

TGS, Hochverfügbare Geschwindigkeitsbestimmung

Abschlussbericht

ECH-IP19.03_01-2018 / Version 2.0

Auftraggeber:

RegionAlps SA
Rue de la Poste 3
1920 Martigny

Herausgeber:

Enotrac AG
Seefeldstrasse 8
CH-3600 Thun
Tel. +41 33 346 66 11
Fax +41 33 346 66 12
info@enotrac.com
www.enotrac.com

Freigegeben

16.02.2024

© Enotrac AG

Aktuelle Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
2.0	16.02.2024	Freigegeben	T. Vennemann	E. Zollinger	A. Bleiker

Vorherige Version

Version	Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Freigegeben
1.0	23.10.2023	Freigegeben	T. Vennemann	E. Zollinger	A. Bleiker

Änderungen seit der vorherigen Version

Fokussierung und Verkürzung des Inhalts zur allgemeinen Veröffentlichung.

Urheberrecht

Die Urheberrechte liegen bei Enotrac AG. Vervielfältigung, Bekanntgabe an Dritte oder Verwertung seines Inhalts über die vorgesehene Nutzung hinaus sind ohne schriftliche Zustimmung verboten.
© Enotrac AG

Inhalt:

1	Einleitung	4
2	Messprotokoll	5
2.1	Messaufbau	5
2.2	Messungen	6
2.3	Setup und Backoffice Architektur	7
3	Magnetische Charakterisierung der Strecke	9
4	Geschwindigkeitsbestimmung	15
4.1	Allgemeine Methode	15
4.2	Auswertung über Strecke	16
5	Spezifikation des Prototypen	20
6	Schlussfolgerung	22
7	Referenzen	23

1 EINLEITUNG

Im Rahmen des Förderprogramms für Innovationen im regionalen Personenverkehr des BAV wird eine neuartige Messmethode der Geschwindigkeit untersucht ([1]). Die Geschwindigkeit soll über die Messung von ortsabhängigen Magnetfeldern, die im Schienenbereich zufällig variieren, bestimmt werden. Dieser Ansatz ist unabhängig von Schlupf, Witterung oder Schmutz und bietet somit eine zuverlässige Alternative zu bestehenden Verfahren.

Das Ziel des Projektes ist die Erprobung und Weiterentwicklung des neuen Geschwindigkeitssensors und die zugehörige Datenverarbeitung. Hierfür sind Felddaten in realer Umgebung mit möglichen Störeinflüssen unabdingbar. Mit den Daten wird das Messverfahren stufenweise verbessert und der Funktionsnachweis des Sensors wird erbracht.

Um die benötigten Daten für das Projekt zu sammeln wurde ein Testaufbau erstellt, der an einem Fahrzeug montiert wurde und bei Fahrten mittels mehrerer Sensoren Daten über das Magnetfeld gesammelt hat. Diverse Messfahrten wurden mit dem Aufbau durchgeführt. Die gesammelten Daten wurden verwendet, um die Auswertung zu entwickeln und die Messmethode zu erproben.

Basierend auf den während den Messfahrten und Auswertung gesammelten Erfahrungen und den Ergebnissen konnte die Spezifikation des Sensors vorangetrieben werden. Ausserdem wurden RAMS-Anforderungen an den Sensor zusammengestellt, basierend auf der beispielhaften Anwendung als ein Odometriesensor für ETCS-Systeme.

Dieses Dokument dient als Abschlussbericht für das Förderprojekt (Phase 1) und fasst die Ergebnisse des Projekts zusammen. Die vorliegende Fassung des Berichtes ist zur Veröffentlichung durch das BAV vorgesehen.

2 MESSPROTOKOLL

2.1 Messaufbau

Der Messaufbau zur Erfassung der Magnetfelder enthält 7 Sensoren bestehend aus 2 Sensortypen. Die Sensoren wurden für die ersten Messfahrten über der Schiene angeordnet, sodass die vertikale Komponente des Magnetfeldes (z-Richtung) gemessen wurde. Bei den nachfolgenden Messfahrten wurde die Konfiguration der Sensoren geändert, sodass andere Magnetfeldrichtungen (x- und y-Richtungen) gemessen werden konnten.

Die Sensorelemente wurden in einem Aluminiumgehäuse am Drehgestell des Triebwagens eines Domino Triebwagens der RegionAlps montiert. Abbildung 2-1 zeigt den Messaufbau der Sensorelemente. Die Aufzeichnungsgeräte wurden im Fahrzeug aufgestellt.

Synchron zur Aufzeichnung der Sensordaten wurde das fahrzeugseitige Geschwindigkeitssignal (Referenzsignal) erfasst. Die Aufzeichnung der GPS-Daten eines mobilen GPS-Empfängers erfolgte asynchron dazu.

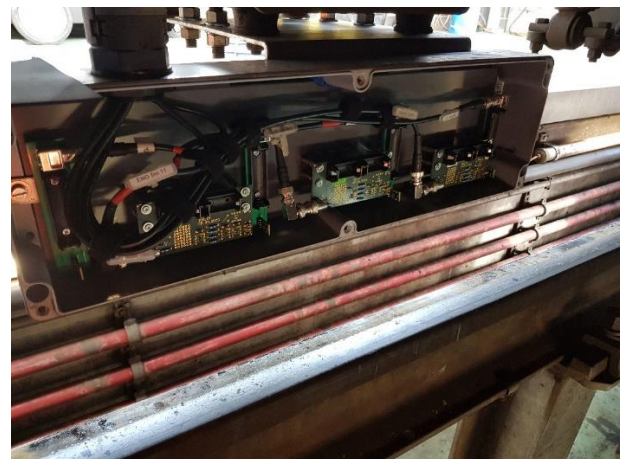


Abbildung 2-1: Messaufbau

2.2 Messungen

Messungen sind auf der Strecke Brig – St Gingolph im regulären Bahnbetrieb durchgeführt worden. Eine Übersicht der Messfahrten und der befahrenen Streckenabschnitte ist in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1: Übersicht der Messfahrten

Messtag	Strecke	Bemerkungen
08.11.2022	Brig ↔ Monthey	Ein Umlauf von 16h – 19h30, in Doppeltraktion bis Monthey, dann entkoppelt und Rückfahrt nach Brig in Einfachtraktion
09.11.2022	Brig ↔ Monthey	Zwei Umläufe zwischen 7h30 – 15h30 in Einfachtraktion
13.12.2022	Brig → St-Gingolph St-Gingolph → Monthey	Wechsel von Sensoren und/oder Batterien vor Messbeginn
19.12.2022	Sierre → Brig Brig → St-Gingolph St-Gingolph → Brig Brig → Martigny	
21.03.2023	Martigny → Brig Brig ↔ Monthey Brig → Monthey Monthey → St-Maurice	Neue Sensoranordnung (x-, y- und z-Richtungen werden erfasst), ein Sensor auf anderer Seite des Drehgestells montiert

Nennenswerte Streckendetails:

- 2 Tunnel zwischen Leuk und Salgesch (1400 m und 2800 m)
- 2 Tunnel zwischen Salgesch und Siders (80 m und 250 m)
- Schutzstrecke zwischen Siders und St-Léonard, Hauptschalter wird ausgelöst -> keine Stromversorgung
- 1 Tunnel zwischen Chamoson und Riddes (276 m)
- Einspurige Strecke, die kurz nach St-Maurice beginnt und bis St-Gingolph reicht. Ausserdem enthält die Strecke mehrere Abschnitte ohne Erdungskabel.

Die Messdateien sind mit Datum und Startzeit ausgewiesen. Die Messnotizen erlauben eine Identifikation des zugehörigen Streckenabschnitts. In der Regel wurden die Messungen beim Halt in einem Bahnhof gestoppt und kurz vor der Weiterfahrt neu gestartet.

Generell wurde auf der Strecke bei zweispurigen Abschnitten links gefahren. Da der Sensor in Richtung Brig → St-Gingolph in Fahrtrichtung links am Fahrzeug montiert war, war er bei Zugkreuzungen auf der Strecke nicht dem kreuzenden Zug zugewandt. Dies geschah jedoch auf Fahrten in Richtung St-Gingolph → Brig. In der Nähe von Bahnhöfen kann es sein, dass von dieser Regel abgewichen wurde, da hier mehrere Gleise vorhanden sind und nicht immer strikt links verkehrt wurde.

