mFUND
Das Startkapital für die Mobilität 4.0

TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

Projektträgerschaft in Kooperation mit

VDI|VDE|IT

Abschlussbericht

„Verbundprojekt: Lokalisierung von Zügen anhand einer magnetischen Karte des Schienennetzes -MZLS“

Teilvorhaben: PhySens Rail GmbH (FKZ: 19F1128A)
Universität Hamburg (FKZ: 19F1128B)

1. Kurze Darstellung 2
1.1. Aufgabenstellung 2
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens 3
1.4. wissenschaftlichem und technischem Stand 3
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 4
2. Eingehende Darstellung 4
2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 4
2.1.1. Auswahl der Strecken 5
2.1.2. Ergebnisse*: Statistische Evaluierung der Verfügbarkeit* 5
2.1.3. Ergebnisse*: Statistische Evaluierung der Genauigkeit* 6
2.1.4. Ergebnisse*: Langzeitstabilität der magnetischen Karte* 7
2.1.5. Ergebnisse*: Echtzeitfähiges Lokalisierungsverfahren* 9
2.1.6. Ergebnisse*: Kaltstartfähigkeit* 10
2.1.7. Ergebnisse*: Datenmodell für magnetische Karte* 11
2.2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 11
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 11
2.4. Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 12
2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 12
2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 13

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Die genaue absolute Lokalisierung von Schienenfahrzeugen ist eine der größten Herausforderungen in der Bahntechnik. Sie spielt nicht nur eine zentrale Rolle bei der Optimierung der Auslastung vorhandener Gleisinfrastruktur, sondern ist auch eine Grundvoraussetzung für den sicheren automatisierten Fahrbetrieb (ATO). Aufgrund der ungenauen Kenntnisse der aktuellen Zugposition müssen immer ganze Streckenabschnitte blockiert werden, um einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu gewährleisten. Diese Blockabschnitte sind abhängig von der Zugart und der Strecke und können mehrere Kilometer lang sein. Momentane Sicherungssysteme bestimmen die aktuelle Zugposition mithilfe einer Kombination aus streckenseitiger Sensorik, z. B. Balisen und Achszähler, und der Odometrie. Dazu kommen typischerweise Wegimpulsgeber in Kombination mit Dopplerradaren zum Einsatz. Beide Systeme haben bekannte Schwächen und können hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit den steigenden Anforderungen an Sicherheit sowie Verfügbarkeit nicht gerecht werden. Weiterhin ist der Einsatz von streckenseitiger Sensorik mit erheblichen Installations- und Wartungskosten verbunden.

Flexiblere Zugsicherungsverfahren (z.B. ETCS Level 3 mit dem Moving Block) ermöglichen eine effizientere Nutzung der Gleise durch die Anpassung der Abstände zwischen den Zügen, basierend auf deren exakter Position und Geschwindigkeit unabhängig von infrastrukturseitigen Freimeldeanlagen. Zur zugseitigen Positionsbestimmung bedarf es jedoch neuer, innovativer Technologien.

GNSS ist eine der Technologien, die als Schlüssel für eine zukunftsfähige Lokalisierungslösung identifiziert wurde. Weiterhin sind neben klassischer Inertialnavigation verschiedene optische oder Radar-basierte Systeme in der Entwicklung. Keine der aktuell verfügbaren Technologien erfüllt aufgrund unterschiedlicher Schwachstellen die notwendige Anforderung an Genauigkeit und Verfügbarkeit.

GNNS funktioniert beispielsweise nicht in überdachten Gebieten (Tunnel, Bahnhöfe etc.) und die Genauigkeit leidet in urbanen Gebieten aufgrund von Mehrwegeausbreitung. Weiterhin haben aktuelle Ereignisse in der globalen Luft- und Schifffahrt die Anfälligkeit von GNSS gegenüber Stör- und Spoofing-Angriffen und damit verbundener Gefahren verdeutlicht. Die Kombination unterschiedlicher Sensortechnologien kann dabei helfen, die Unzulänglichkeiten einzelner Technologien auszugleichen und eine robuste Lösung für die Herausforderungen des modernen Schienenverkehrs zu bieten.

Einen weiteren innovativen Ansatz bieten magnetfeldbasierte Technologien, um anhand einer Streckenkarte eine Lokalisierung zu ermöglichen. Vorteile eines solchen Systems liegen in der Störsicherheit, mechanischen Robustheit und Toleranz gegenüber Umgebungseinflüssen. Die generelle Machbarkeit einer solchen Lösung wurde bereits gezeigt. Ziel dieses Projektes ist die Machbarkeit der magnetischen Lokalisierungslösung unter betriebsähnlichen Zuständen über einen längeren Zeitraum von mehreren Monaten zu evaluieren. Im Zuge dessen waren insbesondere folgende Punkte im Fokus:

- Echtzeitfähiges Verfahren zur kontinuierlichen Lokalisierung
- Kaltstartfähigkeit
- Erreichbare, typische Lokalisierungsgenauigkeit
- Verfügbarkeit
- Langzeitstabilität der magnetischen Karte
- Rahmenbedingungen zum Einsatz im operativen Bahnbetrieb

