

# „Verortung“ der Prüfergebnisse bei der ZfP an Eisenbahnschienen

Ralf CASPERSON, Anika DEY, Rainer POHL, Hans-Martin THOMAS  
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87,  
12205 Berlin

**Kurzfassung.** Das Schienennetz der DB und anderer Bahngesellschaften wird regelmäßig mit Schienenprüfzügen inspiziert. Die mit den Prüfzügen aufgenommenen Messdaten werden offline zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet. Um Prüfbefunde manuell nachprüfen und ggf. Reparaturmaßnahmen einleiten zu können, ist eine möglichst exakte Zuordnung der Befunde zum Prüfort notwendig.

Theoretisch ist jeder Ort des Schienennetzes durch Streckennummer, Richtungskennzahl und Kilometrierung exakt beschrieben. In der Praxis treten jedoch bei der Zuordnung diverse Probleme auf: Die Kilometrierung wird während der Prüfung manuell erfasst, indem die Beschriftung der Kilometer- bzw. Hektometertafeln in das Prüfsystem eingegeben und deren Position beim Vorbeifahren per Tastendruck in die Messdaten „eingeblickt“ wird. Die Hektometertafeln stehen jedoch nicht an der aufgedruckten Position, sondern sind am nächstgelegenen Mast montiert. Dagegen ist die Ungenauigkeit des manuellen „Einblickens“ vernachlässigbar. Außerdem ist die Kilometrierung nicht immer eindeutig, da nach Umbaumaßnahmen Kilometersprünge (sowohl fehlende als auch doppelte Kilometer) auftreten können.

Abhilfe verspricht der Einsatz des satellitengestützten GPS, vorausgesetzt, die Strecken sind exakt vermessen. Um eine ausreichende Positionsgenauigkeit auch bei schlechten Empfangsbedingungen zu erreichen, ist jedoch ein erheblicher Aufwand notwendig. Die Positionsgenauigkeit eines Standard-GPS-Empfängers genügt hier nicht.

Es wird ein Verortungssystem hoher Positionsgenauigkeit auf der Basis des GPS vorgestellt, das sich derzeit in der Erprobung befindet.

## Einführung

Das Schienennetz der DB und anderer Bahngesellschaften wird regelmäßig mit Schienenprüfzügen inspiziert. Die mit den Prüfzügen aufgenommenen Messdaten werden offline zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet. Um Prüfbefunde manuell nachprüfen und ggf. Reparaturmaßnahmen einleiten zu können, ist eine möglichst exakte Zuordnung der Befunde zum Prüfort notwendig.

Theoretisch lässt sich jeder Ort des deutschen Schienennetzes durch Streckennummer, Richtungskennzahl und Kilometrierung exakt beschreiben. Die Kilometrierung ist jedoch nicht immer eindeutig, da nach Umbaumaßnahmen Kilometersprünge in Form fehlender oder doppelter Kilometer auftreten können. Außerdem gelten Streckennummer und Richtungskennzahl nur für die Hauptgleise zwischen den Bahnhöfen. Für Weichenstraßen z. B. im Bahnhofsbereich gibt es in der Regel keine eindeutige Bezeichnung der einzelnen Gleisabschnitte.

Die Datenaufnahme wird über einen kalibrierten inkrementalen Weggeber getriggert. Innerhalb einer Prüffahrt liegt somit eine genaue Längenmessung vor. Es fehlt jedoch die Zuordnung der internen Längenmessung zur Kilometrierung der Gleise.

## Klassische Verortung

Bei der klassischen Verortung wird die Kilometrierung während der Prüfung manuell erfasst, indem die Beschriftungen der Kilometer- bzw. Hektometertafeln in das Prüfsystem eingegeben und deren Positionen beim Vorbeifahren per Tastendruck in die Messdaten „eingeblickt“ werden. Die Hektometertafeln stehen jedoch nicht an der aufgedruckten Position, sondern sind am nächstgelegenen Mast montiert. Der Nominalabstand der Hektometertafeln beträgt 200 m, der Mastabstand ca. 60 bis 75 m. Daraus ergibt sich eine Fehlpositionierung von bis zu  $\pm 38$  m. Zwar ist auf den meisten Hektometertafeln der Standort mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  m in Form sog. Restmeter angegeben, die Schriftgröße der Restmeter ist jedoch so klein, dass diese Restmeter im Vorbeifahren kaum erkennbar sind. Listen oder eine Datenbank mit den exakten Positionen der Hektometertafeln stehen nicht zur Verfügung. Gegenüber der Fehlpositionierung der Hektometertafeln ist die Ungenauigkeit des manuellen „Einblitzens“ vernachlässigbar.