2.3 Setup und Backoffice Architektur

Die Messwerte der Magnetfeldsensoren, das fahrzeugeigene Geschwindigkeitssignal (Referenzsignal) und die GPS-Daten wurden mit einem DEWETRON Messgerät erfasst. Grundsätzlich wurden Rohdaten aufgezeichnet, was das nachträgliche Simulieren der Testfahrten und eine breite Palette von Auswertungen ermöglicht. Abbildung 2-2 zeigt eine schematische Darstellung des Messaufbaus und der Backoffice Architektur zur offline Auswertung der Ergebnisse.

Die Auswertung der Daten zur Geschwindigkeitsermittlung basiert auf einem Korrelationsalgorithmus. Die einzelnen Signalverarbeitungsschritte zeigt Abbildung 2-3 schematisch. Die Rohdaten zweier Sensoren der jeweiligen Messfahrt wurden dazu eingelesen und daraus die Rohdaten des gewünschten Zeitfensters ($t-10\text{ s}$, t) zum Zeitpunkt t für die Bestimmung der Korrelation entnommen. Zunächst werden bekannte Störsignale in den Rohdaten mittels Filterung unterdrückt. Anschliessend berechnet der Algorithmus die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit und übergibt diese Werte zurück an die Simulation. Die berechneten Fahrzeuggeschwindigkeiten werden in der Simulation gespeichert und danach noch überarbeitet. Bei dieser Überarbeitung wird zum Beispiel die Stillstandserkennung oder der Kalman Filter angewendet (siehe Kapitel 4). Die Ergebnisse werden dann gespeichert oder dargestellt.

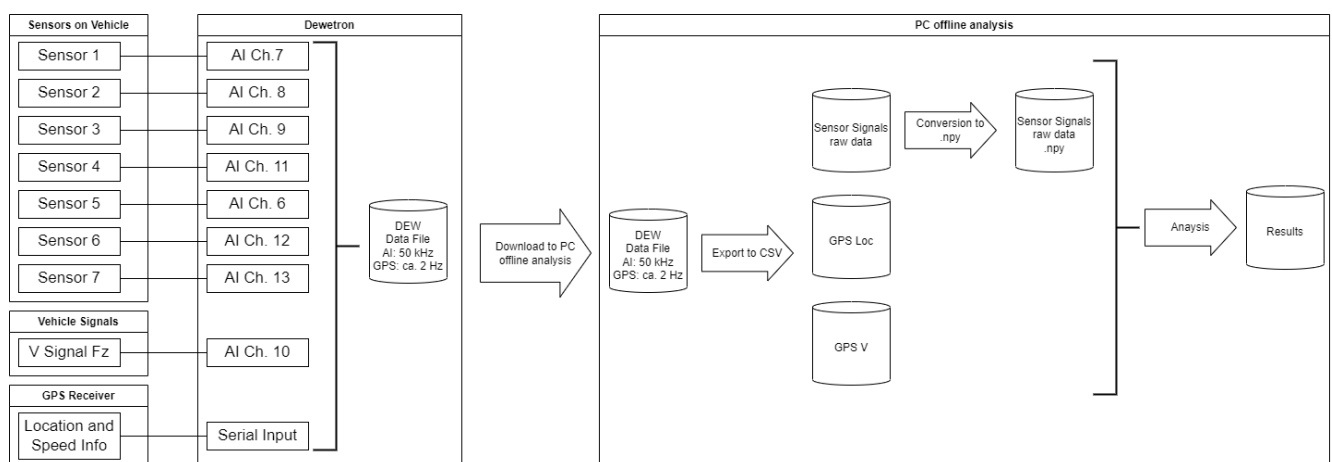


Abbildung 2-2: Schema zur Aufzeichnung und Backoffice Architektur zur Auswertung der Messungen

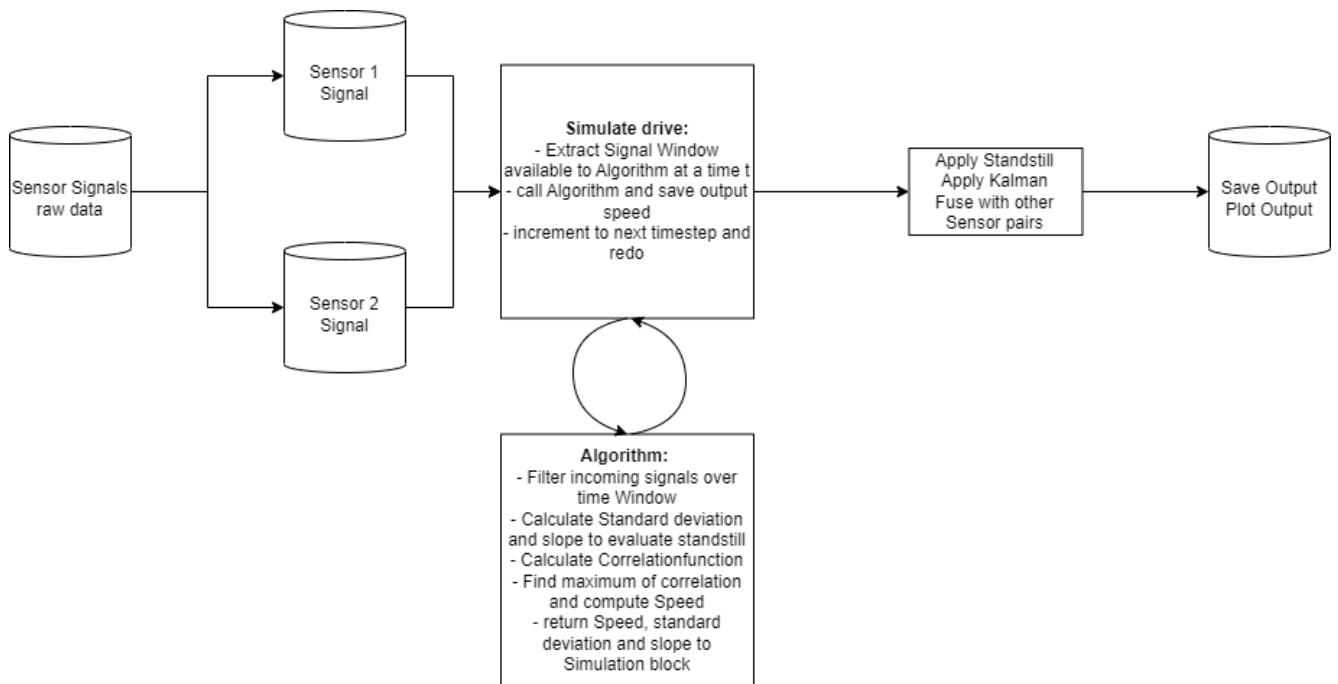


Abbildung 2-3: Simulation der Fahrt und Auswertung anhand des Algorithmus

3 MAGNETISCHE CHARAKTERISIERUNG DER STRECKE

Das gemessene Magnetfeld ergibt sich aus der Überlagerung

- des Erdmagnetfelds,
- des Beitrags durch die Umgebung und Infrastruktur,
- des Beitrags durch den Traktionsstrom des Fahrzeugs oder anderer Fahrzeuge und
- der Störfelder anderer Quellen (magnetisch oder elektrisch zwischen dem Sensor und dem Aufzeichnungsgerät).

Die Beiträge durch den Traktionsstrom des Fahrzeugs oder anderer Fahrzeuge entstehen durch den Rückstrom in den Schienen oder in den leistungsführenden Kabeln sowie direkt von Transformatoren oder anderen Leistungskomponenten auf dem Fahrzeug. Da diese Magnetfelder grundsätzlich nicht von der Position des Fahrzeugs abhängen, aber mit der Zeit stark und schnell variieren können, sind sie für die Auswertung der Geschwindigkeit nicht von Bedeutung, können diese aber stören. Deshalb sind diese Komponenten den Störfeldern zuzuordnen und vor einer Auswertung der Geschwindigkeit möglichst auszufiltern.