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt MZLS wurde mit einer Gesamtlaufzeit von 12 Monaten und einem Finanzvolumen von 107.666,10 € im Rahmen der Förderlinie 1 vom 01.02.2023 bis zum 31.01.2024 gefördert. Als Datengrundlage dienen Magnetfeld- und Geschwindigkeitsdaten, die während des Regelbetriebs des RAILab 3 im Rahmen der Erprobung einer magnetischen Odometrielösung aufgenommen wurden.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde planmäßig vom 01.02.2023 bis zum 31.01.2024 durchgeführt. Der im Antrag spezifizierte zeitliche Ablauf wurde weitestgehend eingehalten. In der initialen Phase des Projektes erfolgte eine Sichtung und Prozessierung der vorhandenen Datensätze. Basierend auf den aufbereiteten Datensätzen wurden anschließend Verfahren zur Erstellung magnetischer Karten und zur Lokalisierung entwickelt und erprobt. Die Entwicklung wurde flankiert von Testmessungen mit einem Draisinenversuchsträger auf einer Teststrecke eines lokalen Infrastrukturbetreibers. Die Testmessungen dienten der iterativen Verbesserung der Verfahren und zur Erprobung der Echtzeitfähigkeit. Abschließend wurde die Zuverlässigkeit, die Genauigkeit und die Gültigkeitsdauer der Karten evaluiert.

1.4. wissenschaftlichem und technischem Stand

Dieses Projekt basierte auf bisherigen Arbeiten der PhySens Rail GmbH zur Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Bestimmung der Geschwindigkeit von Schienenfahrzeugen mithilfe von hochfrequenten Magnetfeldmessungen, welches einen intrinsisch ortsunabhängigen Ansatz verfolgt. Für die grundlegende Technologie wurde ein Patent erteilt (EP3663769) und erste Ergebnisse wurden veröffentlicht [1]. Die Messdaten, die mit dem in [1] beschriebenen Sensorsystem vor und während des Projekts aufgenommen wurden, dienten als Datengrundlage für die Machbarkeitsstudie. Das Magnetfeldsensorsystem ist eine Eigenentwicklung der PhySens Rail GmbH basierend auf der Expertise von Dr. Philip Heinisch und Dr. Katharina Ostaszewski im Bereich der Halbleitermagnetometer und der Kalibrierung von Magnetometersystemen.

Die generelle Machbarkeit einer magnetfeldbasierten Lokalisierung wurde bereits in der Vergangenheit gezeigt [2][3]. Vorrangegangene Studien konzentrierten sich auf die grundlegende Funktionalität im Rahmen von dedizierten Messfahrten über eine maximale Zeitspanne von einigen Wochen. Weiterhin wurde vorausgesetzt, dass die Position des Schienenfahrzeugs zu Beginn auf einige zehn Meter bekannt ist.

Bei der Auswahl geeigneter Strecken im deutschen Schienennetz zur Evaluation der Lokalisierung wurde die interaktive Karte der DB InfraGO (https://geovdbn.deutschebahn.com/isr) genutzt und verfügbare Infrastrukturdaten aus der Mobilithek genutzt.

Literatur:

[1] Ostaszewski K., Heinisch, P., Struckmann, H., Hinz, M., Apitius, M.: Magnetische Odometrie – Neuartige Methode zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit von Schienenfahrzeugen. ZEVrail, Glas. Ann. 9 (2021), S. 332–339.

[2] Heirich, O., Siebler, B., Hedberg, E.: Study of Train-side Passive Magnetic Measurements with Applications to Train Localization. In Journal of Sensors (2017).

[3] B. Siebler, O. Heirich, S. Sand: Train Localization with Particle Filter and Magnetic Field Measurements. 21st International Conference on Information Fusion (FUSION), Cambridge, UK, 2018, Seite 1-5, doi: 10.23919/ICIF.2018.8455298.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Evaluierung der magnetischen Lokalisierung im echtzeitbetrieb und zur Iterativen Verbesserung des Verfahrens wurden auf der Strecke des Infrastrukturbetreibers Tourismus&Warnetahlbahn GmbH Testmessungen durchgeführt. Die Tourismus&Warnetahlbahn GmbH verfügt über ca. 20 km nicht elektrifizierte Strecke. Als Versuchsträger dienten Motordraisinen.

Im Laufe des Projektes fand zusätzlich ein Austausch mit weiteren mFUND Forschungsprojekten statt. Hervorzuheben ist hierbei die REAKT-Foschungsinitiative, deren Ziel es ist die Mobilitätswende mit modernen Technologien und angepassten Standards voranzutreiben. Zwei der Forschungsschwerpunkte sind, unter anderem, die Reaktivierung von stillgelegten Strecken und der autonome Betrieb von Schienenfahrzeugen im Nahverkehr mit Fokus auf ländliche Gegenden. In Kooperation mit der REAKT-Initiative erfolgte die Kartierung eines Teils der stillgelegten Strecke zwischen Malente und Lütjenburg im Rahmen eines initialen Austausches. Insbesondere im Bereich des autonomen Schienenverkehrs ist eine robuste Lokalisierung von großem Interesse. Daher ist die REAKT-Initiative auch interessiert als Partner an einer Projektfortführung mitzuwirken.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die finanziellen Mittel wurden primär für den Einsatz von Mitarbeitern genutzt. Ein kleinerer Teil wurde für Reisen zur Vernetzung bzw. auf Konferenzen und für Testfahrten aufgewendet. Im Rahmen des Projektes wurden folgende Ziele von den Projektpartnern verfolgt:

