

QM mit moderner Messtechnik beim Bau einer Festen Fahrbahn

Mit gezieltem Einsatz von Inertialmesstechnik wurde an der NBS Wendlingen–Ulm ein neuer Weg für die Qualitätskontrolle beim Bau der Festen Fahrbahn gefunden.

HELGE GRAFINGER | LISA-MARIA RIEDEL |
UWE DÖRING

Auf der Neubaustrecke (NBS) Wendlingen–Ulm wurden ca. 120 km Feste Fahrbahn (FF) für den Hochgeschwindigkeitsbetrieb gebaut. Die Betonierung des fertig gerichteten Gleises erfolgte mit zwei an unterschiedlichen Teilstücken betriebenen Betonfertigern. Zur unmittelbaren Kontrolle der inneren Geometrie des betonierten Gleises wurde bei den Fertigern je ein automatisch messender Gleismesswagen eingesetzt, welcher als Kernsensor mit einer Inertialmesseinheit (IMU – Inertial Measurement Unit) ausgestattet ist. Die Ergebnisse können live vor Ort und über ein Web-Interface betrachtet werden. Als Schlussdokumentation der inneren und äußeren Geometrie der FF gemäß DB-Richtlinie wird dieselbe Messkonfiguration, erweitert um eine Totalstation, in einem kombinierten Stop&Go-Betrieb eingesetzt.

Über das Projekt

Der Neubau der 60 Kilometer langen zweigleisigen Hochgeschwindigkeitsstrecke Wendlingen–Ulm ist Teil des Bahnprojekts Stuttgart–Ulm und wird die Fahrzeit im Fernverkehr zwischen den beiden süddeutschen Metropolen von bisher 54 Minuten auf dann 28 Minuten fast halbieren. Die Hochgeschwindigkeitszüge erreichen dabei eine Geschwindigkeit von 250 Stundenkilometer. Insgesamt wurden zwischen Wendlingen und Ulm in zwei Baulosen knapp 120 km FF und 24 Weichen eingebaut, wobei ca. die Hälfte der 120 km FF in insgesamt zwölf Tunneln verläuft. Das Projekt wurde in zwei Abschnitte, und zwar GU3 (Wendlingen–Hohenstadt) und GU4 (Hohenstadt–Ulm) geteilt. Die Herstellung der FF erfolgte in Teilstücken bis zu ca. 8 km Länge, wobei mit dem Bereich GU4 im Jahr 2020 begonnen wurde. Ausgangsflächen waren in den Tunnelbauwerken die Tunnelsohle, auf den offenen Strecken die Frostschutzschicht und auf den Brückenbauwerken die Oberkante des Schutzbetons. In den Tunnelbauwerken wurde zunächst eine Ausgleichsschicht, auf den offenen Strecken die hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) aufgebracht. Anschließend erfolgte der Bau der FF in den einzelnen Abschnitten im Wesentlichen

in den folgenden Arbeitsschritten:

- Austeilung der Armierung der FF
- Austeilen der Schienenstützpunkte
- Einziehen der Schienen
- Montage der seitlichen Schalung
- Justierung der Abstände der Schienenstützpunkte (Schwellen)
- Montage der Richtsysteme (jedes dritte Schwellenfach)
- Grobrichten
- Feinrichten
- Betonieren
- Schweißen der Schienenstöße
- Kontrollmessung.

Die räumliche und zeitliche Folge dieser Arbeitsschritte erfordert eine ausgeklügelte Logistik, weshalb, wie oben angeführt, einzelne Abschnitte, für welche alle Voraussetzungen des Transports und der Zugänglichkeit im geplanten Zeitraum gewährleistet sind, zur Ausführung gelangten.

Im GU4 wurde jeweils ein Abschnitt (Bauspitze) bearbeitet, im folgenden GU3 kamen zwei Bauspitzen zum Einsatz.

Über das Einrichten und die Kontrolle der Festen Fahrbahn

Fahrbahnssysteme, welche auf Schwellen aufbauen, werden üblicherweise nach folgendem

Ablauf eingerichtet: Grundlage ist eine entsprechende Tragschicht (HGT, Ausgleich- oder Schutzbeton), auf welcher die Schwellen ausgelegt und anschließend die Schienen montiert werden. In diesem Arbeitsschritt werden sowohl die Schwellenabstände als auch die provisorische Lage quer zur Achse hergestellt. Nach Anbringung der Hebe-/Richtelemente und provisorischer Höheneinrichtung ist der Gleisrost bereit für den Richtvorgang. Als Referenz für diese provisorische Lage und Höhe dienen Nägel, welche in einem konstanten Abstand von der definierten Gleisachse abgesteckt werden, sowie die Oberfläche der Tragschicht selbst, welche vorab mit einer Toleranz von +0,5/-1,5 cm zur geplanten Höhe herzustellen war.