Abbildung 3-1 zeigt das Magnetfeld zwischen Conthey und Ardon, Richtung Ardon, wie es am 08.11.2022 um 16:44:33 gemessen wurde. Die unterschiedlichen Strukturen im Signal sind aus den Signalausschnitten in Abbildung 3-1 gut erkennbar. Ein durch den Fahrzeugstrom erzeugtes Magnetfeld mit 16.7 Hz Basisfrequenz ist dem gemessenen Verlauf des Magnetfeldes überlagert und sowohl im Stillstand wie auch beim Fahren gut in den Daten sichtbar. Die Amplituden dieser Signalkomponente variieren mit der Zeit je nach Leistungsbedarf des Fahrzeugs. Beim elektrischen Bremsen des Fahrzeugs ist dieses Signal ebenfalls vorhanden, was auf den zurückgespeisten Strom zurückzuführen ist. Abbildung 3-2 zeigt das Frequenzspektrum eines Signalabschnitts der Dauer von 4 s (zwischen 96 s und 100 s) der Daten von Abbildung 3-1. Gut zu erkennen sind das angesprochene 16.7 Hz Störsignal sowie deren Oberwellen, die das Fahrzeug ebenfalls generiert.

Abbildung 3-3 zeigt beispielhaft in grüner Farbe den gefilterten Verlauf der magnetischen Feldstärke entlang eines Streckenabschnitts.

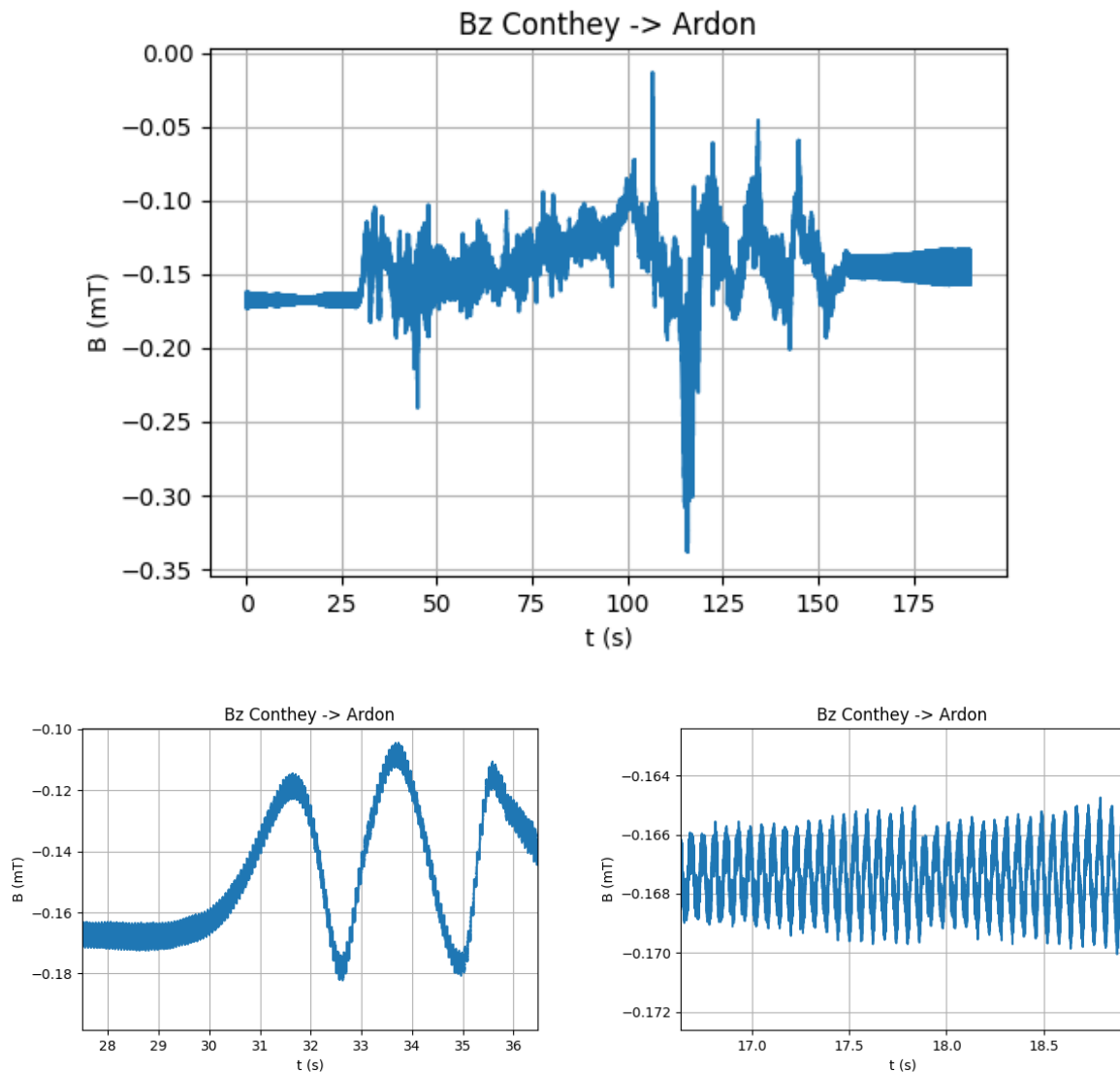


Abbildung 3-1: Rohdaten Magnetfeld Sensor 1, zwischen Conthey und Ardon (Richtung Ardon), Messung vom 08.11.2022 um 16:44:33 (oben). Zwei Ausschnitte zeigen feinere Strukturen des Signals beim Anfahren (unten links) und im Stillstand (unten rechts)

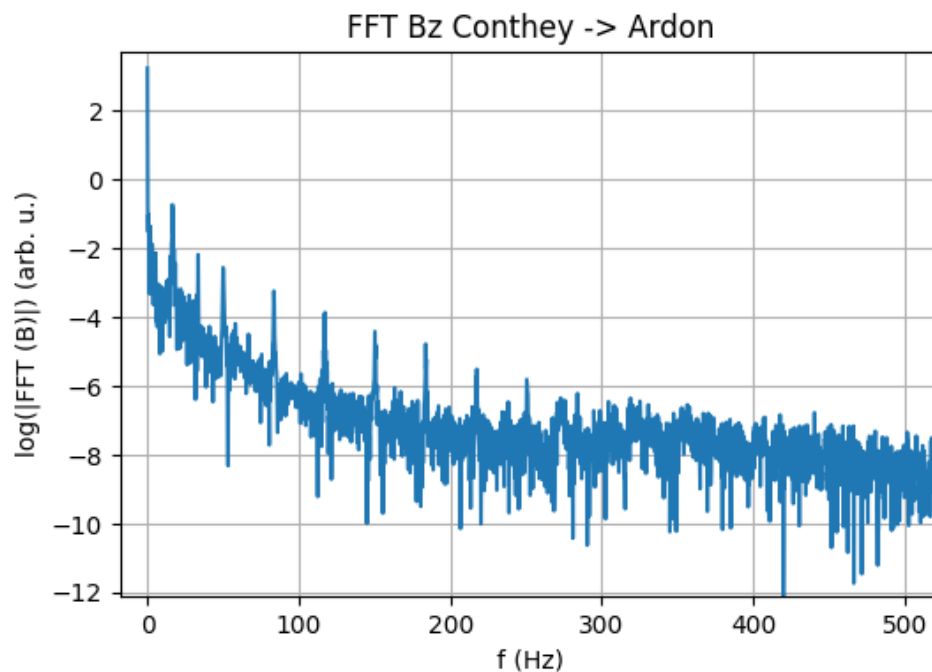


Abbildung 3-2: Fourier Transformation eines 4 s Fensters zwischen 86 s und 90 s der Daten von Abbildung 3-1.