- Auswahl geeigneter Datenstruktur für Karte
- Statistische Evaluierung der Verfügbarkeit
- Statistische Evaluierung der Genauigkeit
- Langzeitstabilität der magnetischen Karte
- Echtzeitfähiges Lokalisierungsverfahren
- Kaltstartfähigkeit

2.1.1. Auswahl der Strecken

Zu Beginn des Projekts mussten die vorhandenen Daten gesichtet und für eine weitere Verwendung prozessiert werden. Um eine Lokalisierung zu ermöglichen ist es essenziell, dass die magnetischen Daten zeitsynchron mit Ortsdaten verknüpft werden z. B. mit GNSS. Für den Großteil der Messdaten standen als Referenz GNSS-Daten mit einer Abtastrate von 1 Hz und einem Fehler im Bereich von mehreren Metern zur Verfügung. Eine gleisgenaue Ortung mithilfe dieser Referenz war nicht möglich, weshalb die Zuordnung zwischen einem Gleis und den magnetischen Messdaten ohne weiteres nicht eineindeutig möglich war.

Um das Problem zu umgehend wurden primär eingleisige Strecken untersucht. Weiterhin konnten Streckenabschnitte, auf denen das Schienenfahrzeug die Richtung gewechselt hat, z. B. in einem Kopfbahnhof, ebenfalls genutzt werden. Diese Streckenabschnitte waren allerdings nur bis zur nächsten Weiche eineindeutig und daher nur bis zu einigen Kilometer lang.

Für manche Streckenabschnitte, die sehr häufig befahren wurden, konnte anhand eines Vergleichs der magnetischen Signaturen derselben Gleise zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine gleisgenaue Zuordnung erhalten werden. Dieser Ansatz war allerdings sehr aufwendig und konnte nur für vereinzelte Streckenabschnitte eingesetzt werden. In einigen Fällen lag zusätzlich eine deutlich genauere, mit einer IMU korrigierte GNSS-Referenz vor. In diesen Fällen war eine gleisgenaue Ortung mithilfe der Referenz möglich. Insgesamt wurden so ca. 600 km Strecke, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten befahren wurden, identifiziert und die entsprechenden Daten prozessiert und aufbereitet.

2.1.2. Ergebnisse*: Statistische Evaluierung der Verfügbarkeit*

Die Anforderungen an die Verfügbarkeit der Lokalisierungslösung variieren stark mit dem betrachteten Anwendungsfall. Für sicherheitskritische Anwendungen, zu denen Lokalisierungssysteme zählen, gilt im Bahnbereich die Sicherheitseinstufung gemäß CENELEC nach SIL 4. Bei der Evaluierung der Verfügbarkeit muss das Gesamtsystem betrachtet werden, welches neben dem Ortungsverfahrung unter anderem von der Datenübertragung und der Streckenführung abhängt.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde zunächst eine grundlegendere Betrachtung durchgeführt. Der Fokus lag insbesondere auf Betriebsszenarien in denen GNSS-Ortung nur eingeschränkt bzw. nicht genutzt werden kann, z. B. in Tunneln oder in dicht bewaldeten Gebieten. Das Ziel war es die Eignung der magnetischen Lokalisierung als Komplementärsystem zur GNSS-Ortung zu evaluieren, da einer der Hauptschwachpunkte von GNSS die zu geringe Verfügbarkeit ist. Dabei wurde lediglich die Verfügbarkeit der Lokalisierung bei einer aktuellen Karte betrachtet. Die Abhängigkeit der Verfügbarkeit von anderen Systemkomponenten, z. B. der Aktualität der Karte, ist eine Forschungsfrage für ein zukünftiges Folgeprojekt.

Da in den betrachteten Fällen GNSS nicht als Referenz zur Verfügung stand, wurde als Referenz das Geschwindigkeitssignal der Odometrie genutzt.

Für folgende Szenarien wurden mehrere Intervalle ausgewertet:

- Tunnelfahrten
- Brückenüberfahrten
- überdachte Bahnhöfe
- urbane Gebiete
- stark bewaldete Gebiete

Für alle ausgewerteten Intervalle wurde im Gegensatz zur GNSS-Ortung keine Einschränkung der Verfügbarkeit bei der magnetischen Lokalisierung festgestellt. In Abbildung 1 ist beispielhaft die Geschwindigkeit, bestimmt aus dem GNSS-Signal und der magnetischen Lokalisierung, für mehrere Tunnelfahrten dargestellt. Die Tunnelintervalle sind grau hinterlegt.

In der Abbildung ist ersichtlich, dass während der Tunnelfahrten das GNSS-Signal ausfällt. Die magnetische Lokalisierung hingegen liefert weiterhin verlässliche Werte, welche mit dem zu erwartenden Gesamtgeschwindigkeitsprofil konsistent sind.

