

# Sensor data fusion for topological localization of rail vehicles

## Sensordatenfusion zur topologischen Ortung von Schienenfahrzeugen

Stefan Hensel\*, Marin B. Marinov‡

\* University of Applied Sciences Offenburg, Department for Electrical Engineering,  
Badstraße 24, D-77652 Offenburg, Germany, stefan.hensel@hs-offenburg.de

‡ Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Department of Electronics,  
8, Kliment Ohridski Blvd., BG-1756 Sofia, Bulgaria, mbm@tu-sofia.bg

**Abstract** — This contribution presents a novel onboard localization system, based on an eddy current sensor system (ECS) that is capable of a precise train localization when combined with a simple topological map enriched with ECS features. To determine the position upon the track, we propose an approach based on counting in contrast to commonly applied travel distance determination by integrating the estimated velocity. ECS features are derived from the signal by means of specially defined virtual sensors and subsequently processed within a Bayesian formalism. This virtual sensor based approach allows parallelization of sensor signal processing and flexible integration of new sensors into the positioning system. The possibility to detect turnouts with a hit rate of 99% allows the vehicle position to be tracked over the entire track, using the measurement data supplied by the ECS alone.

**Zusammenfassung** — Die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise erlaubt die Ortung von Schienenfahrzeugen in topologischen Karten allein mit Hilfe eines Wirbelstromsensordaten (WSS). Zur Ortung primär erforderlich ist die Identifizierung des befahrenen Gleises selbst, wofür unterschiedliche in einer Karte gespeicherte Merkmale herangezogen werden sowie der zurückgelegte Weg, der durch Zählen der passierten Schwellen ermittelt wird. Diese Merkmale werden mittels eigens definierter, virtueller Sensoren aus dem Signal des WSS gewonnen und mittels einem Bayes'schen Formalismus mit den Referenzdaten aus der vorliegenden topologischen Karte abgeglichen. Diese auf virtuellen Sensoren basierende Vorgehensweise erlaubt eine Parallelisierung der Sensorsignalverarbeitung und eine flexible Einbindung von Sensoren in das Ortungssystem. Die Möglichkeit, Weichen mit einer Trefferquote von 99% zu detektieren, erlaubt die Verfolgung der Fahrzeugposition über die gesamte Fahrstrecke hinweg, unter alleiniger Verwendung der vom WSS gelieferten Messdaten.

### I. EINFÜHRUNG

Die Ortung von Schienenfahrzeugen spielt eine wichtige Rolle im modernen Bahnbetrieb. Sie ist unerlässlich für Fahrgastinformationssysteme und die Betriebsleittechnik. Die dafür eingesetzten Verfahren stützen sich meist auf das Auslesen ortsfester Markierungen (Baken und Balisen), auf bordeigene Sensorik oder auf den Einsatz von Satellitennavigation (GNSS). Ortsfeste Markierungen müssen jedoch kostspielig auf der Strecke installiert werden und benötigen die entsprechenden Sensoren am Fahrzeug. Die Ortung mittels GNSS wird oftmals durch Verdeckungen und Störungen beeinträchtigt und bietet nicht die für eine *gleisselektive* Ortung erforderliche Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Auch klassische Fahrzeugsensoren, wie beispielsweise der Radumdrehungszähler oder Mikrowellenradare, unterliegen in der Regel den durch Schlupf oder Drift verursachten Fehlern, besonders wenn sie den zurückgelegten Weg integrativ aus Geschwindigkeitswerten berechnen [1].

Der hier vorgestellte neue Ansatz nutzt ein auf dem Wirbelstromprinzip basierendes Sensorsystem, das metallische Bauteile in der Nähe der Schiene berührungslos detektiert. Mittels geeigneter Signalverarbeitung kann damit schlupffrei und witterungsunabhängig die Geschwindigkeit des Fahrzeugs präzise ermittelt werden. Im Rahmen früherer Arbeiten wurde bereits gezeigt, dass sich dieses Sensorsystem auch hervorragend zur bordautonomen Ortung eignet. Dabei wurde ausgenutzt, dass das Sensorsignal beim Befahren von Weichen eine spezielle Charakteristik besitzt, mit der Weichen nicht nur erkannt (detektiert), sondern auch eindeutig identifiziert (klassifiziert) werden können. Da durch die Weiche und ihre