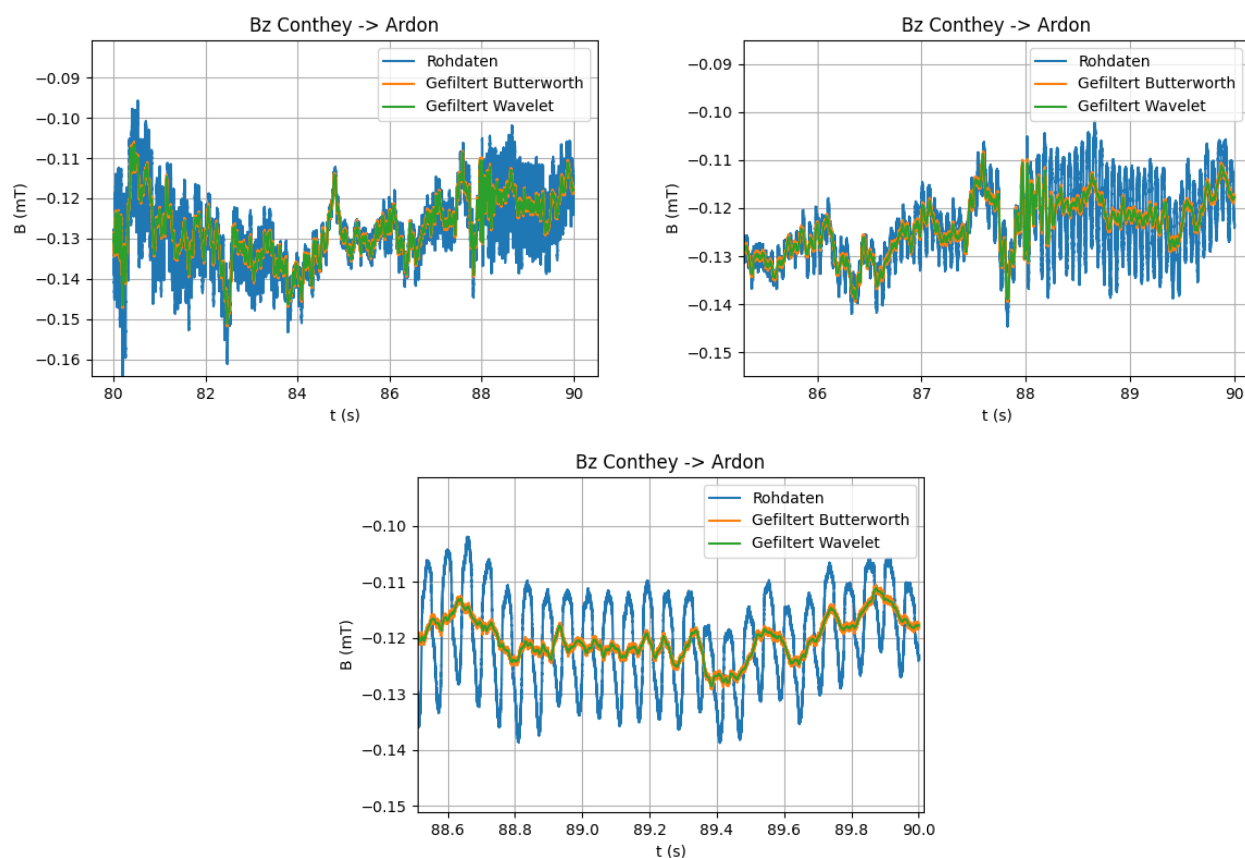


Abbildung 3-3: Rohdaten und gefilterte Daten für das 10 s Zeitfenster zu Zeitpunkt $t = 90$ s.

Während den Messungen wurden zwei Referenzsignale für die Geschwindigkeit mit dem Ziel aufgezeichnet, die Entwicklung des Auswertalgorithmus zu unterstützen. Die Referenzsignale geben einen Einblick in das Geschwindigkeitsprofil der Messfahrt und ermöglichen es, die Magnetfelder nicht als Funktion der Zeit, sondern der Position entlang der Schiene darzustellen. Dies ermöglicht einen Vergleich von unterschiedlichen Fahrten, die gezwungenermassen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen durchgeführt wurden.

Abbildung 3-4 zeigt den Verlauf des magnetischen Feldes entlang der Strecke zwischen Conthey und Ardon (08.11.2022 16:44:33). Stellenweise sind regelmässige Signalstrukturen sichtbar, die einer Oberwelle gleichen. Die Periode dieser Strukturen von ungefähr 0.6 m stimmt mit dem Abstand der Schwellen überein. Damit ist diese Struktur kein Artefakt der Filterung oder Berechnung des Verlaufs der magnetischen Feldstärke, sondern integraler Bestandteil des Magnetfeldverlaufs.

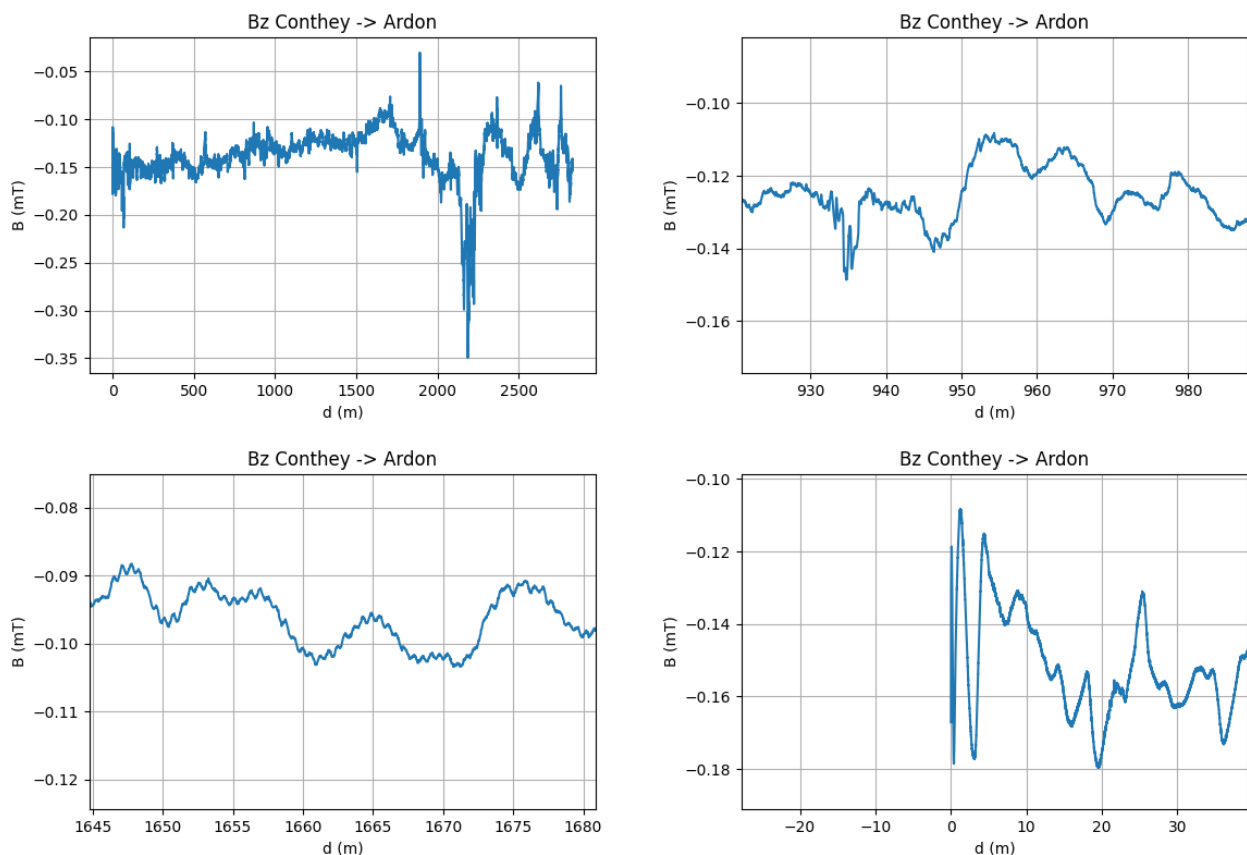


Abbildung 3-4: Verlauf des Magnetfeldes entlang der Strecke Conthey – Ardon (Richtung Ardon, 08.11.2022 16:44:33). Das Magnetfeld vom Sensor 1 ist in Funktion der Distanz gezeigt. Die Distanz wurde von der Referenzgeschwindigkeit (Fahrzeugsignal) integriert.

Der Verlauf des Magnetfeldes wurde durch die Messkampagnen an unterschiedlichen Tagen aufgezeichnet. Vergleiche der Messungen 15h, 19h, 35 Tage und 41 Tage nach der ersten Messung eines Abschnitts wurden ausgewertet, um die zeitliche Stabilität des Magnetfeldes entlang der Schiene zu bewerten. Ein Beispiel ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Übereinstimmung der verschiedenen Magnetfeldverläufe ist grossflächig, wobei jedoch an einzelnen Stellen Abweichungen nach mehreren Tagen zu sehen waren. Ein Vergleich mit Fahrten in die entgegengesetzte Richtung und auf dem Nebengleis zeigte, dass die Magnetfelder zudem für kleinere Strukturen gleisselektiv sind. Grössere räumliche Strukturen im Magnetfeld konnten aber ebenfalls auf dem Nebengleis erkannt werden.

