

Modellbasierte Weiterentwicklung einer Navigationsplattform für den autonomen Rangierbetrieb

Cedric Steinbach¹, Roman Schaal², Martin Cichon²

¹ Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Nürnberg

² Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg, Technische Hochschule Nürnberg

Kurzfassung

Am Institut für Fahrzeugtechnik der TH Nürnberg liegt ein Forschungsschwerpunkt auf der Entwicklung von Lösungen für das autonome Rangieren. Eine dafür entwickelte Navigationsplattform, die sich auf die selbsttätige Routenwahl konzentriert, wurde um Module für die Standortbestimmung und die Kursüberwachung erweitert und auf Modellebene angewendet. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf der Standortbestimmung und der damit einhergehenden Karteneinpassung (eng. Map Matching). Bestehende Map Matching Algorithmen werden beschrieben und dabei besonders auf die Verfahrensweise der topologischen Algorithmen eingegangen. Eingegangen wird auch auf die Anpassungen des Algorithmus für die Anwendung in einem spurgeführten Verkehrssystem und die verschiedenen Einflussgrößen auf die Standortbestimmung.

Schlagworte

Map Matching, Karteneinpassung, autonomes Rangieren

1. EINFÜHRUNG

Die mechanische Spurführung von Eisenbahnen und die damit einhergehende Beschränkung der Bewegungsmöglichkeiten auf einen Freiheitsgrad in Längsrichtung des Zuges prädestiniert das System für einen autonomen bzw. vollautomatisierten Betrieb. Dies ist mit ein Grund, warum im Vergleich zum Straßenverkehr „die Schiene [...] mehr als 30 Jahre Vorsprung“ [1] bei dem Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen hat. Bisher fahren diese vor allem im Nahverkehr und dort in abgeschlossenen Systemen mit hohen Fahrleistungen (z.B. U-Bahn-System). Ebenfalls ein hohes Potenzial für einen fahrerlosen Betrieb wird dem Rangieren in dem größtenteils abgeschlossenen System von Rangierbahnhöfen bescheinigt. [2]. Dort ist ein wiederkehrender Fahrtablauf das Anfahren an Güterwagen, das Abdrücken der Güterwagen über den Ablaufberg und die Rückfahrt zum Ausgangspunkt. Die Automatisierung dieses Ablaufs und die dafür notwendige Entwicklung einer autonomen Rangierlokomotive sind Bestandteile eines Forschungsprojekts am Institut für Fahrzeugtechnik der TH Nürnberg [3]. Im Rahmen dieses Projektes wurde eine Navigationsplattform für den Einsatz in einer autonomen Rangierlokomotive entwickelt [4]. Gleichzeitig besteht mit dem Eisenbahntestfeld (ETF) ein Versuchsfeld für den Einsatz von autonomen Rangierlokomotiven auf Modellebene.

Die Plattform soll eine autonome Rangierlokomotive dazu befähigen, Rangieraufträge in einem Bahnhof auf Modellebene umzusetzen. Der Fokus liegt dabei auf der Navigation der Fahrt zwischen dem Standort der Lokomotive und dem Zielgleis des Rangierauftrags. Ausgangs-

punkt ist die in [4] entwickelte Navigationsplattform. Die Weiterentwicklung der Plattform soll die optimale Route zum Zielgleis bestimmen und die erforderlichen Befehle für die Durchführung der Fahrt ausgeben. Angewendet wird die Navigationsplattform im Rahmen des ETF der TH Nürnberg, wofür dieses mit einem Indoor Positioning System (IPS) ausgestattet wird.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Navigationsplattform

In [4] und [5] wurden die Grundlagen für die Erstellung einer Navigationsplattform für den autonomen Rangierbetrieb erarbeitet. Aufbauend auf der Digitalisierung von Gleisinfrastruktur wurde eine Navigationsplattform, deren Schwerpunkt auf der Analyse des abgeleiteten Graphen sowie der Routensuche liegt, erstellt. Als Einflussgröße der Routenwahl dienen die Länge der Routen sowie die Standorte und Routen anderer Lokomotiven. Ansatzpunkte für eine Optimierung sind die bisherigen Beschränkungen der Start- und Zielpunkte, die Berücksichtigung der Länge der Lokomotiven und die Einbeziehung der Anzahl der erforderlichen Richtungswechsel einer Route. Dazu bedarf es teilweise einer Anpassung des zu Grunde liegenden Graphen.

2.2. Eisenbahntestfeld

Das ETF ist eine Versuchsumgebung für die Erprobung von autonomen Rangierlokomotiven auf Modellebene. Es umfasst auf einer U-förmigen Grundplatte über 45 m Gleise mit 19 Weichen des Lehmann-Groß-Bahn-Gleissystems mit 45 mm Spurweite. Der Gleisplan mit

Gleisharfe ist einem Rangierbahnhof nachempfunden. Die eingesetzte Lokomotive hat eine umgebaute Steuerung, die einen Betrieb unabhängig von der Polarität und Spannung der im Gleis vorliegenden Spannung ermöglicht. Kern der Steuerung ist ein auf der Lokomotive eingebauter Raspberry Pi. Die zwei möglichen Richtungen der Lokomotive sind mit den Richtungskennzeichen „A“ und „B“ bezeichnet. An beiden Enden der Lokomotive ist eine Indoor Navigation Positioning System-Einheit (IPS) zur Positionsbestimmung installiert, sodass die Fahrtrichtung der Lokomotive bestimmt werden kann. Die Steuerung erfolgt mittels eines Simulink® Modells, das extern auf dem in der Lokomotive integrierten Raspberry Pi ausgeführt wird. Die Eingabe der manuellen Steuerbefehle erfolgt über den Computerarbeitsplatz des ETF.