Befahrungsrichtung die Position im Schienennetz jederzeit bekannt ist, ermöglicht dies die Lokalisierung des Fahrzeuges ohne zusätzliche Sensorik oder anderweitige ortsfeste Markierungen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll nun ausgenutzt werden, dass auch die Befestigungen der Schienen an den Schwellen im Signal des Wirbelstromsensors sichtbar sind. Da sie im gesamten Gleisverlauf in sehr regelmäßigen Abständen verbaut sind, lässt sich die vom Fahrzeug zurückgelegte Strecke auch durch das Zählen dieser Schienenbefestigungen ermitteln. Diese Art der Wegmessung verspricht eine hohe Genauigkeit im Vergleich zu geschwindigkeitsbasierten Methoden, in denen immer die Kumulierung von Messfehlern durch Integration auftritt. Im weiteren Verlauf werden die Grundlagen der Ortung mit Hilfe der Weichenerkennung auf komplette Gleisabschnitte übertragen, so dass nicht nur die seit der letzten Weiche zurückgelegte Strecke gemessen, sondern auch das befahrene Gleis genau identifiziert wird [2].

Für die Weichenerkennung, das Zählen der Schienenbefestigungen und für weitere Merkmale des Gleises, welche im komplexen Sensorsignal enthalten sind (wie z.B. Signalleistung oder mittlerer Schwellenabstand) werden *virtuelle Sensoren* definiert. Dieser Ansatz erlaubt eine Parallelisierung und Modularisierung der Sensorsignalverarbeitung des WSS und erlaubt das einfache Einbinden weiterer, virtueller oder realer, Sensoren. Das gesamte Ortungssystem wird dadurch flexibel und robust gegenüber Ausfällen und Schwankungen der Bandbreite.

Grundlage für den Ortungsprozess ist die Weichenerkennung (Virtueller Sensor 1 –  $VS_1$ ). Für die Erhöhung der Ortungsgenauigkeit können nun zusätzliche virtuelle Sensoren

definiert und ergänzt werden ( $VS_2, \dots, VS_n$ ). Das Gesamtkonzept ist in Abb. 1 dargestellt.

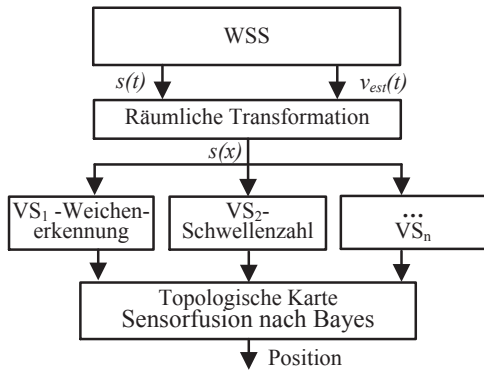


Abb. 1. Gesamtkonzept der Positionsbestimmung mit virtuellen Sensoren.

## II. ORTUNG MIT WIRBELSTROMSENSOREN

Beim Einsatz des WSS zur Positionsbestimmung und Geschwindigkeitsmessung werden die Eigenschaften des Gleises, auf dem sich das Fahrzeug befindet, genutzt. Die konventionelle Anwendung des Sensorsystems liegt zunächst im Messen der Geschwindigkeit, aus der sich durch Integration bereits der zurückgelegte Weg bestimmen lässt. Zusätzlich lassen sich ortstypische Merkmale des befahrenen Gleises bestimmen und direkt zur Ortung heranziehen.

### A. Signalverarbeitung

Der Wirbelstromsensor registriert metallische Inhomogenitäten im Schienenbereich. Aufgrund des relativ großen Abstandes zur Schiene (100 mm) sind dies keine Unregelmäßigkeiten im Material der Schiene selbst, vielmehr aber metallische Bauteile, die entlang der Schiene verbaut sind.

Das real vom Sensor gelieferte Signal hat die in Abb. 2 gezeigte Form. Der sinusförmige Signalanteil aus den Schienenbefestigungen ist gut zu erkennen, allerdings ist er verzerrt und von höherfrequenten Störungen überlagert.