Zusammengefasst scheinen die Magnetfelder mittelfristig stabil und glisselektiv zu sein. Selbst über mehr als einen Monat wurden nur vereinzelte und im Vergleich zur Streckendistanz kleine Abweichungen gemessen. Die Analyse wurde nur auf einem Abschnitt durchgeführt, könnte jedoch auf die gesamte Strecke erweitert werden, um die Aussage zu erhärten.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit genügt es jedoch, wenn die Magnetfelder nur über den Zeitraum der Überfahrt (also wenige Sekunden) konstant bleiben. Änderungen über Tage oder Monate stellen kein Problem für die Auswertung der Geschwindigkeit dar.

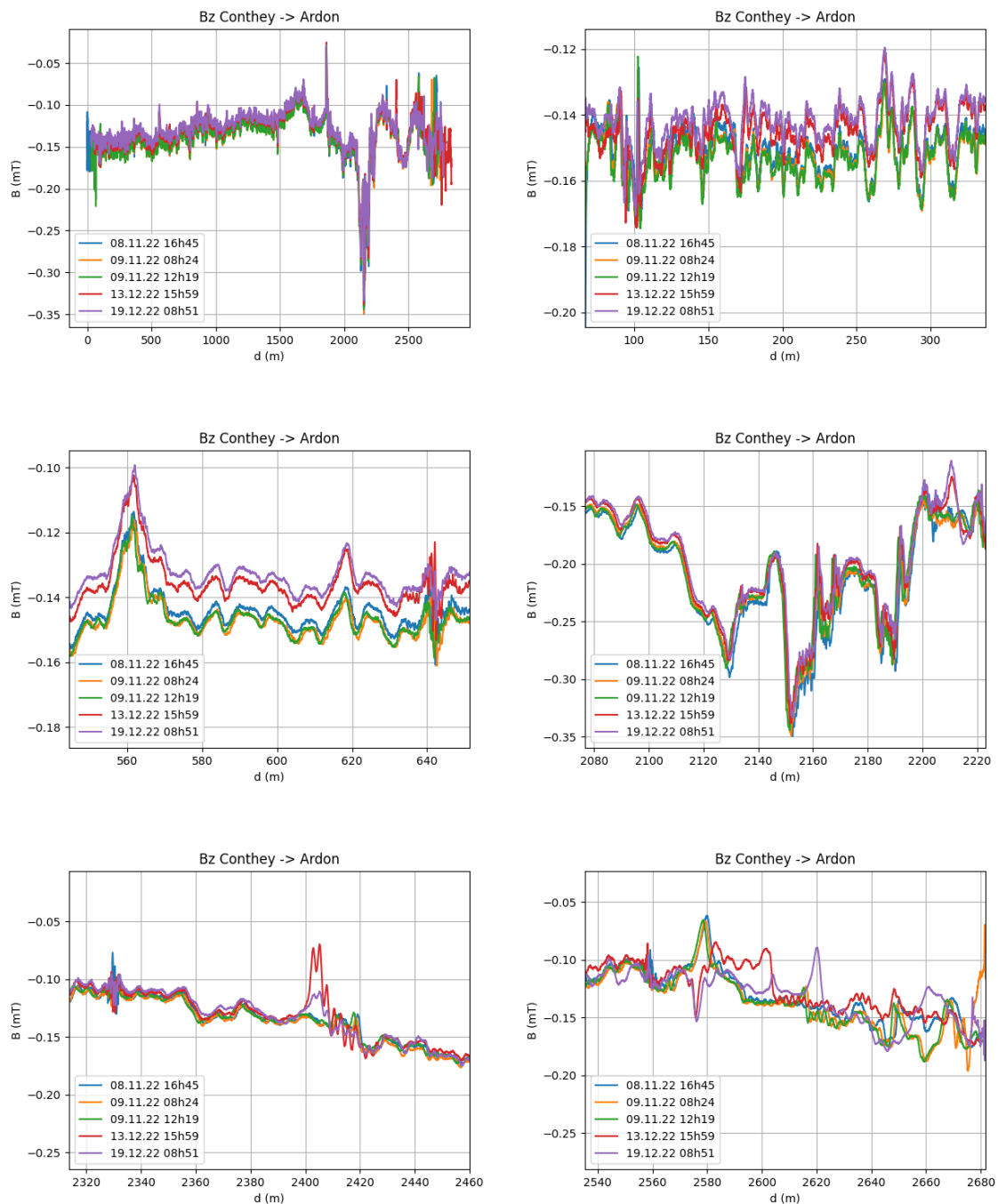


Abbildung 3-5: Verlauf der magnetischen Feldstärke entlang der Strecke Conthey-Ardon. Gesamte Strecke (oben links) und ausgewählte Abschnitte (andere) sind abgebildet.

Streckenabschnitte mit annähernd konstantem Verlauf der magnetischen Feldstärke können ein Problem für die Bestimmung der Geschwindigkeit darstellen, da das Signal nicht vom Signal eines stehenden Fahrzeuges unterschieden werden kann und keine Anhaltspunkte für die Korrelation vorhanden sind.

Eine Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) wurde für eine Fahrt von Monthey nach Brig (ungefähr 100 km) durchgeführt. Dabei wurden das SNR für verschiedene Fensterlängen ausgewertet. Die Untersuchung hat gezeigt, dass Streckenabschnitte mit einem schlechten $\text{SNR} < 10$, der Länge von 10 m, nicht auszuschliessen sind. Diese Abschnitte entsprachen ungefähr 0.2 % der befahrenen Messstrecke.

Die Definition, was als schlechter Abschnitt zählt, müsste bei nachfolgenden Untersuchungen mit Rückblick auf den untersuchten Algorithmus weiter analysiert werden, insbesondere da die Geschwindigkeitsbestimmung nicht systematisch bei schlechten Signalverhältnissen grössere Abweichungen aufzeigte als bei guten Signalverhältnissen.

4 GESCHWINDIGKEITSBESTIMMUNG

4.1 Allgemeine Methode

Die Signalverläufe der einzelnen Sensoren sind bis auf einen zeitlichen Versatz ähnlich, da sie räumlich versetzt am Fahrzeug angeordnet sind und somit das ortsabhängige Magnetfeld zu unterschiedlichen Zeiten erfassen. Die Geschwindigkeitsbestimmung basiert auf der Bestimmung des zeitlichen Versatzes in diesen Daten anhand der Kreuzkorrelation der beiden Signale. Diese Grösse wird für verschiedene zeitliche Versätze berechnet. Der Versatz mit der höchsten Kreuzkorrelation liefert die grösste Übereinstimmung (Korrelation) der Signale. Wird die Kreuzkorrelation der einzelnen Sensorsignale auf 1 normiert, dann ergibt sich ein Wert von 1 bei perfekter Übereinstimmung der Signale und einen Wert von -1 bei perfekter Entgegensetzung der Signale. Bei einem Wert von 0 sind die Signale unkorreliert.

In regelmässigen Zeitabständen wird die Kreuzkorrelation der Signale von zwei Sensoren (B1 und B2) über das vergangene Zeitfenster der Länge T_T wie folgt berechnet:

$$Korr(t, t_{shift}) = \frac{1}{n-1} \sum_{\tau=t}^{t+T_T} \frac{(B_1(\tau) - \overline{B_1})(B_2(\tau - t_{shift}) - \overline{B_2})}{\sigma_1 \sigma_2}$$

$\overline{B_1}$ und $\overline{B_2}$ sind die Mittelwerte der Signale über das betrachtete Fenster und σ_1 und σ_2 die zugehörigen Standardabweichungen. N ist die Anzahl Punkte und t_{shift} die Verschiebung zwischen den Signalen. Zu beachten ist, dass das Signal B_1 eine Länge von T_T , während das Signal B_2 eine Länge von $T_T + t_{shift, max}$ haben muss, um die Korrelation bei Verschiebungen von $t_{shift} = 0$ bis $t_{shift} = t_{shift, max}$ zu berechnen. In diesem Beispiel ist B_2 das voreilende Signal und B_1 das Signal des hinteren Sensors, damit die Übereinstimmung der Signale bei positiven t_{shift} stattfindet.