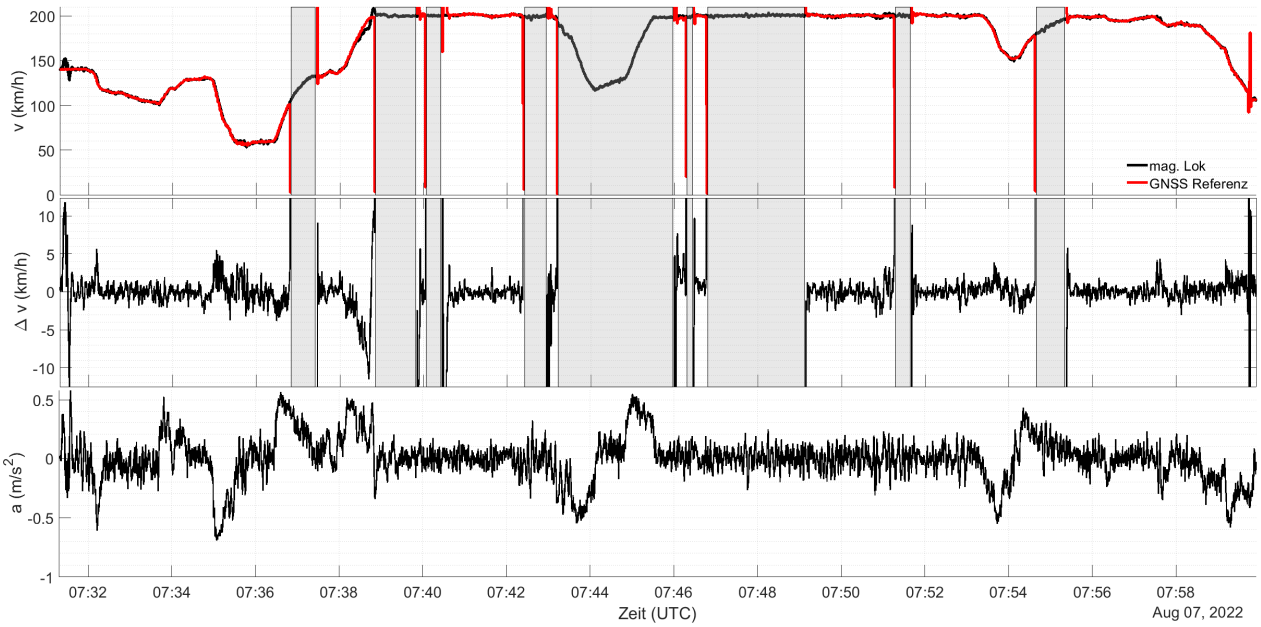

Abbildung 1 Testfahrt mit mehreren Tunneldurchfahrten und fester Fahrbahn. Im oberen Panel ist die Geschwindigkeit der GNSS-Referenz (rot) und der magnetische Lokalisierung (schwarz) über der Zeit aufgetragen. Im mittleren Panel ist der entsprechende Geschwindigkeitsfehler dargestellt und im unteren die Beschleunigung, die sich aus der magnetischen Lokalisierung ergibt.

2.1.3. Ergebnisse*: Statistische Evaluierung der Genauigkeit*

Die Anforderungen an die Lokalisierungsgenauigkeit teilen sich auf Genauigkeitsanforderungen quer und längs zum Gleis. Für eine gleisgenaue Lokalisierung muss die Positionserkennung quer zum Gleis besser als die Hälfte des Abstandes zwischen benachbarten Gleisen sein. Laut EBO § 10 ist der kleinste zulässige Gleisabstand 3,80m, d. h. die Genauigkeit muss besser als 1,90m betragen. Anders als bei der GNSS-Ortung basiert das magnetische Lokalisierungsverfahren auf Eigenschaften des Gleises und ist damit prinzipbedingt gleisgenau.

Längs des Gleises fordert ETCS für die Positionserkennung mittels Balise eine Genauigkeit von ± 5m sowie eine relative Genauigkeit von 2 %. Damit ein neues Ortungssystem vorhandene Systeme ersetzen kann, müssen mindestens dieselben Leistungsparameter, wie durch bisher sich im Einsatz befindliche Systeme, erzielt werden.

Die Genauigkeit wurde im Bezug auf eine kontinuierliche Lokalisierung ausgewertet. Der Fall eines Kaltstarts wurde gesondert betrachtet. Die Qualität, mit der die Genauigkeit evaluiert werden kann, hängt von der Güte des Referenzsignals ab. Daher wurde bei der Betrachtung unterschieden zwischen Intervallen, in denen die „normale" GNSS-Referenz (Fehler: $3\sigma \approx 3$ m) und die korrigierte GNSS-Referenz (Fehler: $3\sigma \approx 1$ m) zur Verfügung steht.

In Abbildung 2 ist beispielhaft ein Intervall mit der korrigierten GNSS-Referenz dargestellt. Im oberen Teil ist der absolute Fehler zwischen Referenz und der magnetischen Lokalisierung zu sehen. Der mittlere Teil zeigt das Geschwindigkeitsprofil der magnetischen Lokalisierung und der Referenz. Der entsprechende Geschwindigkeitsfehler ist im unteren Teil der Abbildung zu sehen. Zur magnetischen Lokalisierung wurde ein Ansatz basierend auf einem Partikelfilter genutzt. Das gezeigte Intervall umfasst eine Streckenlänge von ca. 3 km.

In den ersten 30 s ist der Lokalisierungsfehler mit bis zu 7 m im Verhältnis hoch. Diese Abweichung ist der Initialisierung des Partikelfilter geschuldet, welcher die genaue Position zu Beginn finden muss. Im Anschluss liegt der Fehler größtenteils unterhalb eines Meters mit vereinzelten Ausreißern von bis zu 3 m. Ohne die Initialisierungsphase beträgt der Fehler $3\sigma \approx 1{,}2$ m.