Der Feinrichtvorgang wird in zwei Stufen mit abschließender Bestandsaufnahme durchgeführt, wobei eine Kombination aus Totalstation, Gleismesswagen und weiteren Sensoren zum Einsatz kommt. Am gegenständlichen Projekt wurde die Firma Intermetric/Niederlassung Ulm mit den vermessungstechnischen Aufgaben des Projektes, insbesondere mit dem Gleisrichten, beauftragt. Die Firma Intermetric verfügt über ein eigenes Messsystem für diesen Prozess, welches auf langjährigen erfolgreichen Einsatz zurückblicken kann.



Abb. 1: Mit dem Betonfertiger gekoppelter Gleismesswagen mit IMU, Stromversorgung und Feldcomputer

Quelle aller Abb.: eigene Darstellung

An dieser Stelle ist zu erwähnen, was in vielerlei Publikationen und auch Richtlinien über das Einrichten einer FF immer wieder betont wird. Grundlage für das Herstellen einer Gleislage höchster Präzision ist neben der eindeutigen Trassierungsdefinition (Achse, Gradiente, Überhöhung) das Referenzpunktfeld – ein objektbezogenes Festpunktfeld im Punktstatus PS-4 – entlang der zu errichtenden Eisenbahntrasse. Dieses besteht wie bei allen derartigen DB-Projekten in Form von Gleisvermarkungspunkten (GVP) an den Fahrleitungsmasten bzw. in den Tunnelabschnitten unterhalb der Fahrdräufhängungen. GVP sind daher im Abstand zwischen 50 und 70 m beidseitig verfügbar. Die Koordinaten und Höhen liegen mit einer Nachbarschaftsgenauigkeit vor, welche die laut DB-Richtlinie 883.4500 geforderten ± 3 mm in der Lage und ± 1 mm in der Höhe erfüllen. Referenz ist die Vorderkante bzw. der höchste Punkt des Bolzens. Die Signalisierung erfolgt mittels Adapter, auf dem ein Vermessungsprisma mittels Dosenlibelle exakt vertikal über dem Referenzpunkt eingerichtet wird. Das Referenzpunktfeld wurde durch die Vermessung seitens der Bauausführung gemessen und ausgewertet. Es wird mit jeder der mehrfach täglich durchgeführten Messungen, bei denen mindestens vier Referenzpunkte angezielt werden, in seiner inneren Geometrie auf etwaige Veränderungen geprüft. Mit halbjährlichen Messungen und Auswertungen des gesamten objektspezifischen Festpunktfeldes wird die unveränderte Lage in Bezug auf das übergeordnete Festpunktfeld überwacht.

Qualitätskontrolle beim Betonieren

Der feingerichtete und kontrollierte Gleisrost ist somit für das Betonieren bereit. Dieses erfolgt mit einem Betonfertigerzug, welcher eine Länge von ca. 200 m aufweist. Durch Einsatz von stabilen Hebe-/Richtelementen und ausreichender Fixierung des Gleisrosts ist die präzise Gleislage gewährleistet. Äußere Einflüsse wie z.B. Temperaturänderungen können jedoch bis zum Einbringen des Betons Änderungen in der Gleislage bewirken. Aus diesem Grund hat die Rhombberg Bahntechnik GmbH schon vor 20 Jahren beim Bau der FF am Lötschberg-Basistunnel ein mitlaufendes Messsystem entwickelt und zum Einsatz gebracht, welches Abweichungen der inneren Geometrie des Gleises von den Sollwerten angezeigt hat. Dieses Messsystem war eine Wandersehne, welche auf zwei Gleismesswagen geführt wurde und mithilfe derer auf einem dritten Messwagen in der Mitte die horizontalen und vertikalen Pfeilhöhen gemessen wurden. Toleranzüberschreitungen wurden optisch mit einer Signalleuchte angezeigt.

Aufbauend auf dieser Idee und gestärkt durch den mittlerweile erfolgten Fortschritt im Bereich Sensorik, Datenübertragung und Datenverarbeitung, wurde im Digitalisierungsteam der Rhombberg Sersa Rail Group (RSRG) in Zusammenarbeit mit der Trimble