Abbildung 4-1 zeigt zwei Signale der am weitest entfernten Sensoren für den Zeitpunkt $t = 44.5$ s nach Beginn der Messung am 08.11.2022, 16:44:33. Die Korrelation in Funktion des zeitlichen Versatzes t_{shift} ist ebenfalls dargestellt. Die Signale stimmen gut bei einem Versatz von 0.033 s zu diesem Zeitpunkt überein. Anhand der Distanz der Sensoren (48.8 cm, abhängig vom Setup) kann somit die Geschwindigkeit bestimmt werden. Bei diesem Beispiel wurde somit eine Geschwindigkeit von 53.5 km/h ermittelt. Die Referenzgeschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt liegt bei 49.4 km/h.

Darüber hinaus wurden folgende Ansätze weiterverfolgt, um die Bestimmung der Geschwindigkeit zu verbessern:

- Optimierung der Filterung der zeitgleichen Signale,
- andere Funktionen für Signalvergleiche (Phasenkorrelation, ...),
- Optimierung der Distanzen zwischen den Sensoren,
- Optimierung der verwendeten Zeitfenster,
- Stillstandserkennung, um beim Anfahren und Anhalten grosse Geschwindigkeitssignale zu vermeiden,
- andere Magnetfeldrichtungen, um weitere unabhängige Messungen zu erhalten, die zusammen ausgewertet werden können,

- Geschwindigkeitsbestimmung mit Hilfe eines Fahrzeugmodells zu filtern (Kalman-Filter).

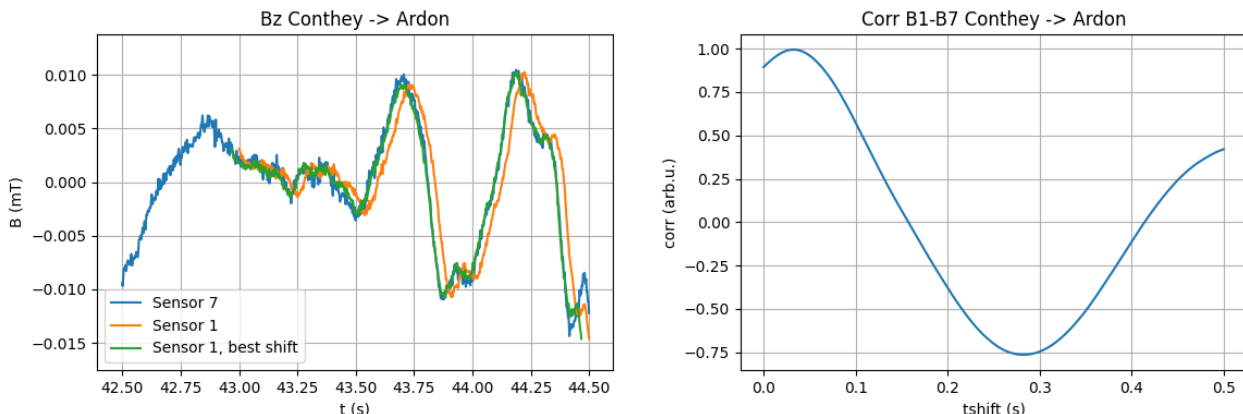


Abbildung 4-1: Signale zur Bestimmung der Korrelation (links). Die Signale stammen von Sensor 1 (blau) und Sensor 7 (orange). Eine zeitverzögerte Version (grün) des Signals von Sensor 7 ist ebenfalls gezeigt, wobei die Verzögerung mit dem Maximalwert der Korrelationsfunktion (rechts) übereinstimmt.

4.2 Auswertung über Strecke

Nachdem die Parameter der Auswertung für die Strecke zwischen Conthey und Ardon optimiert wurden, wurde eine gesamte Strecke zwischen Monthey und Brig ausgewertet. Diese Testfahrt fand zwischen 11h50 und 13h30 am 21.03.2023 statt. Die Ergebnisse sind unten in Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 für einige Abschnitte dargestellt, die eine gute Übersicht über das Verhalten des Algorithmus vermitteln. Bei diesen Auswertungen wurde ein Zeitfenster von 10 s für die Filterung der Signale und von 1.5 s für die Korrelation verwendet. Die Auswertung arbeitet mit Zeitschritten von 0.25 s.

In Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 ist neben der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} und der ermittelten Geschwindigkeit v_{Meas} (auch v_{kalman} genannt) auch der Fehler ($v_{kalman} - v_{ref}$) zwischen der ermittelten Geschwindigkeit und der Referenzgeschwindigkeit gezeigt. Dieser Fehler wurde mit der entsprechenden Anforderung an ETCS-Systeme aus dem Abschnitt 5.3.1.2 des Subsets 041 [2] verglichen.

Accuracy of Speed known on-board: ± 2 km/h for speed lower than 30 km/h, then increasing linearly up to ± 12 km/h at 500 km/h.

Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 zeigen anhand der grün dargestellten Streckenabschnitte, wo die ETCS-Anforderungen an die Geschwindigkeitsmessung erfüllt sind. Rot markiert sind die Streckenabschnitte, bei denen die erlaubte Abweichung überschritten wurde.

Der Algorithmus für die Geschwindigkeitsbestimmung lieferte beim Stillstand des Fahrzeugs hin und wieder Werte von $v > 0$ km/h (in den Beispielen nicht gezeigt). Diese sind auf Zugkreuzungen zurückzuführen. Der Algorithmus wurde hierfür noch nicht ausgelegt.

Die Abweichung zwischen der gemessenen Geschwindigkeit und der Referenzgeschwindigkeit über die gesamte Strecke sind in Abbildung 4-5 (absolute Fehler) und Abbildung 4-6 (relative Fehler) als Histogramme dargestellt. Um die Leistung des Algorithmus zu bewerten, wurden Bereiche der Messungen, für die der Algorithmus bisher noch nicht ausgelegt wurde, von der Bewertung ausgenommen. Dies betrifft insbesondere Zugkreuzungen im Stillstand.

Die Auswertung weist typische Fehler von $\pm 5\%$ auf. Allerdings sind Fehler von bis zu $\pm 15\%$ nicht selten. In der Regel treten die grösseren Abweichungen an vereinzelt Stellen auf und deuten somit auf Streckenabschnitte hin, bei denen die Signale trotz Filterung noch mit Störsignalen behaftet sind oder die Korrelationsfunktion kein eindeutiges Maximum aufweist. Die Präzision des Messalgorithmus ist nicht weit von der ETCS-Anforderung (siehe oben) entfernt, aber noch nicht gut genug, um diese flächendeckend zu erfüllen.

Die Fehler sind zudem bei Be- beziehungsweise Entschleunigungen etwas höher wegen dem durch das Zeitfenster bedingten zeitlichen Versatz. Dieser Effekt allein bleibt aber meist innerhalb der ETCS-Anforderung.

Die Fehler sind ebenfalls bei hohen Geschwindigkeiten ($v_{ref} > 100 \text{ km/h}$) grösser. Die ermittelten Geschwindigkeiten schienen in diesem Bereich grösseres Rauschen aufzuweisen. Die für diese Testfahrt verwendeten Sensoren sind an unterschiedlichen Einbaustellen eingebaut und somit nicht perfekt ausgerichtet. Der Vorteil durch die grössere Distanz zwischen den Sensoren wird dadurch etwas vermindert, da die Signale mehr zueinander verformt sind, was zu einer schwierigeren Interpretation des Korrelationssignals führt.

Insgesamt funktioniert die Stillstanderkennung mit dem vorliegenden Messalgorithmus meist recht zufriedenstellend. Bei sehr langsamen Geschwindigkeiten (unterhalb von 1 km/h) kann es durch den Verlauf der lokalen, magnetischen Signatur vorkommen, dass das Geschwindigkeitssignal beim Übergang zum Fahrzeugstillstand etwas schwingt.