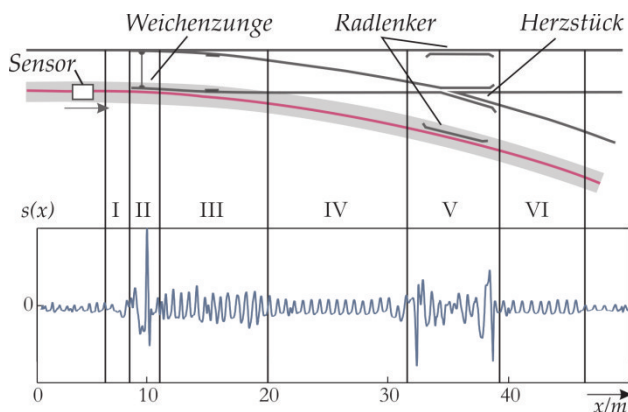


Abb. 2. Sensorsignal  $s(x)$  beim Befahren von Weichenkomponenten (Bereiche II und V) und von Gleisabschnitt nur mit Schienenbefestigungen (Bereich III und IV).

Gänzlich anders sieht der Signalverlauf beim Überfahren einer Weiche aus. Hier dominieren nichtperiodische Signale höherer Signalenergie, die von den massiven und näher an den Sensor heranreichenden Weichenbauteile her rühren, wie ebenfalls in Abb. 2 zu erkennen.

Für die Bearbeitung der Signale erfolgt die Filterung mit einem adaptiven Bandpassfilter, dessen Eckfrequenzen von der aktuellen Geschwindigkeit abhängig sind, für die

Unterdrückung hochfrequenter Störungen sowie potentiell vorhandener Gleichanteile.

Für die weitere Verarbeitung des Signals ist es hilfreich, wenn es im Ortsbereich als  $s(x)$  vorliegt. Für die Transformation wird der Schätzwert der momentanen Geschwindigkeit genutzt [2]. Der Zusammenhang zwischen  $s(t)$  und  $s(x)$  besteht dann über ein Zeit-Weg-Diagramm, wobei jedem Abtastwert in  $s(x)$  ein Wert in  $s(t)$  zugeordnet werden kann. Eine der Sensorbandbreite angemessene Auflösung im Ortsbereich liegt bei 50 Abtastwerten pro Meter, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachteten Signale haben eine Auflösung von 2 cm pro Sample.

### B. Topologische Karten

Da das WSS keinerlei Informationen über die Geometrie oder globale Position des Gleises liefert, findet die Ortung in einer topologischen Karte statt. Diese stellt sämtliche Gleise und Weichen des Schienennetzes in ihrer gegenseitigen Lage und Verknüpfung dar, enthält jedoch keine Informationen über den geometrischen Verlauf der einzelnen Gleise. Die Karte kann daher durch ein einfaches Knoten-Kanten-Modell in einen Graphen überführt werden, in welchem die Weichen als Verzweigungspunkte durch die Knoten und die Gleise als Kanten dargestellt werden.

Zur praktischen Durchführung einer Ortung werden sinnvolle Referenzpunkte benötigt. Weichen bieten sich hier besonders an, da sie als Knoten schon in der topologischen Karte vorhanden sind und als Verzweigungspunkte die Freiheitsgrade der Karte repräsentieren. In Abb. 3 sind schematisch die Elemente der hier verwendeten topologischen Karten sowie die Abstraktion der Karte als Graph aus vorhandenen Gleisplänen gezeigt.

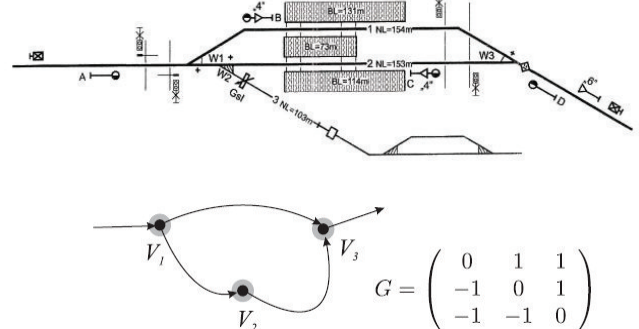


Abb. 3. Grundelemente der topologischen Karte (Knoten  $V_i$  und Adjazenzmatrix  $G$ ) und Gewinnung der Karte aus gegebenen Gleisplänen.