Für die Intervalle mit „normalem" GNSS liegt der Fehler bei $3\sigma \approx 2{,}7$ m, was der Genauigkeitsgrenze der GNSS-Referenz entspricht.

2.1.4. Ergebnisse*: Langzeitstabilität der magnetischen Karte*

Die Basis des Lokalisierungsverfahrens bildet eine Karte, in der die ortsspezifische magnetische Signatur eines Gleises mit absoluten Ortsinformationen, z. B. Streckenkilometer oder Geopositionsdaten, verknüpft ist. Dabei wird vorausgesetzt, dass die ortspezifische magnetische Signatur zeitlich stabil ist.

Die magnetische Signatur eines Gleises ergibt sich aus der Superposition der remanenten Magnetisierung aller Gleiskomponenten und dem Hintergrundmagnetfeld. Im Allgemeinen sind beide Beiträge über Zeitskalen von Jahren stabil. Allerdings gibt es mehrere bekannte Effekte, die zu einer Änderung der remanenten Magnetisierung und damit zu einer Veränderung der magnetischen Signatur des Gleises führen können. Unter Anderem sind dies mechanische Einwirkungen, große elektrische Ströme und magnetfeldbasierte Bremssysteme (Wirbelstrombremse, Magnetschienenbremse). Ein weiterer naheliegender Einfluss sind bauliche Veränderungen und Instandhaltungsmaßnahmen an der Strecke oder der Tausch von Schienen.

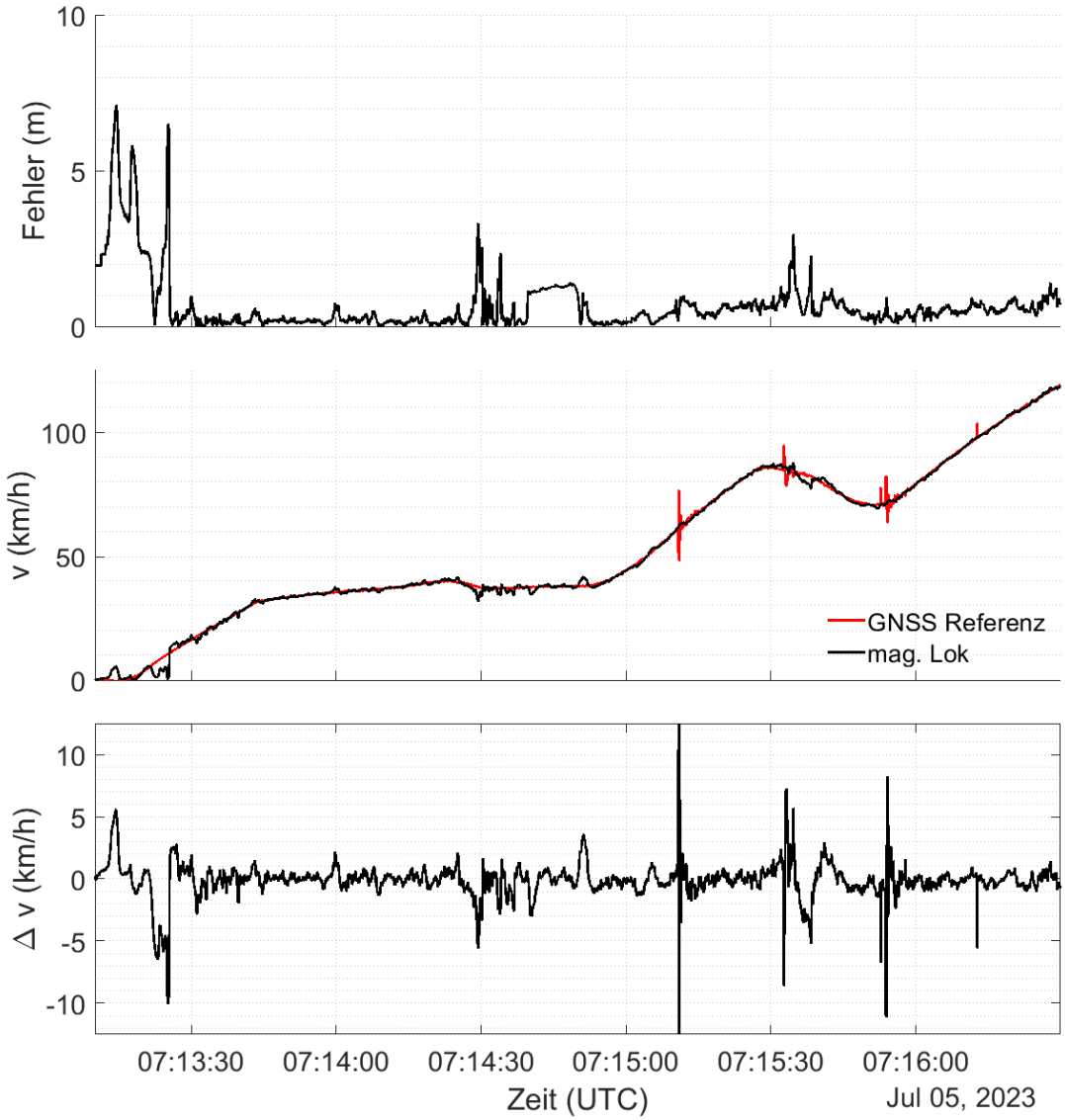

Abbildung 2 Vergleich zwischen der magnetischen Lokalisierung und einer hochgenauen GNSS-Referenz für ein 3 km Streckenabschnitt. Oben ist der Lokalisierungsfehler dargestellt, in der Mitte die zugehörige Geschwindigkeit der GNSS-Refrenz (rot) und der magnetischen Lokalisierung (schwarz) und unten der entsprechende Geschwindigkeitsfehler.