2.3. Map Matching Algorithmen

Zur Bestimmung der Position eines Fahrzeuges in einem Netz, in dem es sich bewegt, reicht ein Positionierungssystem nicht aus, da die Positionsdaten unabhängig vom vorhandenen Netz sind. Auf Grund der Ungenauigkeiten der Messdaten und des Fehlers der im Netz hinterlegten Daten entstehen Abweichungen zwischen dem Messwert und der Position im Netz. Die gemessenen Werte müssen deshalb an ein gegebenes Netz angepasst werden. Das Ergebnis dieser Karteneinpassung (engl. „Map Matching“) ist die Position im Netz (Karte).

In [6] werden Map Matching Algorithmen in vier Verfahren unterschieden:

- Geometrische Analyse
- Topologische Analyse
- Probabilistische Map Matching Algorithmen
- Erweiterte Map Matching Algorithmen

Die Verfahren unterscheiden sich nicht nur in der grundsätzlichen Verfahrensweise, sondern auch in der Art der bearbeiteten Informationen, was zu unterschiedlichen Leistungen und Einsatzgebieten führt.

Das **Geometrische Verfahren** ist das einfachste der vier Verfahren [7]. Die Verfahren verarbeiten lediglich geometrische Daten [8] und damit nur wenige Informationen, das Resultat sind geringe Anforderungen an die benötigten Netzdaten. Außerdem sind die Algorithmen einfach und schnell [6] [7] Bei dichten Netzen mit vielen Kreuzungspunkten und parallelen Kanten kommt es aber vermehrt zu fehlerhaften Einpassungen [6] [7] [9].

Topologische Verfahren verarbeiten neben den geometrischen Daten Informationen über die Verbindungen der Punkte und Kanten des Netzes zueinander [6] [8]. Zusammen mit den Informationen aus vorherigen Zuordnungsschritten können damit bei der Einpassung unlogische Sprünge zwischen Kanten unterbunden werden. Darüber hinaus verwenden einige Algorithmen weitere Informationen wie den Zeitstempel der Messungen, den Straßentyp, die Fahrtrichtung oder die momentane Ge-

schwindigkeit. Dies ermöglicht im Vergleich zu geometrischen Verfahren bessere Ergebnisse [7].

Probabilistische Algorithmen arbeiten mit einem Fehlerbereich um die gemessene Position, in der die wahre Position des Objekts liegen soll [6]. Die Abmessung des Bereichs ist abhängig von den Fehlerbereichen der eingesetzten Sensorik und des zugrundeliegenden Netzes. [7] Liegen mehrere Netzsegmente in dem Bereich, müssen weitere Informationen herangezogen werden. Darunter fallen zum Beispiel die Fahrtrichtung, die vorherigen Einpassungen oder auch die Geschwindigkeit [6].

Algorithmen, die zusätzliche, komplexere Verfahren für die Karteneinpassungen nutzen, werden unter der Kategorie **erweiterte Map Matching Algorithmen** zusammengefasst [6]. Ihnen zu Grunde liegt beispielsweise ein Particle Filter oder eine Fuzzylogik [10] [11]. Durch die komplexeren Verfahren sind die Algorithmen langsamer [7].

Die beschriebenen Kategorien der Karteneinpassungsalgorithmen unterscheiden neben der Güte der Karteneinpassung auch die Komplexität der Verfahren und damit deren Dauer sowie die Anforderungen an Netz- und Messdaten. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Ausgleich zwischen der Komplexität und der Genauigkeit des Algorithmus und da lediglich die Positionsdaten des IPS zur Verfügung stehen ein topologisches Verfahren als Grundlage des Algorithmus verwendet.

Aus den vorgestellten Map Matching Algorithmen [7] [8] [12] lässt sich ein grundlegender Aufbau ableiten, welcher in Abbildung 1 skizziert ist. Die Algorithmen teilen sich auf in eine Initialisierungsphase und einen Regelablauf. Der Regelablauf setzt nach dem Durchlaufen der Initialisierungsphase ein und wird nach dem Vorliegen eines neuen Messpunktes erneut durchlaufen. Die Zweiteilung ist notwendig, da bei der ersten Zuordnungsphase auf keine bisherigen Zuordnungen zurückgegriffen werden kann. Somit stehen neben dem Messwert nur die statischen Kartendaten zur Verfügung. Eine Bestimmung von Kandidatenkanten kann nicht erfolgen, es erfolgt eine geometrische Analyse. Mit dem Erhalt des nächsten Messpunktes steht der vorherige Messpunkt sowie dessen Zuordnung als Ergebnis der geometrischen Analyse zusätzlich als Eingangsgröße zur Verfügung. Der entscheidende Unterschied zwischen dem Regelablauf und der Initialisierungsphase ist folglich, dass im Regelablauf Informationen über den bisherigen Standort bekannt sind. Dadurch können in einer Auswahlphase Kandidatenkanten bestimmt und damit das Suchgebiet eingeschränkt werden. Die Auswahlphase bildet zusammen mit der Zuordnungsphase eine topologische Analyse. Weiterhin kann durch die vorangegangenen Zuordnungen sowohl der neue Messwert, als auch das spätere Ergebnis einer Konsistenzprüfung unterzogen werden. Die Zuordnung als Ergebnis der topologischen Analyse kann auf eine Widersprüchlichkeit mit den bisherigen Zuordnungen geprüft werden. Steht die Zuordnung mit den vorangegangenen Zuordnungen im Widerspruch, ist zur Vermeidung einer Fehlerfortpflanzung das Ergebnis gesondert zu prüfen. Eine Möglichkeit ist das erneute Ausfüh-

ren der Initialisierungsphase. Nach einem erfolgreichen Durchlauf des Regelablaufs wird dieser mit dem nächsten Messwert erneut durchlaufen.