Da die Weichen eine räumliche Ausdehnung besitzen, aber auf einen Punkt abgebildet werden müssen, wird als Knotenpunkt stets der Weichenanfang genutzt. Die Länge der Weichen wird dem Gleis, das die Weichenanfänge verbindet, zugeschlagen.

Die Gleise werden in der Karte als Kanten dargestellt. Da in der topologischen Karte keine geometrischen Informationen über den Gleisverlauf abgelegt werden, ist das charakteristische Merkmal eines Gleises zunächst seine Länge. Da die Wegmessung in Metern über die Integration der Geschwindigkeit jedoch fehleranfällig ist, dient als Abstandsmaß die Anzahl der Schwellen beziehungsweise Schienenbefestigungen, die jedem Gleis als konstante Größe zugewiesen werden.

## III. VIRTUELLE SENSOREN

Bei dem hier betrachteten Verfahren liefert das über der Schiene angebrachte WSS die Daten. Das gewonnene Signal beinhaltet eine Anzahl von Merkmalen, die jeweils gesondert untersucht werden können. Eines davon ist die Anzahl der

Schienenbefestigungen, die für die Bestimmung der aktuellen Position und der Länge eines Gleises genutzt werden. Um nun alleine durch Betrachten des Wirbelstromsignals zu bestimmen welches Gleis gerade befahren wird, bietet es sich an, zusätzliche Eigenschaften des Signals heranzuziehen. Es wird nach Merkmalen gesucht, die für jedes Gleis möglichst charakteristisch sind. Für jedes Merkmal wird nun ein virtueller Sensor definiert, dessen Messungen  $E^k$  das jeweilige Merkmal repräsentieren.

#### A. Leistungssignatur

Ein sehr mächtiges Werkzeug zur Erkennung des aktuellen Gleises ist die Betrachtung der Signalleistung

$$S(x) = \frac{1}{T} \int_{x-T/2}^{x+T/2} |s(t)|^2 \quad (1)$$

des vom Wirbelstromsensor aufgezeichneten Signals. Ihr Verlauf ist für jedes Gleis charakteristisch und behält auch bei verschiedenen Befahrungen stets dieselbe Form. Dieser Verlauf kann als Signatur für jedes Gleis angesehen werden. Zur weiteren Verarbeitung wird der Mittelwert der Leistung im Ortsbereich über 25 Samples ( $\cong 50\text{cm}$ ) gebildet. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit der in der Karte als Referenz hinterlegten Leistungssignatur über die Bildung des euklidischen Abstandes

$$D_{sr} = \|s - r\| = \sqrt{\sum_m^{25} |s_m - r_m|^2} \quad (2)$$

#### B. Schwellenabstand

Ein weiteres charakteristisches Merkmal ist der Abstand der Schwellen. Im Mittel ist dieser bei automatisiert verlegten Schwellen  $64\text{ cm}$ , unterliegt jedoch Schwankungen, die unter anderem durch die Signalverzerrung mit der geschätzten Geschwindigkeit beeinflusst wird, so dass sich Geschwindigkeitsfehler auf die Genauigkeit der ermittelten Abstände auswirkt. Aus diesem Grund wird der Schwellenabstand als Mittelwert über einen Abschnitt von 25 Schwellen angegeben, was auch entsprechend in der Karte hinterlegt ist.

Der virtuelle Sensor ermittelt aus dem aktuellen Signal des Wirbelstromsensors nun den aktuellen Mittelwert der Schwellenabstände und vergleicht ihn mit den abgelegten Referenzen für jedes Gleis. Diese Messung ist mit relativ großen Unsicherheiten behaftet. Daher wurde die resultierende Likelihood auf einen Wertebereich von 0,6 bis 0,8 begrenzt.