Mit Hilfe der linearen Regression gelingt es, jedem Prüfkilometer einen Streckenkilometer zuzuordnen. Es verbleibt jedoch ein unbekannter Offset zwischen den berechneten Streckenkilometern und der Kilometrierung der Gleise. Die lineare Regression wird daher nur zur Plausibilitätsprüfung und ggf. Korrektur der manuell eingegebenen Hektometer verwendet.

Bei der Lokalisierung von Befunden im Gleis dienen die Hektometertafeln als grobe Wegmarken und nicht als Kilometerangaben. Ausgehend von der Wegmarke wird zunächst eine im Gleis sichtbare Formanzeige (z. B. Schweißnaht) gesucht. Die Position des Befundes wird dann relativ zu der Formanzeige auf den Millimeter genau angegeben.

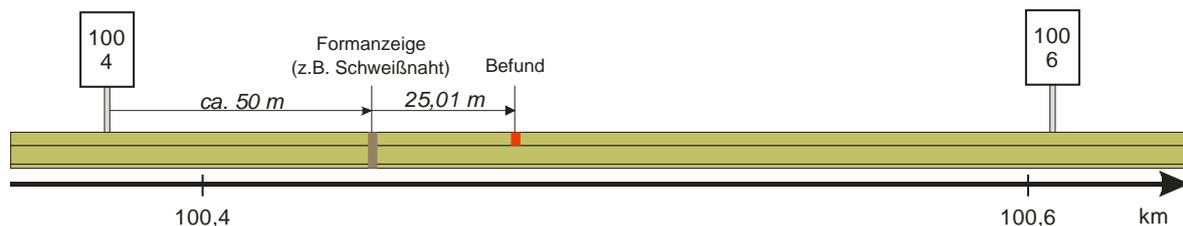


Abbildung 1: klassische Verortung

Sofern die Beschriftungen der Tafeln korrekt eingegeben wurden, ist diese Vorgehensweise zur Lokalisierung von Befunden auf Hauptgleisen in der Regel ausreichend. Es wird jedoch nicht erkannt, wenn der Zug z. B. vorübergehend auf das Gegengleis umgeleitet wurde. In Weichenstraßen lässt sich nicht mehr nachvollziehen, welchen Weg der Prüfzug genommen hat. Für eine kilometergetreue Speicherung der Befunde in einer Datenbank ist die klassische Verortung ebenfalls ungeeignet.

## GPS-gestützte Verortung

Jeder Punkt auf der Erde ist durch seinen Breiten- und Längengrad eindeutig bestimmt. Da ist es naheliegend, das satellitengestützte, globale Positionierungssystem (GPS) auch für die Verortung der Befunde im Gleis zu verwenden.

Um eine ausreichende Positionsgenauigkeit auch bei schlechten Empfangsbedingungen zu erreichen, ist jedoch ein erheblicher Aufwand notwendig. Bei parallelen Gleisen beträgt der Gleisabstand von Mitte zu Mitte ca. 4 m. Damit anhand der GPS-Koordinaten bestimmt werden kann, auf welchem Gleis sich der Zug befand, darf der Positionierungsfehler maximal  $\pm 2$  m betragen. Die Positionsgenauigkeit eines Standard-GPS-Empfängers genügt hier nicht.

Die Fa. Geo++ [3] wurde von der DB [1] beauftragt, ein GPS-gestütztes Verortungssystem mit entsprechender Genauigkeit zu entwickeln und auf den Prüfzügen der DB zu installieren. Die Fa. technet [6] steuert einen digitalisierten Streckenatlas mit Streckennummern, Richtungskennzahlen und Kilometrierung der Hauptgleise sowie eindeutiger Bezeichnung aller Gleisabschnitte in Weichenstraßen bei.

### *Funktionsprinzip*

Die Erde wird von derzeit 24 GPS-Satelliten umkreist. Jeder Satellit besitzt eine eigene Atomuhr und sendet ständig ein hochpräzises Zeitsignal zur Erde. Je nach Abstand des Satelliten zum Empfangsort benötigt das Zeitsignal unterschiedlich lange zum Empfänger. Aus den bekannten Bahnen der Satelliten und dem Zeitversatz der Signale berechnet der GPS-Empfänger seine aktuelle Position.