3. METHODIK

Die Navigationsaufgaben, die bei der Durchführung eines Rangierauftrags von der Navigationsplattform zu lösen sind, werden durch Algorithmen beschrieben. Als Grundlage dienen die in der Literaturrecherche beschriebenen Map Matching Algorithmen und die in [4] entwickelte Navigationsplattform. Als Struktur der Navigationsplattform dient ein modularer Aufbau. Ein Modul ist jeweils für die Bearbeitung einer der Teilaufgaben zuständig, dabei bildet die in [4] entwickelte Routensuche ein Modul. Für die Teilmodule sind die benötigten Eingangs- und Ausgangsdaten zu ermitteln und aufeinander abzustimmen.

Die Aufteilung der Navigationsaufgaben in einzelne Module erlaubt eine Einbindung dieser in unterschiedliche Gesamtsysteme. Einzelne Module können ersetzt oder angepasst werden, ohne dass ein Eingreifen in die übrigen Module erforderlich ist. Dadurch kann beispielsweise eine alternative Standortbestimmung integriert werden. Die Trennung der einzelnen Module ermöglicht außerdem die Nutzung der Modulergebnisse für weitere Anwendungen der Rangierlokomotive, ohne die Navigationsplattform anzupassen.

Die anschließende Anwendung der Plattform im ETF dient dem Testen und Optimieren der Algorithmen. Für den Einsatz der Navigationsplattform ist die Information über

den Standort der Lokomotive entscheidend. Die Bestimmung des Standortes erfolgt dabei auf dem Fahrzeug, ohne die Installation weiterer streckenseitiger Infrastruktur. Daneben besteht für den Einsatz der Navigationsplattform eine geeignete Systemumgebung, da die Navigationsplattform als Teil eines Gesamtsystems und nicht für eine alleinige Anwendung entwickelt worden ist. Die Systemumgebung dient der Abbildung der erforderlichen Daten des Bahnhofs (beispielsweise des Gleisplans oder der Daten anderer Lokomotiven) und einer Koordinierung der Module.

4. DURCHFÜHRUNG

4.1. Module

Die Navigationsplattform ist in drei Module unterteilt. (vgl. Abbildung 2). Die Standortbestimmung stellt den Standort der Lokomotive im Gleisplan bereit. Als Grundlage für die Standortbestimmung dienen die Daten des Positionierungssystems. Die übermittelten Datenpakete müssen zunächst ausgelesen und geprüft und die für die Standortbestimmung erforderlichen Daten extrahiert werden. Die dadurch erhaltenen Koordinaten durchlaufen eine Karteneinpassung, in der der Standort der Lokomotive innerhalb des Gleisplans ermittelt wird. Dafür ist zusätzlich der als Graph vorliegende Gleisplan erforderlich.

Für die Routensuche wird für den Graphen des Gleisplanes unter Beachtung der besetzten und gesperrten Gleise der optimale Pfad zwischen dem momentanen Standort