Die Abweichung wird mit

$$D_{sr,i} = |\bar{x}_n| - |\bar{x}_{nr,i}| \quad (3)$$

berechnet, wobei  $\bar{x}_n$  der gemessene mittlere Schwellenabstand und  $\bar{x}_{nr,i}$  die zur Gleishypothese  $H_i$  gehörige Referenz ist. Für die Likelihood  $P(E^k|H_i)$  gilt somit

$$P(E^k|H_i) = \begin{cases} -0,04D_{sr,i} + 0,8 & D_{sr,i} < 5 \\ 0,6 & D_{sr,i} \geq 5 \end{cases} \quad (4)$$

#### C. Schwellenzahl

Die Schwellenzahl eines Gleises ist proportional zu dessen Länge, so dass das durch Zählen der Schienenbefestigungen ein sehr starkes Merkmal für einen Gleisabschnitt gewonnen werden kann. Durch Schwankungen in der Detektion des Weichenanfangs ergibt sich für mehrere Bewährungen desselben Gleises eine jeweils unterschiedliche Anzahl an gezählten Schwellen. Aus diesen Messwerten wird als Referenzwert für jedes Gleis der Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  als Referenzwert in der Karte abgelegt.

Der virtuelle Sensor für die Bewertung der Gleichhypothesen wird durch eine geeignete Umrechnung der aktuellen Position in Schwellen in eine zugehörige Likelihood erzeugt. Die Kenntnis von  $\mu_i$  und  $\sigma_i$  für jedes  $H_i$  genügt, um zu erkennen, ob die seit der letzten Weiche zurückgelegte Distanz für den Aufenthalt auf einem Gleis  $i$  spricht. Die aus diesem Ansatz abgeleitete Likelihood-Funktion des virtuellen Sensors wird daher durch

$$P(E^k|H_i) = \begin{cases} 1 & n_i < \mu_i \\ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{n_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2\right) & n_i \geq \mu_i \end{cases} \quad (5)$$

modelliert. Diese Funktion beschreibt eine konstante Wahrscheinlichkeit bis zum Erreichen von  $\mu_i$ , danach erfolgt ein Abklingen in Abhängigkeit  $\sigma_i$ .

### IV. SENSORFUSION NACH BAYES

Die Bayes'sche Sensorfusion bietet eine elegante Möglichkeit, Informationen von Sensoren zusammenzufassen, die nach unterschiedlichen Prinzipien arbeiten [3]. Mit ihr lässt sich angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit  $P(H_i|E)$  eine Hypothese  $H_i$  erfüllt ist, wenn das Ereignis  $E$  aufgetreten ist. In diesem Falle also die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Fahrzeug auf einem Gleis  $i$  befindet, wenn die Beobachtung  $E$  eines virtuellen Sensors vorliegt.

Wie in Kapitel III beschrieben, liefert jeder Sensor für dasselbe Signal eine Likelihood  $P(E|H_i)$  dafür, wie die beobachtete Messung  $E$  einer bestimmten Hypothese  $H_i$  zugeordnet werden kann. Die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit  $P(H_i|E)$  berechnet sich wie folgt:

$$P(H_i|E) = \frac{P(E|H_i)}{P(E)} = \frac{P(E|H_i)P(H_i)}{\sum_j P(E|H_j)P(H_j)} \propto P(E|H_i)P(H_i) \quad (6)$$

Hierbei gibt die a-priori-Wahrscheinlichkeit  $P(H_i)$  an, mit welchen Wahrscheinlichkeiten die Hypothesen  $H_i$  im Vorfeld erfüllt sind. Ohne Vorwissen kann hier eine Gleichverteilung angesetzt werden, die allen Hypothesen dieselbe Wahrscheinlichkeit zuweist.

#### A. Rekursives Bayes'sches Update

Zur fortlaufenden Berechnung der a-posteriori-Wahrscheinlichkeit wird als a-priori-Wahrscheinlichkeit die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit des letzten Berechnungsschrittes verwendet. In (7) beschreibt  $H_i$  wie gehabt die Hypothesen, der Vektor  $E^N$  stellt vergangene Messergebnisse des Sensors dar,  $E$  ist die aktuelle Messung. Sobald  $P(H_i|E^N)$  berechnet ist, wird die Auswirkung der aktuellen Messung mit

$$P(H_i|E^N, E) = \frac{P(E|E^N, H_i)P(H_i|E^N)}{P(E|E^N)} \quad (7)$$

beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit  $P(H_i|E^N)$  übernimmt hier die Rolle der a-priori-Wahrscheinlichkeit. Sie repräsentiert die vergangenen Messungen. Wird die Messung  $E$  als unabhängig von den vorangegangenen Messungen  $E^N$  angenommen werden, vereinfacht sich der Likelihood-Term in (7) weiter zu