### *Fehlerquellen*

Es gibt im Wesentlichen zwei Fehlerquellen, die die Positionsgenauigkeit negativ beeinflussen: die Ionosphäre und Reflexionen.

Auf Grund schwankender, elektromagnetischer Eigenschaften der Ionosphäre ändert sich ständig die Laufzeit des GPS-Signals beim Durchdringen der Ionosphäre.

Wird ein GPS-Signal von einer Hauswand, einem Felsen o. Ä. zum GPS-Empfänger hin reflektiert, benötigt es eine längere Laufzeit, als Signale, die auf direktem Wege vom Satelliten zum GPS-Empfänger gelangen. Daher führen Reflexionen bei einigen GPS-Empfängern zu Fehlpositionierungen. Gute GPS-Empfänger erkennen Reflexionen und werten nur Signale aus, die sie auf direktem Wege erreichen.

### *Kompensation ionosphärischer Laufzeiteffekte*

Zur Steigerung der Positionsgenauigkeit wird oft das sog. differenzielle GPS (DGPS) eingesetzt. Dabei sendet eine Referenzstation bekannter Position ständig die Differenz zwischen ihrer tatsächlichen und der per GPS ermittelten Position. Im stationären Fall lassen sich in der Nähe der Referenzstation Genauigkeiten im cm-Bereich erzielen. Mit steigendem Abstand zur Referenzstation und zunehmender Geschwindigkeit sinkt jedoch die Positionsgenauigkeit.

Bei der sog. Realtimekinematik (RTK) wird zusätzlich zum DGPS-Signal der Referenzstation die Bewegung des GPS-Empfängers berücksichtigt. Dadurch entfällt die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Positionsgenauigkeit. Aber auch hier hängt die Genauigkeit stark vom Abstand von der Referenzstation ab.

Sowohl bei DGPS als auch RTK handelt es sich um Online-Korrekturen mit Hilfe einzelner Referenzstationen.

Einen anderen Weg bietet die europäische Raumfahrtbehörde ESA mit ihrem „European Geostationary Navigation Overlay Service“ (EGNOS) [2]. Mit Hilfe von drei geostationären Nachrichtensatelliten und 34 Empfangsstationen werden die Laufzeiteffekte der Ionosphäre gemessen und kartographiert. Die Laufzeitdaten werden sekundlich auf dem FTP-Server <ftp://ems.estec.esa.int/> gespeichert und können von dort kostenlos für den Zeitraum seit dem 01.01.2006 über das Internet abgerufen werden. EGNOS ermöglicht innerhalb Europas eine nachträgliche Korrektur der GPS-Koordinaten unabhängig von Ort und Geschwindigkeit auf eine Genauigkeit von  $\pm 1$  m, vorausgesetzt, der Zeitpunkt ist genau bekannt.

## Überbrückung bei Empfangsausfall

Bei Ausfall des GPS-Empfanges z. B. in Tunneln oder unter Bahnhofsdächern wird die zurückgelegte Strecke anhand eines inkrementalen Weggebers ermittelt. Zur Erkennung von Kurven werden mit einem optischen Kreisel die Querbeschleunigungen des Zuges gemessen. Aus den letzten empfangenen GPS-Koordinaten, dem Wegtakt und den Beschleunigungswerten approximiert eine sog. Inertial Measurement Unit (IMU) die Koordinaten des Zuges.

IMUs sind jedoch mit einer Drift behaftet, so dass sich mit steigender Wegstrecke ein zunehmender Positionierungsfehler quer zur Fahrtrichtung ergibt.

Werden die Beschleunigungswerte online aufgezeichnet, ergibt sich im Nachhinein die Möglichkeit einer virtuellen Rückwärtsfahrt mit entgegengesetzter Drift. Werden Vorwärtsfahrt und virtuelle Rückwärtsfahrt miteinander kombiniert, lässt sich die Drift der IMU offline kompensieren.

## Zuordnung der GPS-Koordinaten zu den Prüfdaten

Bisher wurden nur die GPS-Koordinaten in den Messdaten gespeichert, synchronisiert mit dem Sekundentakt des GPS-Empfängers.