Die beschriebenen Einflüsse wirken sich unterschiedlich auf die magnetische Signatur aus. Bei umfangreicheren baulichen Veränderungen an der Strecke wird eine Neukartierung notwendig, denn der Hauptbeitrag zur magnetischen Signatur kommt durch die Schiene. Wird diese getauscht, ist eine Aktualisierung des betroffenen Abschnittes unumgänglich. Bei anderen baulichen Veränderungen oder Instandhaltungsarbeiten, z. B. Schottern, ist eine Kartenaktualisierung nicht zwingend notwendig.

Um die Gültigkeitsdauer zu evaluieren, wurden die magnetischen Signaturen gleicher Strecken, die zu unterschiedlichen Zeiten befahren wurden, miteinander verglichen. Als Vergleichsmaß wurde die Korrelation genutzt. Für diese Auswertung ist eine gleisgenaue Referenz zwingend erforderlich, um auszuschließen, dass unterschiedliche Streckenabschnitte miteinander verglichen werden. Daher beschränkte sich die Untersuchung auf eingleisige Streckenabschnitte und Abschnitte in denen eine gleisgenaue Referenz vorlag. Der kleinste betrachtete

Zeitabstand betrug einen Tag und der längste 8 Monate.

Die magnetische Signatur ist auf Skalen von Tagen bis Wochen zeitlich stabil. Nach mehreren Monaten ist eine allgemeine, leichte Verschlechterung der Ähnlichkeit zu erkennen. Dies könnte auf mechanische oder elektrische Einflüsse zurückzuführen sein. Die Änderungen sind allerdings so gering, dass die grundlegende Funktion der Lokalisierung davon nicht maßgeblich beeinflusst wird. Es könnte zu einer Verringerung der Genauigkeit führen, dies konnte allerdings mit den Genauigkeitseinschränkungen der vorhandenen Referenz nicht nachgewiesen werden.

Neben den leichten Veränderungen sind zusätzlich räumlich lokalisierte (bis zu 400 m), deutlich stärkere Unterschiede zwischen den Signaturen nach Monaten erkennbar. Bei solch starken Veränderungen handelt es sich vermutlich entweder um bauliche bzw. Instandhaltungsmaßnahmen oder um den Einsatz von Magnetschienenbremsen. Auf keiner der betrachteten Strecken war der Einsatz von Wirbelstrombremsen erlaubt. Bei solch starken Veränderungen in der magnetischen Signatur ist die Lokalisierung nur noch eingeschränkt möglich. Zur genaueren Untersuchung der Einflüsse sind weitere Informationen notwendig, z. B. in Form von kameragestützten Systemen.

2.1.5. **Ergebnisse*: Echtzeitfähiges Lokalisierungsverfahren***

Das Verfahren zur Lokalisierung muss in der Lage sein in Echtzeit anhand eines Vergleichs von gemessenen Magnetfelddaten mit Magnetfelddaten einer Karte, die aktuelle Position des Schienenfahrzeugs zu bestimmen.

Da die magnetische Signatur eine feste räumliche Skala besitzt, im Betrieb aber zeitlich abgetastet wird, sind in der während der Fahrt gemessenen Signatur dynamische Effekte in Form von Streckung und Stauchung der Signatur sichtbar. Diese Effekte müssen vor Abgleich mit der Karte entweder durch hinzuziehen von Geschwindigkeitsdaten korrigiert werden oder das Verfahren aggregiert Informationen über der Zeit. Dadurch ergeben sich im Prinzip zwei Ansätze:

Template Matching

Beim *Template Matching* wird das gemessenen Magnetfeld mithilfe von Geschwindigkeitsinformationen in ein räumlich aufgelöstet Signal überführt und dann mithilfe eines Ähnlichkeitsmaßes mit der Karte verglichen. Im Rahmen der Studie wurden unterschiedliche Ähnlichkeitsmaße untersucht und *Dynamic Time Warping* (DTW) als robustestes Maß identifiziert. Da DTW in der Lage ist Zeitreihen unterschiedlicher Länge aufeinender abzubilden und zu vergleichen, können leichte Verzerrungen der magnetischen Signatur aufgrund von Fehlern in der Geschwindigkeitsbestimmung ausgeglichen werden. Die Ähnlichkeit der Signale liefert zugleich ein robustes Qualitätsmaß, welches für eine Konfidenzbetrachtung genutzt werden kann. Für diesen Ansatz muss die initiale Position des Schienenfahrzeugs nicht bekannt sein. Nach einer Mindestfahrstrecke kann das Schienenfahrzeug auf einer gegebenen Karte lokallisiert werden (kaltstartfähig).
Die benötigten Geschwindigkeitsinformationen können entweder durch ein zeitsynchonisiertes zusätzliches System geliefert werden oder mithilfe eines erweiterten Sensoraufbaus durch eine magnetische Odometrie.