$$P(E|E^N, H_i) = P(E|H_i). \quad (8)$$

#### B. Berechnung der A-Posteriori-Wahrscheinlichkeit

Angenommen es werden  $q$  Gleise verfolgt, wovon jedes als eine Hypothese  $H_i$  dargestellt wird:  $H = \{H_1, H_2, \dots, H_q\}$ . Dann gilt für den Likelihood-Vektor  $\lambda^k$  des virtuellen Sensors  $k$

$$\lambda^k = (\lambda_1^k, \lambda_2^k, \dots, \lambda_q^k), \quad (9)$$



und  $\lambda_1^k = P(E^k|H_1)$ . Unter der Voraussetzung, dass die Hypothesen  $H_i$  unabhängig voneinander sind, werden die Likelihood-Vektoren der einzelnen Sensoren nun elementweise miteinander multipliziert, um den Likelihood-Vektor für  $H_i$  über alle  $K$  Sensoren  $\Lambda_i = \lambda_1^1, \dots, \lambda_i^K$  wie folgt anzugeben:

$$\Lambda_i = \prod_{k=1}^K P(E^k|H_i). \quad (10)$$

Für die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit, gilt dann

$$P(H_i|E^1, \dots, E^K) \propto P(H_i) \cdot \Lambda_i. \quad (11)$$

### C. Aufstellen und Verfolgen der Hypothesen

Neben den virtuellen Sensoren, die für jeden Berechnungsschritt der Bayes'schen Sensorfusion die Likelihood-Vektoren liefern, ist die initiale Bestimmung der a-priori-Wahrscheinlichkeit und dadurch die Auswahl der zu verfolgenden Gleishypothesen von zentraler Bedeutung. Die Hypothesen bilden die Auswahl an Gleisen, auf denen die momentane Position des Fahrzeuges vermutet wird.

## V. ERGEBNISSE

Mit den vorgestellten virtuellen Sensoren und der Bayes'schen Sensorfusion wurden Berechnungen anhand der aufgezeichneten Messdaten von insgesamt 20 Befahrungen einer realen Teststrecke durchgeführt. Diese sollen die unter realen Bedingungen erzielbaren Ergebnisse bei der Ortung von Schienenfahrzeugen mit dem vorgestellten Verfahren aufzeigen. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der Sensoren einzeln vorgestellt, indem die bei der Fahrt auf einem bestimmten Gleis erzeugten Likelihood-Vektoren dargestellt werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Sensoren mit der Sensorfusion kombiniert, um dann die Verfolgung mehrerer Hypothesen entlang einer kurzen Strecke durch einen kleinen Bahnhof zu zeigen.

### Betrachtung der Schwellenabstände

Aufgrund annähernd gleichen Abständen im gesamten Netz liefert der virtuelle Sensor für den Schwellenabstand den geringsten Beitrag zur Gleiserkennung.

### Betrachtung der Schwellenzahl

Ein gutes Kriterium, um Hypothesen zu Gleisen auszuschließen, ist die Anzahl der gezählten Schwellen. Wurden im Verlauf des aktuellen Gleises mehr Schwellen gezählt als zu einer aktiven Hypothese gehören, so kann diese mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit versehen werden.

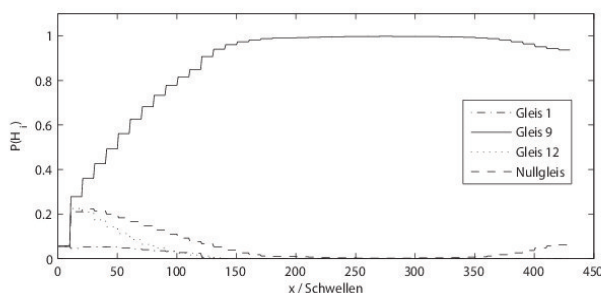


Abb. 4. Verlauf der a-posteriori-Wahrscheinlichkeit  $P(H_i)$  unter ausschließlicher Betrachtung des Signaturabstands.