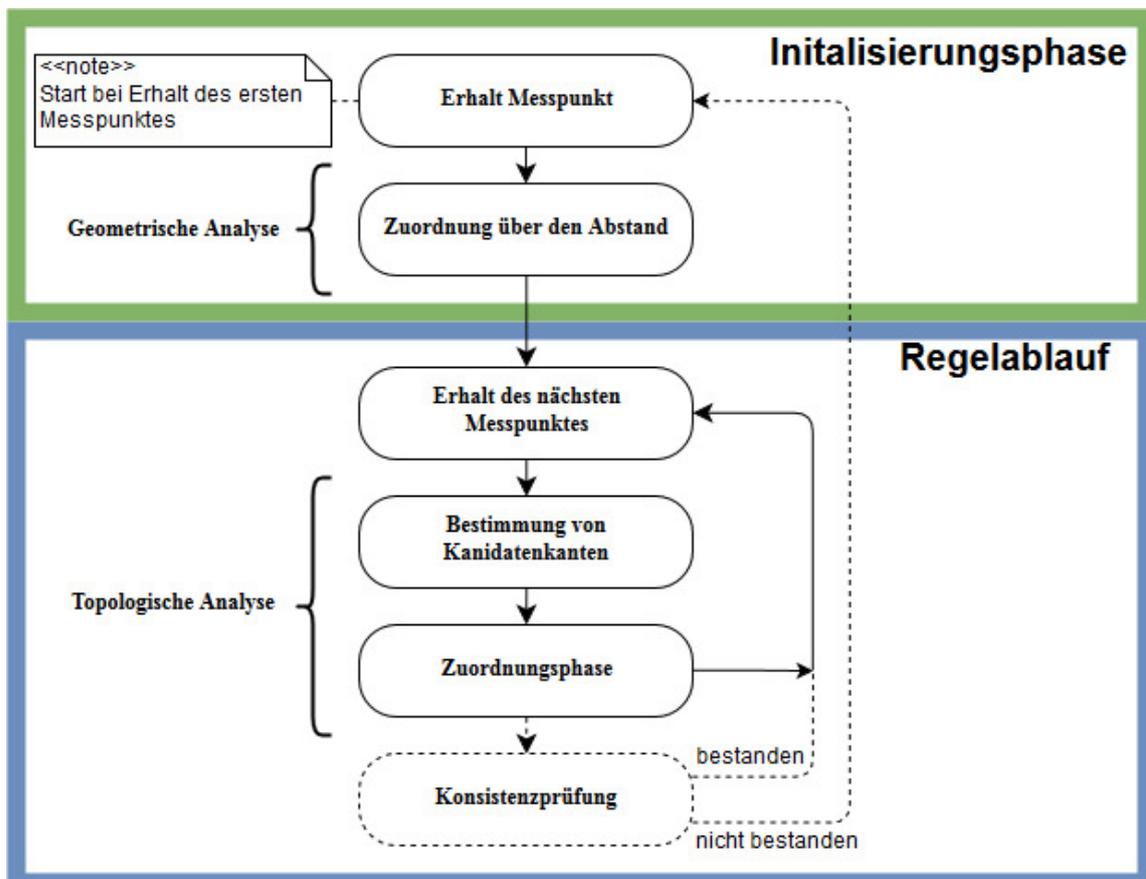


Abbildung 1: Grundlegender Aufbau von topologischen Map Matching Algorithmen

der Lokomotive und dem Zielgleis gesucht. Der Standort der Lokomotive dient als Ausgangspunkt der Pfadfindung. Aus dem Pfad und der Länge der Lokomotive werden weitere Informationen wie die Anzahl und die Positionen eventueller Richtungswechsel ermittelt und zusammen mit dem Pfad als Route gespeichert. Das dritte Modul der Navigationsplattform ist die Kursüberwachung. Für die Überwachung der Route ist ebenfalls der Standort der Lokomotive entscheidend. Innerhalb des Moduls der Kursüberwachung findet ein Abgleich zwischen dem momentanen Standort und der gewünschten Route statt. Das Ergebnis des Abgleichs definiert zusammen mit der Information über die Bewegung der Lokomotive und dem Fortschritt der Route den Status der Lokomotive, aus dem wiederum Steuerbefehle abgeleitet werden.

4.2. Modul Standortbestimmung

Unterteilt ist das Modul in die Verarbeitung der Daten des Positionierungssystems und die Karteneinpassung. Der erste Teil des Moduls ist von dem eingesetzten IPS abhängig. Die Grundlage für die Karteneinpassung ist ein topologischer Map Matching Algorithmus, der an einen Einsatz im schienenengebundenen Verkehr angepasst ist. Als primäre Daten verwendet dieser den Messwert des IPS, das Ergebnis der letzten Zuordnung und die Gleistopologie. Daraus lassen sich der bisherige Kurs (als Kantenabfolge) und die momentane Geschwindigkeit des Objekts als sekundäre Daten berechnen.

Der Ablauf des Algorithmus orientiert sich an den in der Literaturrecherche vorgestellten Algorithmen (vgl. Abbildung 3). Aufgeteilt ist der Algorithmus in eine Initialisierungsphase und einen Regelablauf. Der Map Matching-Algorithmus startet nach der Übermittlung des ersten Messpunktes des IPS mit der Initialisierungsphase. Da für den ersten Messpunkt nicht alle primären Daten und

keine sekundären Daten vorhanden sind, wird auf eine rein geometrische Zuordnung zurückgegriffen. Über eine Punkt zu Punkt Verbindung wird in der Zuordnungsphase der Knoten mit dem geringsten Abstand zum Messwert ermittelt. Anschließend wird überprüft, ob eine Kante besteht, die eine geringere Entfernung zum Messwert aufweist. In der folgenden Phase wird das Zuordnungsergebnis auf seine Eindeutigkeit geprüft und verarbeitet. Als Eingangsgrößen benötigt die Initialisierungsphase neben den Koordinaten des Messpunktes lediglich den als Graph gespeicherten Gleisplan des Bahnhofs. Bei jedem folgenden Messpunkt können alle primären Daten und die Geschwindigkeit für die Zuordnung herangezogen werden. Der zurückgelegte Kurs besteht erst nach einer Zuordnung eines Messpunktes zu einer zweiten Kante.

Im Regelablauf wird der erhaltene Messwert in der Prüfphase zunächst auf seine Plausibilität geprüft. Dies dient dazu, offensichtlich unrealistische Messungen, die beispielsweise durch kurzzeitige Abschirmungen oder Reflektionen an Hindernissen auftreten, nicht als Ausgangspunkt für eine topologische Analyse zu nutzen. In der anschließenden Auswahlphase werden die Kandidatenkanten ermittelt. Die Menge der Kandidatenkanten sind die Kanten, die bei der aktuellen Messung als Standort des Objekts in Betracht kommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Abtastrate der Standortbestimmung in einem Bereich liegt, in der beispielsweise Richtungswechsel aus den Messdaten zu erkennen sind. Der Ausgangspunkt für die Bestimmung der Kandidatenkanten ist das Ergebnis der letzten Zuordnung. Die im vorhergehenden Durchlauf bestimmte Kante ist zugleich ein Kandidat für die folgende Zuordnung. Die an diese Kante angrenzenden Kanten sind ebenfalls mögliche Standorte des Objekts. Für die Auswahl der Nachbarkanten ist die Lage der Kanten zueinander und damit die Gleistopologie entscheidend. Zielführend ist lediglich die Aufnahme der

