worden. Eine Vertiefung der Analyse ist vorgesehen, insbesondere um zu sichern, dass die Performanz der Empfänger zwischen Fahrzeugtypen vergleichbar ist.

13.3 Zulassung

13.3.1 Akteure

Für die Anwendung von aus einem GNSS Empfänger stammenden Informationen in einem sicheren Ortungssystem ist die Ermittlung deren Integrität und Genauigkeit erforderlich. In der Luftfahrt nennt man horizontal *Protection Level* den Radius eines Kreises, auf die echte Position zentriert, innerhalb dessen die berechnete Position mit hohem Wahrscheinlichkeitsgrad liegt. Der Wahrscheinlichkeitsgrad bezieht sich indirekt auf den sogenannten *Integrity Risk*, das ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Positionierungsfehler grösser als der Protection Level ist, ohne dass der Benutzer davon gewarnt wird.

Entgegen einem Sensor kann ein GNSS Empfänger alleine nichts messen. Er funktioniert als Teil des GNSS Systems, das Ground, Space und User Segment umfasst. Das Ground Segment kontrolliert das Space Segment. Empfänger bekommen Signale vom Space Segment durch die Atmosphäre. Nah am Boden treten lokale Effekte auf, die Mehrwegausbreitung, Dämpfung, Spoofing und Jamming umfassen. Abbildung 13- stellt die Akteure im Gesamtsystem dar.

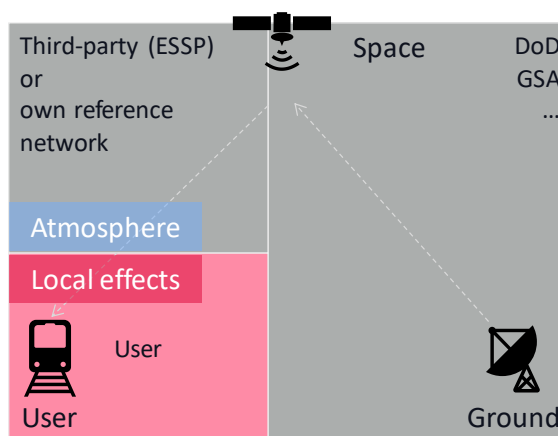


Abbildung 13-4: Verantwortungen im GNSS System

Das Department of Defence für GPS (respektiv die GSA für Galileo) stellt Ground und Space Segmente zu Verfügung mit einem gewissen Service Level. Dritte wie ESSP (Anbieter von EGNOS) bieten prinzipiell zwei zusätzliche Dienste an: sie überwachen die Integrität des Systems in Space und sie liefern Modellen der Atmosphäre (insbesondere Ionosphäre). Dieselben Dienste können von einem intern oder extern betriebenen Referenznetzwerk angeboten werden.

EGNOS Safety-of-Life Service garantiert die Integrität und die Genauigkeit der vom Empfänger berechneten Koordinaten, wenn der Empfänger mit den Minimal Operational Performance Standards konform ist, und wenn die Anwendungsbedingungen denjenigen der Luftfahrt entsprechen. Die Berücksichtigung von lokalen Effekten liegt in der Verantwortung des Users.

13.3.2 Integritätskonzept

STARS und andere Projekte haben gezeigt, dass lokale Effekte Positionsfehler verursachen können, deren Grössenklasse nicht eingegrenzt ist. Das EGNOS Integritätskonzept ruht auf zwei Funktionen, die zusammen abgestimmt sind, und die beide für Anwendung auf der Erdoberfläche weiterentwickelt werden müssen:

- *Fault Detection and Exclusion (FDE)* versucht anhand der Redundanz, grobfalsche Messungen zu identifizieren und zu eliminieren. Sogenannte RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) Algorithmen werden oft für Fehleridentifikation eingesetzt.
- *Ermittlung eines Protection Levels* erfolgt basiert auf der Annahme, dass die nominale Bedingungen erfüllt sind und insbesondere, dass alle Fehler im Vorfeld identifiziert und ausgeschlossen worden sind.

Dieses Integritätskonzept gilt prinzipiell auch wenn zusätzliche Sensorik wie Inertialsensoren im System eingebaut ist.

13.3.3 Mehrdimensionalität des Problems

Lokale Effekte sind per Definition ortsabhängig. Die Umgebung hat eine Wirkung auf die GNSS Signalausbreitung. Signale werden unter anderem von Gebäuden, von Gittern, von der Oberleitung, von Dächern oder vom Laub beeinflusst. Lokale Effekte sind aber auch zeitabhängig, indem die Satelliten sich konstant bewegen. Innerhalb Minuten können neue Satelliten in Sicht kommen, verschwinden oder sich so bewegen, dass deren Signal einem anderen Pfad in der Umgebung folgt.

Folglich müsste eine sehr breite Palette an Situationen für die Nachweisführung in Betracht genommen werden. Die Anwendung von Simulationen ist dabei sehr hilfreich, vorausgesetzt, dass Simulationsmodelle kompatibel mit den Anwendungsbedingungen der Bahn entwickelt werden. Erst nachdem diese Modelle entstanden sind, wird eine Charakterisierung der operativen Performanz einer sicheren GNSS-gestützten Lokalisierung möglich sein.

13.4 Gesamtbewertung

In diesem Kapitel wurde die logische Evolution des virtuellen Balise Konzepts in einen kontinuierlichen Vehicle Locator erklärt. Die offenen Forschungsfelder in den Bereichen Sensor Fusion und Integrität wurden identifiziert. Die provisorische Analyse der GNSS Verfügbarkeit auf dem Schweizer Bahnnetz bringt die zusätzliche Anforderung, mit teilweise beschränktem GNSS-Empfang zu rechnen. Für eine Nachweisführung nötige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden identifiziert.

13.5 Weiteres Vorgehen

Die Analyse der Energiezählerdaten wird im Jahr 2019 weitergeführt. Sobald Anforderungen und Anwendungsbedingungen der Kandidaten-Ortungslösungen bekannt sind, wird die Erstellung der Karte angepasst, um den Realismus der Verfügbarkeitsprognose zu erhöhen.

Parallel wird ein Rahmen gesucht, um die optimale Sensorkombination, ihre Datenfusion und ihre Simulationsumgebung in Hinsicht auf eine Zulassung zu erforschen.