Partikelfilter

Der Ansatz basierend auf einem Partikelfilter approximiert mithilfe eines Zustandsmodells und einem punktweisen Abgleich zwischen gemessenen Magnetfelddaten und der Karte die aktuelle Position des Schienenfahrzeugs. Bei diesem Ansatz sind keine Geschwindigkeitsinformationen notwendig. Allerdings ist der Partikelfilter nicht deterministisch und die initiale Position des Schienenfahrzeugs muss bis auf ca. 20 Streckenmeter bekannt sein.
In Bezug auf die erreichbare Genauigkeit und Verfügbarkeit gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen. Beide haben ihre Vor- und Nachteile, welche in folgender Tabelle zusammengefasst sind:

Tabelle 1 Vor- und Nachteile der Lokalisierungsverfahren

	Vorteile	Nachteile
Template Matching	kaltstartfähig deterministisch Ähnlichkeit als Qualitätsmaß	Geschwindigkeitsinformation notwendig (zeitsynchron) höherer Rechenaufwand
Partikelfilter	effizient, hohe Abtastraten möglich (> 10 Hz) keine Geschwindigkeitsinformation notwendig	nichtdeterministisch nicht kaltstartfähig kann divergieren

2.1.6. Ergebnisse*: Kaltstartfähigkeit*

In diesem Kontext ist ein Kaltstart definiert als das Lokalisieren des Schienenfahrzeugs ohne konkrete vorherige Kenntnisse der Position. Aus praktischen Gründen ist es sinnvoll, den Kartenabschnitt, in dem gesucht werden soll, einzugrenzen, da der Fall, dass ein Schienenfahrzeug z. B. im gesamten deutschen Schienennetz gesucht werden soll, geringe praktische Relevanz hat. Im Rahmen der Evaluation wurde mit Kartengrößen von bis zu 20 Streckenkilometern gearbeitet.

Da das magnetische Lokalisierungsverfahren auf dem Abgleich der magnetischen Signatur der Schiene mit einer Karte basiert, muss eine bestimmte Mindestlänge des Gleises überfahren worden sein, um eine Lokalisierung überhaupt zu ermöglichen. Stehende Schienenfahrzeuge können mit diesem Verfahren nicht geortet werden. Die Eindeutigkeit der Positionsbestimmung steigt mit der Anzahl der gefahreren Meter. Ab einer bestimmten gefahrenen Strecke wird bei gegebener Kartengröße die Positionsbestimmung eindeutig.

Zur Evaluation der Kaltstartfähigkeit wurde auf Streckenabschnitte unterschiedlicher Länge (1 km, 5 km, 20 km), untersucht ab wieviel gefahrenen Metern die Positionsbestimmung eindeutig ist. Um Einflüsse von streckenspezifischen Eigenschaften auszuschließen, wurde die Analyse mit mehreren, nicht überlappenden Teilstreckenkarten der entsprechenden Länge durchgeführt.

2.1.7. Ergebnisse*: Datenmodell für magnetische Karte*

Für das magnetische Lokalisierungsverfahren bietet sich ein topologisches Datenmodell an, ähnlich zu der Positionsbestimmung durch Balisen und Odometrie. Bei einer topologischen Karte wird das Schienennetz durch ein Knoten-Kanten-Modell dargestellt. Dabei stellt jede Kante ein eindimensionales Gleiselement dar. Abzweigungsmöglichkeiten (Weichen) sind als Knoten dargestellt. Damit werden zur Lokalisierung die topologischen Informationen und die Distanz zwischen Knoten unterstützend genutzt. Ist der Fahrplan bekannt, kann die Karte weiter auf eine 1D- Karte mit bekannten Abzweigungen reduziert werden.

Im Gegensatz zu geometrischen Karten werden bei topologischen Karten die Gleiselemente nicht in ihrer geometrischen Form dargestellt. Da die magnetische Lokalisierung inhärent ein 1D Lokalisierungsverfahren ist, bieten geometrischen Informationen keinen größeren Nutzen und können daher vernachlässigt werden.

Der Speicherbedarf der Karte beträgt max. 1 MB/km, womit sich für das deutsche Schienennetz eine maximale Kartengröße von ca. 39 GB ergibt.

Zum Speichern der magnetischen Karte bieten sich Vektordatenbanken an, in welchen mehrdimensionale Magnetfeldmessungen mit Streckeninformationen verknüpft werden. Diese Datenbanken sind optimiert auf das Speicher, Lesen und Analysieren von mehrdimensionalen Zeitreihen. Sie bieten nativ die Möglichkeit zum Einlesen der Messdaten in Echtzeit, eine optimierte Kompression, Aggregation von Daten und zum Vergleich von Vektoren. Aufgrund von neusten Entwicklungen im Bereich von Large language models (LLM) in der künstlichen Intelligenz sind Vektordatenbanken wieder verstärkt in den Fokus von Forschung und Entwicklung gerückt. Daher ist zu erwarten, dass in Zukunft mit weiteren Verbesserungen zu rechnen ist, wodurch auch die magnetische Lokalisierung profitieren würde.