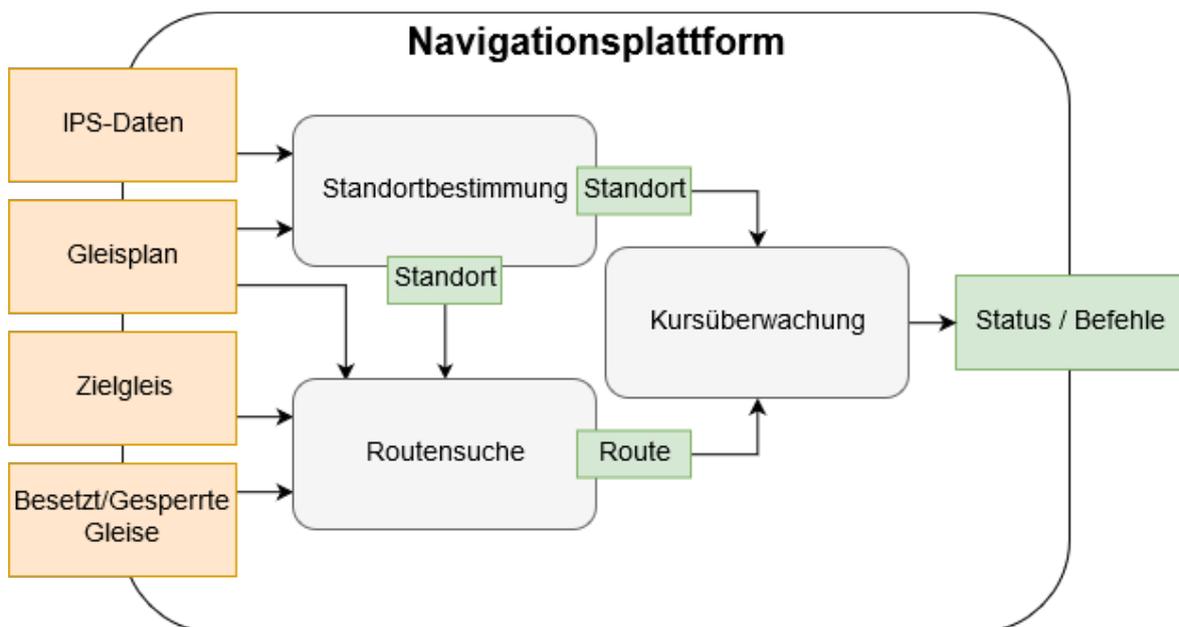


Abbildung 2: Ablauf des Map Matching Algorithmus

Kanten, die von der letzten Position aus durch die Lokomotive erreichbar sind. Im schienengebundenen Bahnsystem sind dabei Weichen als alleinige Entscheidungspunkte die bedeutsamsten Abschnitte.

Deuten die letzten Zuordnungsergebnisse darauf, dass die Lokomotive eine Weiche von der Spitze in Richtung der Wurzel (spitz) befährt, sind Kanten, die einen der anderen Weichenstränge abbilden, keine folgerichtigen Kandidaten für eine Zuordnung. Beim Befahren einer Weiche von der Wurzel zur Spitze (stumpf) ergibt sich eine andere Ausgangslage. Dort ist, auf Grund der zunächst geringen Abstände der Weichenstränge, eine eindeutige Zuordnung schwierig. Es ist nicht von vornherein auszuschließen, dass sich die Lokomotive, auch wenn die letzte Zuordnungsphase eine Zuordnung zu einem der Weichenstränge ergeben hat, auf einem der anderen Weichenstränge befindet. Deshalb sind beim stumpf Befahren von Weichen die Kanten aller Weichenstränge als Kandidatenkanten anzusehen, auch wenn diese zunächst auf Grund der Gleistopologie keine realistische Fortsetzung des letzten (vermeintlichen) Standortes dar-

stellen. Die Entscheidung, ob weiterhin alternative Weichenstränge als Kandidatenkanten betrachtet werden, hängt von dem Ausgang der vorherigen Zuordnung und der Gewichtungen der Weichenstränge ab.

Neben den direkten Nachbarkanten sind auch an diese Kanten angrenzende Kanten mögliche Standorte des Objekts und somit Kandidatenkanten. Der entscheidende Faktor für die Begrenzung der Kandidatenaufnahme neben der direkten Erreichbarkeit ist die momentane Geschwindigkeit der Lokomotive. Diese definiert die maximale Entfernung zwischen der letzten Zuordnung als Ausgangspunkt der Kandidatensuche und der möglichen aktuellen Zuordnung. Als Kandidatenkanten gelten deshalb alle direkt erreichbaren Kanten, deren Abstand zur letzten Zuordnung kleiner ist als der Weg, der innerhalb des Zeitintervalls zwischen letzter und aktueller Messungen mit der maximalen Geschwindigkeit der Lokomotive und Berücksichtigung der Messungenauigkeit zurückgelegt werden konnte.