Die Korrektur der GPS-Koordinaten mit Hilfe von EGNOS [2] erfordert es, einen präzisen Zeitstempel in den Messdaten abzuspeichern. Zu diesem Zweck wurden die Prüfzüge der DB mit IRIG-Zeitcodeempfängern [4] nachgerüstet, die per Funk mit der Atomuhr der PTB [5] synchronisiert werden.

Die Positionen der Prüfzüge der DB sowie deren Beschleunigungsdaten werden an den RaiLNav-Server der Fa. Geo++ [3] gesendet und dort zusammen mit der aktuellen GPS-Zeit abgespeichert.

Während der Prüfung werden zunächst die unkorrigierten GPS-Koordinaten des GPS-Empfängers in den Messdaten gespeichert. Bei der Auswertung der Messdaten werden dann die Zeitstempel an den RaiLNav-Server übertragen. Der RaiLNav-Server ermittelt an Hand der Zeitstempel die dazugehörigen GPS-Koordinaten und Beschleunigungswerte. Die GPS-Koordinaten werden mit Hilfe von EGNOS [2] korrigiert und ggf. mit Hilfe der Beschleunigungswerte approximiert. Anschließend werden die korrigierten GPS-Koordinaten mit dem Streckenatlas der Fa. technet [6] abgeglichen. Der RaiLNav-Server sendet zu jedem Zeitstempel die korrigierten GPS-Koordinaten zusammen mit der Streckennummer, Richtungskennzahl und Kilometrierung an das Prüfsystem zurück. Zwischen den Zeitstempeln werden die GPS-Koordinaten durch Cubic-Spline-Interpolation interpoliert, die Kilometrierung anhand des inkrementalen Weggebers hochgezählt.

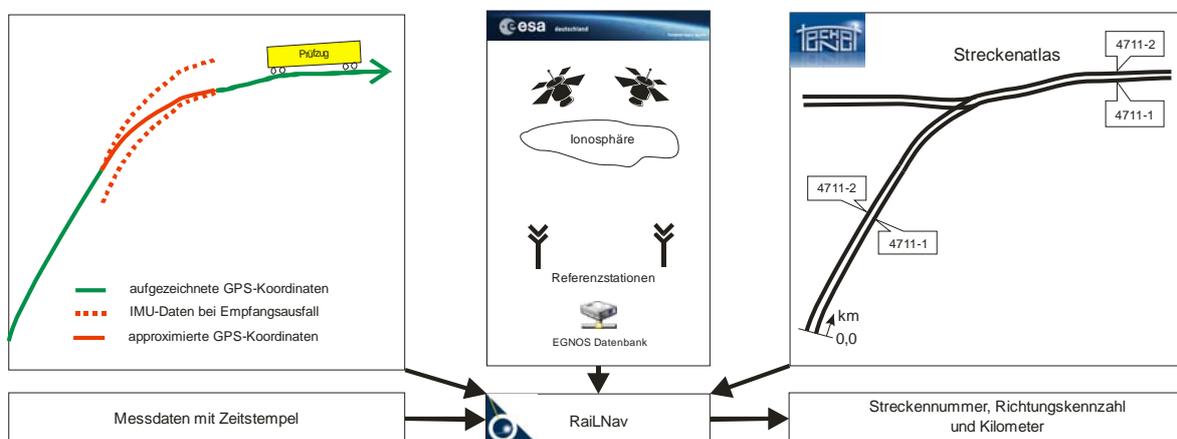


Abbildung 2: GPS-gestützte Verortung

## Referenzen

- [1] DeutscheBahn AG, DB Systemtechnik, Pionierstraße 10, 32423 Minden, <http://www.db-systemtechnik.de/>
- [2] European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS), European Space Agency (esa), 8-10 rue Mario Nikis, 75738 Paris Cedex 15, <http://www.esa.int/egnos/>
- [3] Geo++<sup>®</sup> Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH, Steinriede 8, 30827 Garbsen, <http://www.geopp.de/>
- [4] IRIG Zeitcode-Formate, Meinberg Funkuhren GmbH & Co. KG, Lange Wand 9, 31812 Bad Pyrmont, <http://www.meinberg.de/german/info/irig.htm>
- [5] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Fachbereich 4.4, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, <http://www.ptb.de/zeit/>
- [6] technet GmbH, Goethestraße 42, 10625 Berlin, <http://www.technet-gmbh.de/>