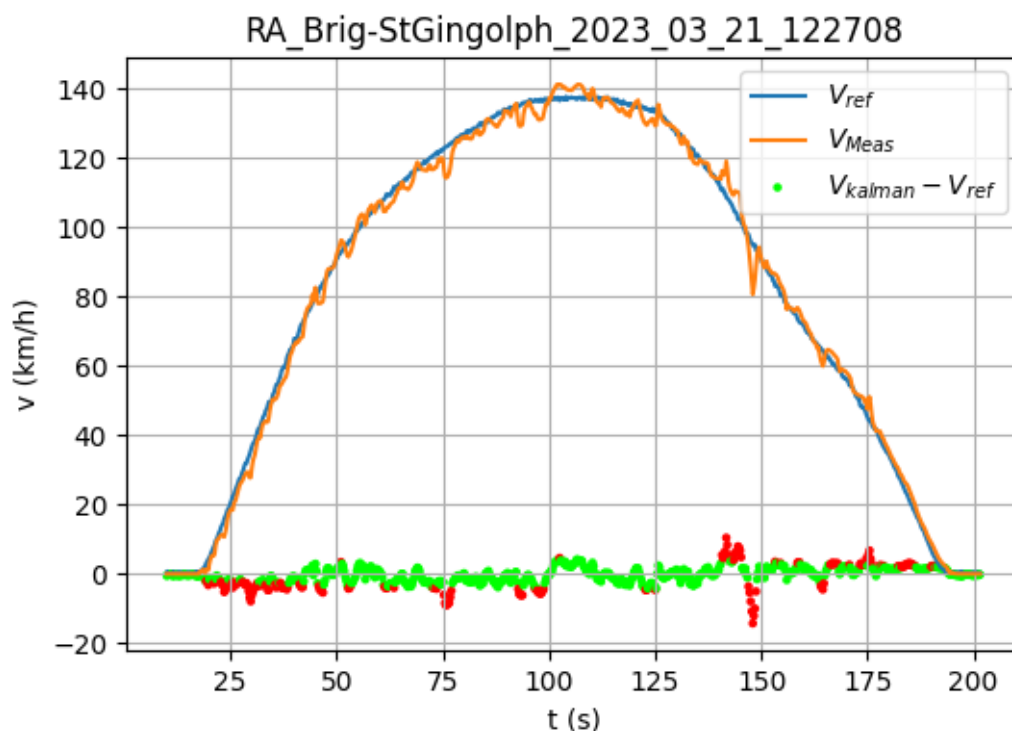


Abbildung 4-2: Auswertung der Fahrt vom 21.03.2023 um 12h27

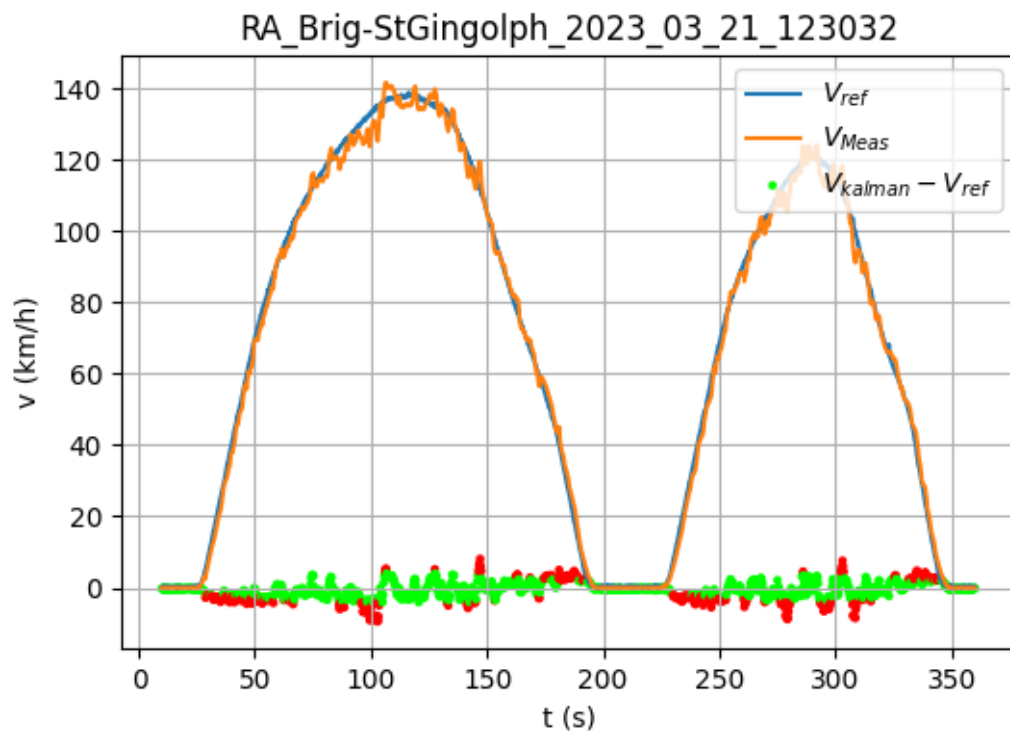


Abbildung 4-3: Auswertung der Fahrt vom 21.03.2023 um 12h30

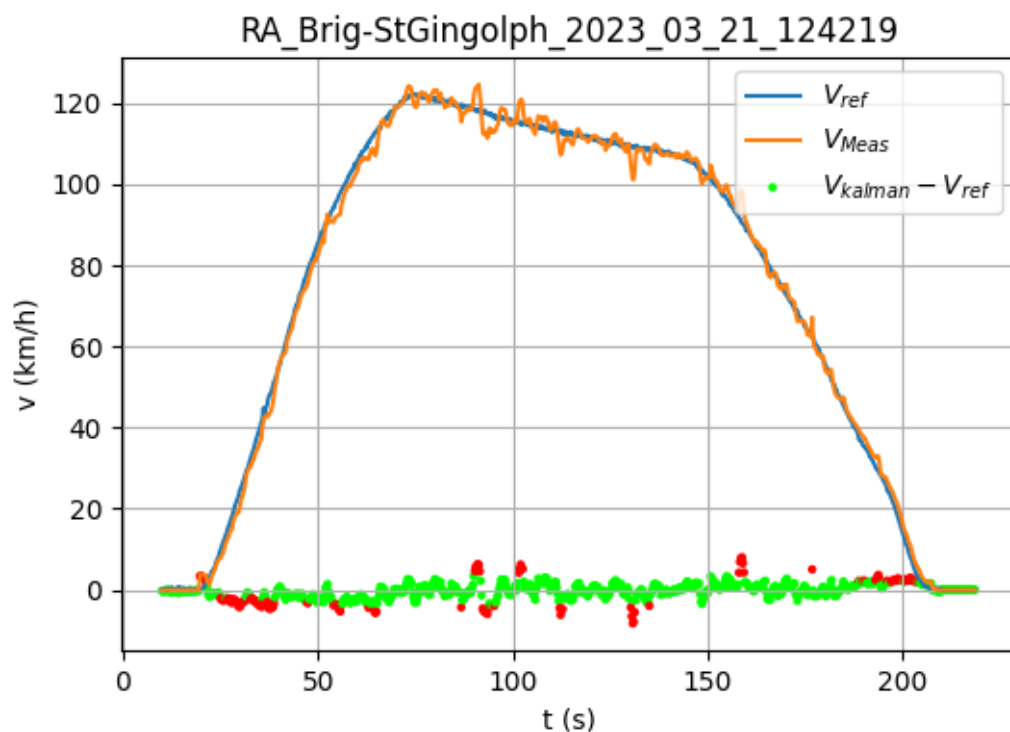


Abbildung 4-4: Auswertung der Fahrt vom 21.03.2023 um 12h42

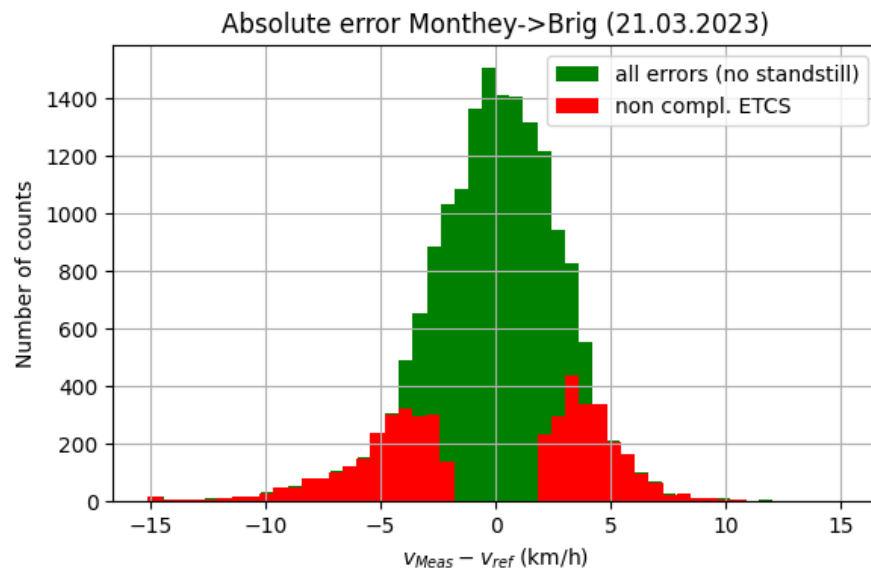


Abbildung 4-5: Histogramm der absoluten Fehler zwischen der ermittelten Geschwindigkeit v_{Meas} und der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} .