Nach Abschluss der Kandidatensuche, dienen die ermit-

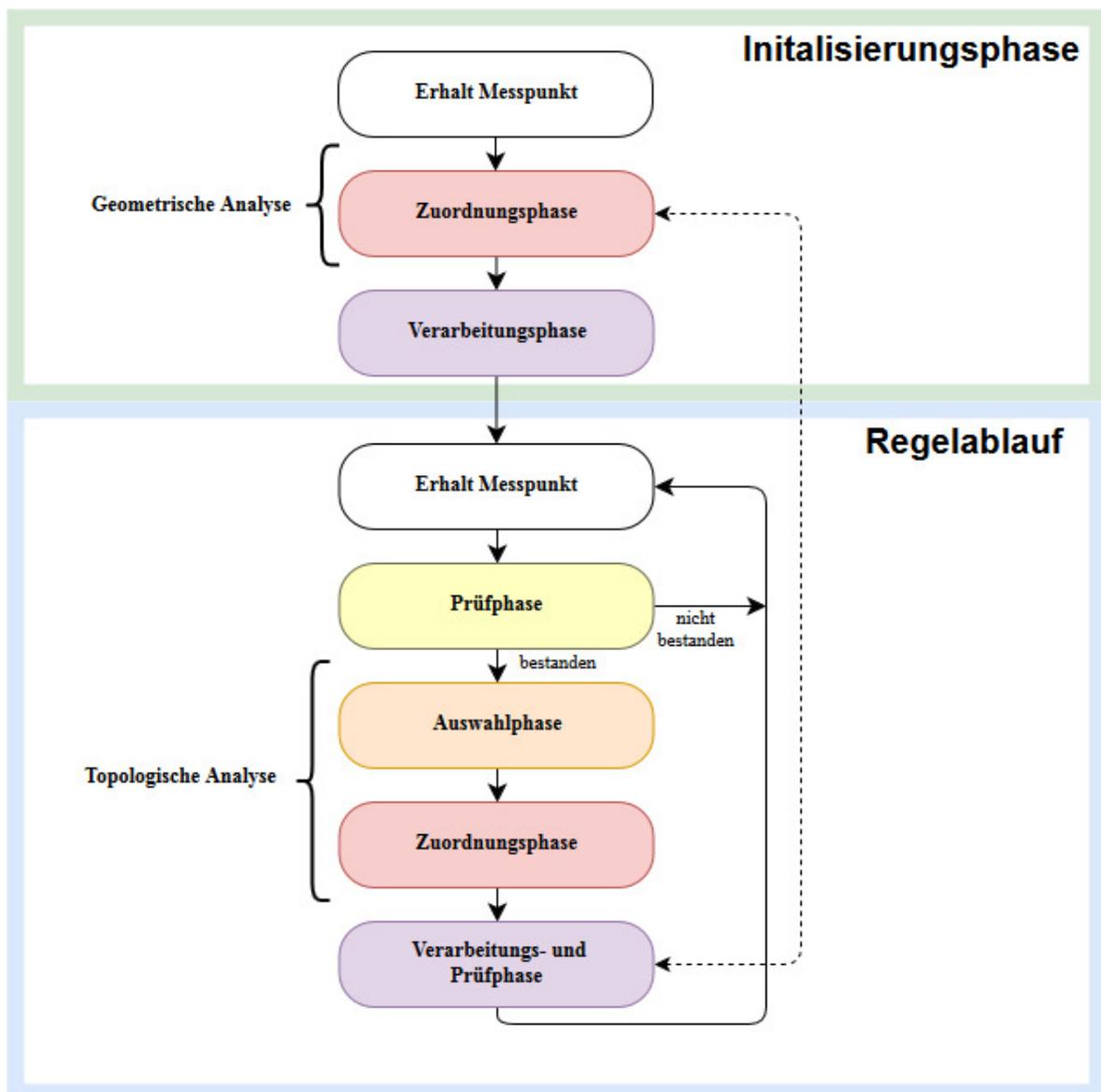


Abbildung 3: Ablauf des Map Matching Algorithmus

telten Kanten als Ausgangspunkt für die folgende gewichtete Zuordnung des Messwertes in der Zuordnungsphase. Dabei liegt der Fokus der Gewichtung in dieser Arbeit auf der Analyse des Abstands zwischen Messwert und Kandidatenkanten. Die Kante aus der Menge der Kandidatenkanten, die den geringsten Abstand zum Messwert aufweist, ist der zugeordnete Standort des Objekts. Bei der Wahl des Abstands als alleiniges Zuordnungskriterium ist die Wahl der Unsicherheit entscheidend für die Vermeidung fehlerhafter Zuordnungen.

4.3. Einflussgrößen

Die Algorithmen der Navigationsplattform unterliegen an verschiedenen Entscheidungspunkten der Abwägung zwischen Empfindlichkeit und Robustheit. Für ein hohes Sicherheitsniveau ist entscheidend, dass Abweichungen und fehlerhafte Messwerte frühzeitig erkannt werden und das System in einen sicheren Zustand (Grundsätzlich der Halt der Lokomotive) übergeht. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass ein leistungsfähiger Rangierbetrieb möglich ist. Entscheidend ist dafür die Bewertung der fehlerbehafteten Messwerte und Berechnungen, wobei im Rahmen dieser Arbeit die Einflussgrößen auf einen Einsatz in einer Modellanlage ausgelegt sind und lediglich auf den Daten des IPS beruhen (können).