### Signaturvergleich

Da die Weichen sich in den Leistungssignaturen wiederfinden, entspricht dieser virtuelle Sensor einen Korrelationsansatz und ermöglicht aufgrund des Vorhandenseins einer Weiche bereits wenige Meter hinter dem Kartenknoten eine verlässliche Aussage über das befahrene Gleis. In Abb. 4 ist der Verlauf von  $P(H_i)$  bei Fahrt über Gleis

9 mit Hypothesen für zwei weitere, hier lokal nahe, Gleise (1 und 12) dargestellt.

### Verfolgung der Position mit Hilfe der Hypothesen

Die Auswertung der virtuellen Sensoren und die Fusion ihrer Messwerte mit der Bayes'schen Sensorfusion erlaubt ebenfalls das Verfolgen der Fahrzeugposition entlang eines Fahrweges. Hierzu wird zunächst eine bekannte Startposition an einer Weiche vorausgesetzt. Nun werden die in Fahrtrichtung an die Weiche anschließenden Gleise als Hypothesen aufgestellt und mit den von nun an gemessenen Sensordaten aktualisiert. Abb.5 zeigt, wie bereits nach wenigen Metern die korrekte Hypothese gefunden und beibehalten wird.

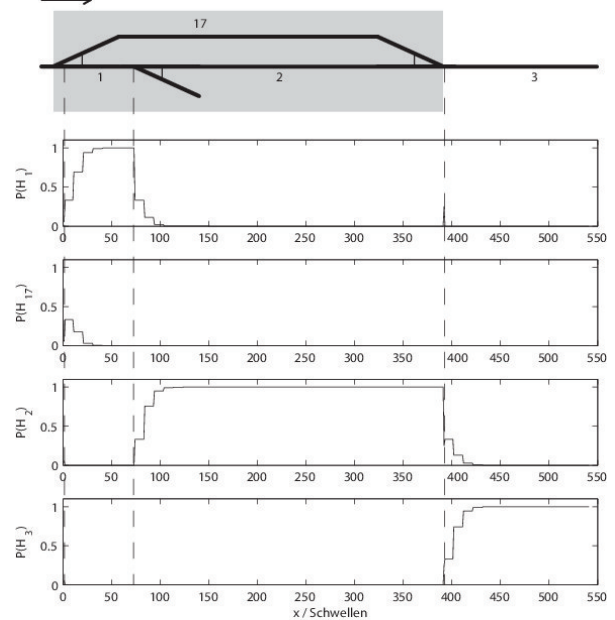


Abb. 5. Verlauf der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit  $P(H_i)$  bei der Befahrung eines Bahnhofes.

Die zurückgelegte Strecke wird ebenfalls über die gezählten Schwellen und somit driftfrei bestimmt.

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

Der Aufsatz zeigt, wie allein mit Hilfe des WSS Signals die zurückgelegte Distanz sowie das aktuell befahrene Gleis innerhalb einer topologischen Karte bestimmt werden können. Die Erweiterung der Karte mit gleisspezifischen Signalcharakteristika erlaubt den Einsatz virtueller Sensoren, die beliebig mit realen Sensoren kombiniert werden können. Der rekursive Ansatz der Bayes'schen Sensorfusion erlaubt zudem eine Positionsbestimmung zur Laufzeit, deren einzelne Hypothesen mit quantifizierbaren Wahrscheinlichkeiten weiteren Verarbeitungsmodulen zur Verfügung stehen. Auf Basis einer Weichendetektion von 99 % ist eine robuste und präzise Positionsbestimmung möglich, was anhand realer Messdaten aufgezeigt wurde.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Hensel, S., Hasberg, C., Stiller, C., „Probabilistic Rail Vehicle Localization with Eddy Current Sensors in Topological Maps,“ *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, Nr. 4, p. 1–13, 2011.
- [2] Hensel, S., Strauss, T., Marinov, M., „Eddy current sensor based velocity and distance estimation in rail vehicles,“ *IET Science, Measurement & Technology*, Bd. 9, Nr. 7, p. 875–888, 2015.
- [3] L. Klein, *Sensor and Data Fusion*, Washington: SPIE-International Society for Optical Engineering,., 2004.
- [4] G. Denoix, „Topologische Ortung von Schienenfahrzeugen, Diplomarbeit,“ Universität Karlsruhe, 2009.