2.2. Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Mittel für die PhySens Rail GmbH und für die Universität Hamburg wurden weitestgehend wie geplant abgerufen und verwendet. Die Mittel wurden bei beiden Projektpartnern überwiegend für Personal eingesetzt. Bei der PhySens Rail GmbH lag der Fokus auf der Datenverarbeitung und -analyse. Das Personal der Universität Hamburg war primär mit der effizienten Implementierung und dem Testen relevanter Algorithmen beschäftigt.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In der Anfangsphase des Vorhabens stand die Sichtung und Aufbereitung der vorhandenen Magnetfelddaten im Fokus. Dieser Schritt ist die Voraussetzung für eine spätere, aussagekräftige Evaluation des Lokalisierungsverfahrens und muss daher mit entsprechender Sorgfalt durchgeführt werden. Essenziell hierbei ist die gleisgenaue Zuordnung der gemessenen magnetischen Signaturen. Bei einer fehlerhaften Zuordnung kann es insbesondere bei der Untersuchung der Kartengültigkeitsdauer zu falschen Schlussfolgerungen kommen, da dann magnetische Signaturen unterschiedlicher Gleise miteinander verglichen werden. Mit der vorhandenen Referenz war dies nicht ohne weiteres möglich, weshalb erheblicher Arbeitsaufwand für eine belastbare Zuordnung investiert werden musste.

Sowohl bei dem Verfahren zur Kartenerstellung als auch beim Verfahren zur Lokalisierung wurde ansatzoffen gearbeitet. Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden vorab vorhandene Herangehensweisen identifiziert, evaluiert und weiterentwickelt. Die Weiterentwicklung wurde flankiert durch Testmessungen, um die Echtzeitfähigkeit sicherzustellen und Ergebnisse aus den Testfahrten in eine iterative Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Die ansatzoffene Herangehensweise war hierbei essenziell, da verschiedene Verfahren unterschiedliche Leistungsparameter aufweisen. Für eine vollumfängliche Evaluation war daher eine umfangreiche Betrachtung notwendig, um das volle Potential der magnetischen Lokalisierung auszuwerten. Auch eine Kombination verschiedener Verfahren musste betrachtet werden.

2.4. Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Ziel dieses Vorhabens war die Evaluierung der Machbarkeit einer magnetfeldbasierten Schienenfahrzeuglokalisierung unter betriebsähnlichen Bedingungen und längeren Zeiträumen. Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie haben gezeigt, dass die magnetische Lokalisierung in Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit und Verfügbarkeit eine aussichtsreiche Technologie für eine fahrzeugseitige Lokalisierung ist. Insbesondere ist es möglich mit der magnetischen Lokalisierung bekannte Schwächen bestehender Verfahren, z. B. Abschattungseffekte (GNSS), auszugleichen. Weiterhin konnten wichtige Erkenntnisse zur magnetischen Kartenstabilität gewonnen werden, welche während und nach Abschluss des Projekts im Rahmen mehrere Veranstaltungen vorgestellt und diskutiert wurde, u. a. mit der DB InfraGO und dem DZSF. Die im Verwertungsplan beschriebene Notwendigkeit einer alternativen Möglichkeit zur Schienenfahrzeuglokalisierung hat sich im Laufe des Vorhabens und insbesondere in der Disseminationsphase bestätigt. Vielmehr haben sich sogar weitere potentielle Anwendungen ergeben. Hierbei sind insbesondere die Vernetzung mit den Projekten mFUND-REAKT-DATA und mFUND-Indres hervorzugeben, in denen die magnetische Lokalisierung mit einer intelligenten Verkehrsplanung und der Infrastrukturkartierung zwei potentielle Anwendungsfelder gefunden hat. Die positiven Ergebnisse der Machbarkeitsstudie und die intensive Vernetzung mit anderen mFUND Projekten soll nun, wie im Verwertungsplan angedacht, in einem FL2 Folgeprojekt genutzt werden, um ein Echtzeitlokalisierungssystem zu entwickeln und für potentielle Anwendungsbereiche zu erproben.

2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurden auf Konferenzen, Vernetzungsveranstaltungen und mit Partnern aus dem Netzwerk die Inhalte der Studie fortlaufen diskutiert. Während der Projektlaufzeit sind keine neuen Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erste Ergebnisse des Vorhabens wurden in der Fachzeitschrift ZEVrail veröffentlich:
Evaluation der magnetischen Lokalisierung von Schienenfahrzeugen unter betriebsähnlichen Zuständen, Ostaszewski K., Heinisch, P., Ghazaleh, R., Struckmann, H., Dieckow, N., Apitius, M.,. ZEVrail - Glaser Annalen, Ausgabe 06/07, S. 240 – 245, 2024 (Jahrgang 148)
Eine weitere Publikation mit dem Schwerpunkt Lokalisierungsverfahren wird momentan vorbereitet**.** Die Ergebnisse des Vorhabens wurden im Rahmen des mFUND DbD Workshop Series: No 8 -Smart Rail Transport Management präsentiert. Weiterhin soll das Projekt auf der InnoTrans 2024 vorgestellt werden. Auf Fortschritte im Projekt, Teilnahmen an Konferenzen und Treffen mit Partnern wurde mit diversen LinkedIn Post hingewiesen.

Braunschweig, 20.08.2024