Die Bestimmung der Unsicherheit einer Zuordnung ist abhängig von der Genauigkeit des IPS, dem minimalen Gleisabstand innerhalb des ETF sowie der relativen Bewertung der Zuordnung. Da eine Fahrt auf einem abweichenden Weichenstrang ein hohes Sicherheitsrisiko birgt, sollte der Grenzwert kleiner als der minimale Gleisabstand sein. Die Unsicherheit einer Zuordnung wird in der Verarbeitungs- und Prüfphase ermittelt. Bestehen Kandidatenkanten, deren Abstand zum Messwert ähnlich dem Wert der Kanten mit dem geringsten Abstand ist, ist das Ergebnis als unsicher anzunehmen. Für die Wahl des Unsicherheitsbereichs ist der relative Abstandswert der zugeordneten Kante sowie die Genauigkeit des Positionierungssystems entscheidend. Geben die Bewertungen der letzten Zuordnungen den Anschein, dass es zu einer Fehlerfortpflanzung innerhalb des Regelablaufs gekommen ist, wird durch die Durchführung der geometrischen Suche der Initialisierungsphase die Zuordnung überprüft. Abschließend wird der bisherige Kurs fortgeschrieben.

Für die Ausreißererkenntnis ist die momentane Geschwindigkeit der Lokomotive und die Genauigkeit des IPS entscheidend. Überschreitet die Geschwindigkeit deutlich die maximal anzunehmende Geschwindigkeit des Objektes, ist der Messwert zu verwerfen. Eine hohe Toleranz gegenüber einer aus den Messwerten berechneten Geschwindigkeitsüberschreitung bewirkt eine sichere Kursüberwachung, da die Verwerfung eines Messpunktes ein Aussetzen der Kursüberwachung zur Folge hat. Die Geschwindigkeit berechnet sich aus dem Abstand und der Zeitdifferenz zwischen aktueller und letzter Messung. Dabei sind die Abtastrate und der Fehlerbereich des Positionierungssystems zu beachten. Ist die Abtastrate sehr niedrig (geringe Zeitdifferenz zwischen den Messungen)

und/oder der Fehlerbereich hoch, kann die berechnete Geschwindigkeit zwischen den Messungen deutlich über dem maximal zu erwartenden Wert liegen, ohne dass die Messung eine offensichtlich fehlerhafte Position darstellt. In diesem Fall sollte die Geschwindigkeit aus mehreren Messungen berechnet oder auf ein alternatives Verfahren zur Identifizierung von Ausreißern zurückgegriffen werden.

Da die Geschwindigkeit der Lokomotive über die Daten des IPS zu berechnen ist, muss daraus auch abgeleitet werden, ob die Lokomotive sich bewegt. Dabei ist bei geringen Geschwindigkeiten der Fehler durch die Verwendung der IPS-Daten größer als bei einer Drehzahlmessung direkt am Fahrzeug. Die Abfrage der Bewegung ist beispielsweise bei einem Richtungswechsel entscheidend, um den Befehl für die Fahrt in die entgegengesetzte Richtung zu geben. Kann ein Stillstand der Lokomotive nicht festgestellt werden, wird erneut ein Haltebefehl übermittelt bzw. dieser beibehalten. Ein Feststellen der Bewegung der Lokomotive obwohl diese steht ist somit der Fehler mit der geringeren Auswirkung. Die Wahl des Geschwindigkeitswertes, bei dem ein Stillstand der Lokomotive angenommen wird, ist abhängig von der Genauigkeit des IPS. Eine weitere Abfrage, bei der ein Stillstand der Lokposition vorausgesetzt wird, ist die Bestimmung der Lokposition für die Routenwahl. Insgesamt ist dabei die Position weniger sicherheitsrelevant als bei der Kursüberwachung. Sollte eine fehlerhafte Position als Routenstart gewählt werden, bricht der Rangierauftrag mit dem Start der Kursüberwachung und der Feststellung eines anderen Standortes (ohne einen Richtungsbefehl an die Lokomotive zu übermitteln) ab.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Erkennung von Abweichungen zwischen dem aktuellen Kurs und der vorgegebenen Route ist der entscheidende Faktor für die Zuverlässigkeit der Navigationsplattform. Die Erkennung ist zum einen abhängig von der Vorschrift zur Bestimmung von unsicheren Zuordnungen, welche wiederum auf der Genauigkeit der Zuordnung aufbaut. Ein zweiter Faktor ist die Länge des Zeitintervalls zwischen dem Zeitpunkt der Messung und dem Zeitpunkt der Ansteuerung der Motoren (=Reaktionszeit). Ein weiterer Faktor ist die Abtastrate des IPS.

Die Reaktionszeit ist abhängig von der Ausgestaltung der beteiligten Algorithmen und der Übertragung zwischen den beteiligten Geräten (In diesem Aufbau: IPS, Raspberry Pi, Computer im ETF). Der Mittelwert der Bearbeitungsdauer der Algorithmen beträgt 180 ms, die Standardabweichung der Stichprobe 30 ms. Maximal hat die Bearbeitung 370 ms gedauert. Die Strecke, die bis zur Erkennung einer Abweichung des Kurses maximal zurückgelegt wird, setzt sich zusammen aus der angenommenen Genauigkeit von 12 cm, dem Mindestabstand der Bewertungen zweier Kandidatenkanten von 3 cm und der maximalen Reaktionszeit von 370 ms multipliziert mit der maximalen Geschwindigkeit von 25 cm/s. Insgesamt ergibt sich somit eine Strecke von 24,25 cm. Nicht berücksichtigt ist dabei die Abtastrate, die bei einer Fre-

quenz von 1 Hz die maximale Strecke verdoppelt. Bei der Abweichung des Kurses durch eine Fehllage der Weiche erhöht sich die maximale Strecke noch einmal, da abhängig von der Weichengeometrie die Strecke bis zum Erreichen des Mindestabstands zwischen zwei Kandidatenkanten deutlich größer ist. Weiterhin ist für die Reaktionszeit lediglich die Dauer der Module, nicht aber die Übertragungsdauer einbezogen. Insgesamt zeigt sich durch die Aufstellung deutlich, dass die Erkennung von Abweichungen nicht alleine durch die Navigationsplattform erfolgen kann. Selbst bei einer perfekten Genauigkeit wird die Abweichung bei der Befahrung von Weichen erst erkannt, wenn diese eingetreten ist.