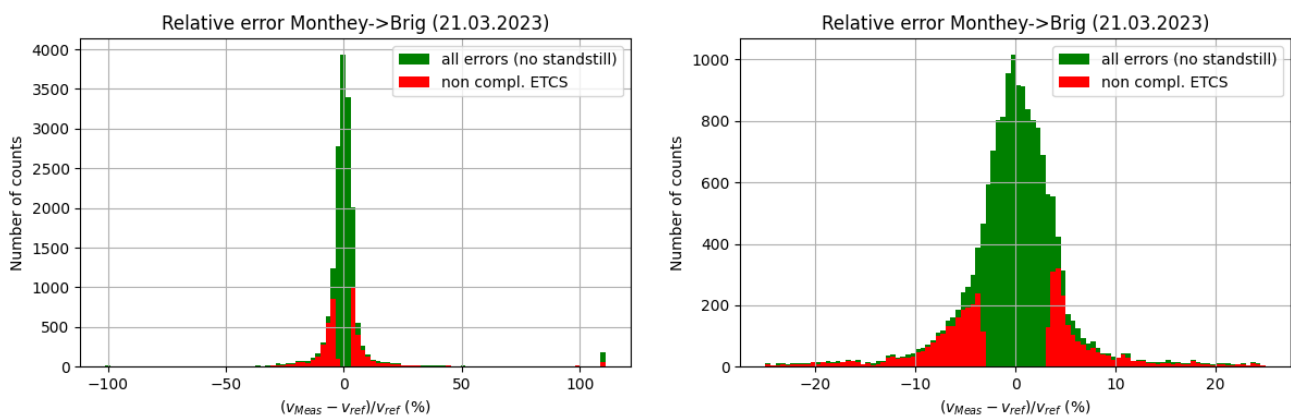


Abbildung 4-6: Histogramm der relativen Fehler zwischen der ermittelten Geschwindigkeit v_{Meas} und der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} . Links ist das gesamte Histogramm dargestellt, rechts eine Vergrößerung auf die Spitze um 0% mit einer feineren Klassenbreite. Das gesamte Histogramm (links), wurde für den Bereich -100% bis +100% dargestellt. Alle Ausreisser sind im Wert 110% zusammengefasst.

5 SPEZIFIKATION DES PROTOTYPEN

Im Umfang des Projekts wurde eine vorläufige Sensorspezifikation erstellt. Die während der Messungen gewonnenen Erfahrungen und die Ergebnisse der Auswertung weisen auf gewisse Design-Entscheide für einen Prototyp hin. Einige relevante Punkte dieser Spezifikation sind hier aufgeführt:

- 5.1.1.1 Die Sensoren müssen eine Messbandbreite aufweisen, um Magnetfelder mit Signalanteilen bis zu 10 kHz zu erfassen.
- 5.1.1.2 Die Sensoren müssen einen Messbereich von ± 1 mT abdecken.
- 5.1.1.3 Die Höhe der Sensoren über der Schienenoberkante muss 10 cm – 15 cm betragen, um sich für den Einbau in Schienenfahrzeugen zu eignen und dennoch nah der Schienenoberkante zu befinden.
- 5.1.1.4 Der Algorithmus muss über Sensordaten eines Zeitfenster von mindestens 10 s verfügen können.
- 5.1.1.5 Die „spurious free dynamic range“ der digitalisierten Sensordaten muss ≥ 16 Bit betragen.
- 5.1.1.6 Die Sensorsignale müssen vor deren Verwendung zur Geschwindigkeitsbestimmung durch Filterung Spektralkomponenten bei 16.7 Hz, hervorgerufen durch die Traktionsströme, und bei 50 Hz, hervorgerufen durch die Stromversorgung von Bordsystemen, sowie deren Oberwellen unterdrücken.
- 5.1.1.7 Die Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit muss mit einer Rate von ≥ 5 Hz erfolgen.

Im Umfang des Projekts wurde ebenfalls eine vorläufige RAMS-Analyse durchgeführt, um relevante Anforderung und Überlegungen so früh wie möglich einbeziehen zu können. Die Überlegungen basierten auf den ETCS-Anforderungen bezüglich Sicherheit und Zuverlässigkeit. Das ETCS-System wurde verwendet, da es als repräsentatives System für gegenwärtige und zukünftige Anwendungen gilt und hinsichtlich Anforderungen und Spezifikation gut dokumentiert ist. Der Sensor ist aber nicht ausschliesslich zum Einsatz innerhalb ETCS-Applikationen bestimmt. Eine Verwendung mit anderen Zugbeeinflussungssystemen und für andere Anwendungen auf dem Fahrzeug ist ebenfalls angestrebt. Eine anwendungsspezifische Analyse und Ermittlung der RAMS-Anforderungen müssen daher in jedem Fall durchgeführt werden.

Unter anderen wurden folgende Anforderungen abgeleitet:

- 5.1.1.8 Die Genauigkeit gemessener Distanzen darf maximal +/- (8m + 8% der gefahrenen Distanz) betragen.
- 5.1.1.9 Die Genauigkeit der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit v muss für $v < 30$ km/h im Bereich von +/- 3 km/h liegen. Für Fahrzeuggeschwindigkeiten ≥ 30 km/h muss sich die Abweichung der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit in einem linear ansteigend Bereich befinden, der bei der Fahrzeuggeschwindigkeit von 500 km/h maximal +/- 20 km/h beträgt.

Des Weiteren wurden folgende Empfehlungen für die Entwicklung des Systems formuliert:

- 5.1.1.10 Um kleine Amplituden bestmöglich zu erfassen und somit die Schwelle für ein gutes Signal tiefer zu setzen, werden empfindliche Magnetfeldsensoren empfohlen.
- 5.1.1.11 Erkennung schlechter Signale im Algorithmus soll anhand einer Meldung der betroffenen Geschwindigkeitsausgaben an das übergeordnete System mitgeteilt werden.

6 SCHLUSSFOLGERUNG

Das im Rahmen des Förderprogramms für Innovationen im regionalen Personenverkehr des BAV durchgeführte Projekt erlaubte es, eine neue Methode der Geschwindigkeitsermittlung anhand der magnetischen Signatur entlang der Fahrstrassen zu untersuchen, was eine wertvolle Basis für weiterführende Arbeiten hin zu einem Prototyp darstellt.

Dazu wurden magnetische Signaturen entlang einer Bahnstrecke der Länge von >100 km im kommerziellen Fahrbetrieb des Eisenbahnverkehrsunternehmens RegionAlps und an verschiedenen Tagen aufgezeichnet.

Die Untersuchungen zeigten, dass anhand der magnetischen Signatur entlang der Bahnstrecke die wahre Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs gegenüber dem Boden (engl. True Ground Speed, TGS) gemessen werden kann. Obwohl die Genauigkeit der so gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit nicht immer die entsprechenden Anforderungen eines ETCS-Systems zu erfüllen vermochte, weisen die Ergebnisse vielversprechend auf einen wertvollen Nutzen dieser neuen Methode für gegenwärtige und zukünftige Bahnanwendungen auf Schienenfahrzeugen hin. In der Tat sind Verbesserungen des Algorithmus, welche die Genauigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit erhöhen, absehbar.

Basierend auf den Ergebnissen sowie den im Projekt gesammelten Erfahrungen konnten Anforderungen an den Sensor definiert werden.

Dem Bundesamt für Verkehr (BAV) danken wir herzlich für die grosszügige Unterstützung und Förderung dieses Projektes. Unser Dank geht auch an RegionAlps und deren Mitarbeiter, die tatkräftig zum Gelingen dieses Projekts beigetragen haben.

7 REFERENZEN

- [1] Finanzierungsantrag vom 10.03.2022, TGS-Sensor – Hochverfügbare Geschwindigkeitsermittlung, V1
- [2] Subset 041, ETMS/ETCS, Performance Requirements for Interoperability, V4.0.0, 07.2023