Eine Einbeziehung weiterer Fahrzeugdaten bietet die Möglichkeit die entwickelte Mobilitätsplattform weiter zu verbessern. Eine Maßnahme für die Erhöhung der Genauigkeit ist die Einbeziehung der zweiten IPS-Einheit, wodurch Messfehler erkannt und die Genauigkeit durch den Vergleich der beiden Messwerte erhöht werden kann. Die Geschwindigkeit der Lokomotive, die bisher aus den Positionierungsdaten errechnet wird, kann beispielsweise durch eine Drehzahlmessung ersetzt werden. Die Geschwindigkeit der Lokomotive kann für die Erhöhung der Genauigkeit der Zuordnung genutzt werden. Zusammen mit der Bewegungsrichtung der Lokomotive kann über eine Integration einer Koppelnavigation die Positionsbestimmung verbessert werden. Die Zusammenführung bietet außerdem den Vorteil, dass die Positionsbestimmung durch Abschirmungen weniger stark beeinflusst wird. Eine weitere Datenquelle, die in die Positionsbestimmung einfließen und damit die Genauigkeit erhöhen kann, ist die Erkennung von Herzstücken über die vertikale Auslenkung des Radsatzes. Zusätzliche Daten, die in die Bewertung der Kandidatenkanten einfließen können sind Daten über die Auslenkung der Drehgestelle zur Erkennung von Bogenfahrten. Besonders bei geraden Weichen sollte eine zuverlässige Unterscheidung zwischen der Befahrung des Stammgleises und des Zweiggleises möglich sein. Auch eine optische Erkennung der Weichenlage könnte in die Bewertung der Kandidatenkanten einfließen.

Die Navigationsplattform ist insgesamt als ein Entwicklungsschritt auf dem Weg zum Einsatz in einer autonomen Rangierlokomotive zu betrachten. Entscheidend sind die stetige Weiterentwicklung der Plattform und die Verbindung dieser mit weiteren Projekten im Rahmen des autonomen Rangierens. Die Plattform bildet dabei eines von vielen Puzzleteilen bei der Entwicklung einer autonomen Rangierlokomotive. Das übergeordnete Ziel des autonomen Rangierens ist ein wichtiger Fortschritt, der den „Vorsprung der Schiene“ aufrechterhält.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Flege, D.; Fahrerloses Fahren – Die Schiene hat mehr als 30 Jahre Vorsprung, Eisenbahn Ingenieur, Juli 2017.
- [2] Niessen, N., Schindler, C., Vallée, D.; Assistierter, automatischer oder autonomer Betrieb – Potenziale für

den Schienenverkehr, Eisenbahntechnische Rundschau, April 2017.

[3] Cichon, M., Schaal, R.; Vollautomatische Abdrücklokomotive VAL2020 – Machbarkeitsstudie und Aufbau eines Demonstrators. Rad Schiene Tagung, Dresden, 2018.

[4] Klein, J.; Digitalisierung der Infrastruktur von Gleisanlagen zur Erstellung einer Navigationsplattform für den autonomen Rangierbetrieb, Masterarbeit, Technische Hochschule Nürnberg, 2017.

[5] Klein, J.; Anforderungen an Infrastrukturinformationen hinsichtlich autonomer Rangierbewegungen, Ingenieurwissenschaftliche Studie, Technische Hochschule Nürnberg, 2016.

[6] Quddrus, M.A., Ochieng, W.Y., Noland, R.B.; Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions, Transportation Research Part C 15 (2007) S. 312–328.

[7] Velaga, N.R., Quddrus, M.A., Bristow, A.I.; Developing an enhanced weight-based topological map-matching algorithm for intelligent transport systems, Transportation Research Part C 17 (2009) S. 672–683.

[8] Greenfeld, J.S.; Matching GPS Observations to Locations on a Digital Map, Proceedings of the 81th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2002, Washington, DC

[9] Quddrus, M.A., Ochieng, W.Y., Noland, R.B.; A general map matching algorithm for transport telematics applications, GPS Solutions (2003) 7, S. 157–167.

[10] Gustafsson, F., Gunnarsson, F., Bergman, N., Forssell, U., Jansson, J., Karlsson, R., Nordlund, P.-J.; Particle Filters for Positioning, Navigation and Tracking, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, No. 2, February 2002.

[11] Quddrus, M.A., Noland, R.B., Ochieng, W.Y.; A high accuracy fuzzy logic based map matching algorithm for road transport. Journal of Intelligent Transportation Systems, 10 (3), 2006, S. 103-115.

[12] Brakatsoulas, S., Pfoser, D., Salas, R., Wenk, C.; On Map-Matching Vehicle Tracking Data, Proceedings of the 31st VLDB Conference, Trondheim, Norway, 2005.