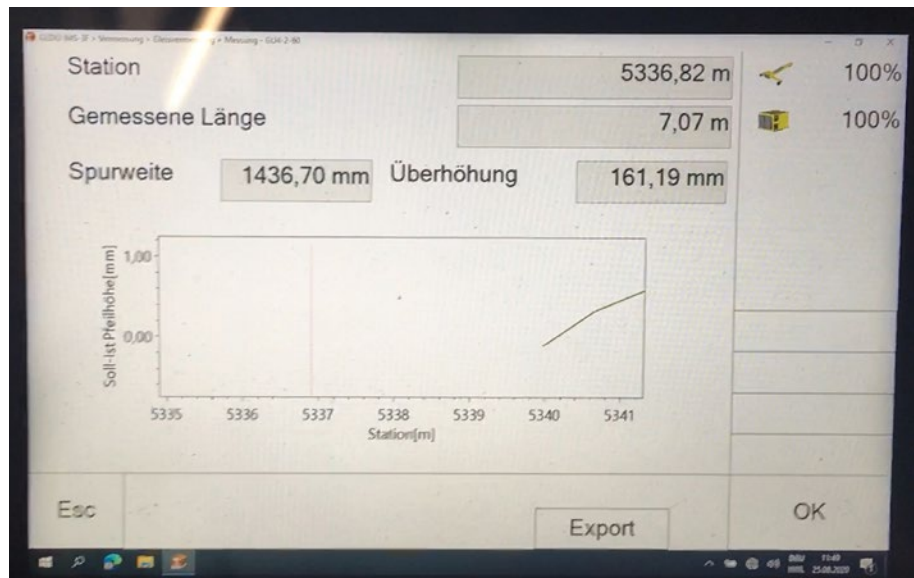


Abb. 2: Display des Feldcomputers mit Live-Anzeige der Messung

Railway GmbH, einem Hersteller von mobilen Gleismesssystemen, eine zukunftsweisende Lösung erarbeitet, welche schließlich am Projekt Wendlingen-Ulm zum Einsatz gekommen ist.

Grundlage für diese Entwicklung war das Trimble GEDO IMS System. Dieses ist mit einer hochpräzisen IMU ausgestattet. Eine IMU besteht aus einer Kombination aus jeweils drei hochsensiblen Beschleunigungssensoren und Kreiseln, welche in drei zueinander rechtwinklig angeordneten Achsen montiert sind. Mit diesen Sensoren ist es möglich, die relative Position und räumliche Orientierung der Messeinheit in Bezug auf einen Startpunkt – ohne zusätzliche außerhalb des Messsystems befindliche Sensoren – zu messen. Lediglich eine zusätzliche Wegmessung ist für die Erreichung von hochgenauen Ergebnissen erforderlich. Im Fall von Gleismesswagen sind dies Odometer, welche die zurückgelegte Strecke anhand von Umdrehungen eines der Laufräder messen. Der während der Messung zurückgelegte dreidimensionale Pfad wird als Trajektorie bezeichnet.

Zwei Eigenschaften kennzeichnen eine derartige Sensorik. Sie benötigt nach dem Start eine gewisse Zeit, um sich auf die näherungsweise auf der Erde bekannte Position zu initialisieren, und im Laufe der Messdauer weisen die Sensoren eine Drift auf, welche durch das Einbeziehen von bekannten (Zwischen-)Referenzpunkten korrigiert werden kann. Anders ausgedrückt, liefert eine IMU mit hoher Genauigkeit die nachbarschaftliche (innere) Geometrie der zurückgelegten Trajektorie. Diese kann durch Hinzunahme von bekannten Stützpunkten (Referenzpunkten) in ein vorhandenes Koordinatensystem transformiert werden.

Inertialmesseinheiten (IMU) werden bei mobilen Gleismesswagen bereits erfolgreich

für das Vormessen vor Stopfarbeiten sowie für kinematische Scans eingesetzt. Dabei werden die Wagen typischerweise mit Schrittgeschwindigkeit von ca. 1 m/s geschoben. Betonfertiger werden im Betrieb mit wenigen Zentimetern pro Sekunde bewegt. Inwieweit es mit so einer Geschwindigkeit möglich ist, brauchbare Messergebnisse zu erzielen, musste erst getestet werden. Daher wurde zunächst ein Feldtest durchgeführt, bei dem ein GEDO IMS Wagen mit einem Betonfertiger in Betrieb gekoppelt war und ca. 4 Stunden durchgehend Daten aufzeichnete. Diese Daten wurden anschließend ausgewertet und mit der Sollgeometrie verglichen. Der Vergleich zeigte einerseits einen glatten Verlauf der Trajektorie über den gesamten Messzeitraum, andererseits Abweichungen von den Sollwerten unter 1 mm sowie eine niederfrequente Schwingung im 1/10 mm-Bereich von Schwelle zu Schwelle. Somit war die grundsätzliche Eignung der Messmethode bestätigt, und die Umsetzung in ein einsatzbereites System wurde gestartet. Im Einzelnen waren dazu folgende Maßnahmen erforderlich:

- Herstellung einer Bediensoftware für den Baustelleneinsatz (Systemstart durch den Polier am Betonfertiger)
- Bereitstellung einer Schwellenliste mit Nummer und Stationierung, um Start und Ende im Betrieb in Bezug zur Trassierung eingeben zu können
- Herstellung einer Stromversorgung für den Dauerbetrieb
- Herstellung einer praxistauglichen mechanischen Kopplung mit dem Betonfertiger
- Herstellung verschiedener mechanischer Vorrichtungen zur Verhinderung von Entgleisungen des Gleismesswagens zur Überfahung von offenen (2-5 cm!) Schienenstößen
- Bereitstellung einer mobilen Datenverbindung zwischen Messsystem und Internet für Fernwartung und Datenübertragung

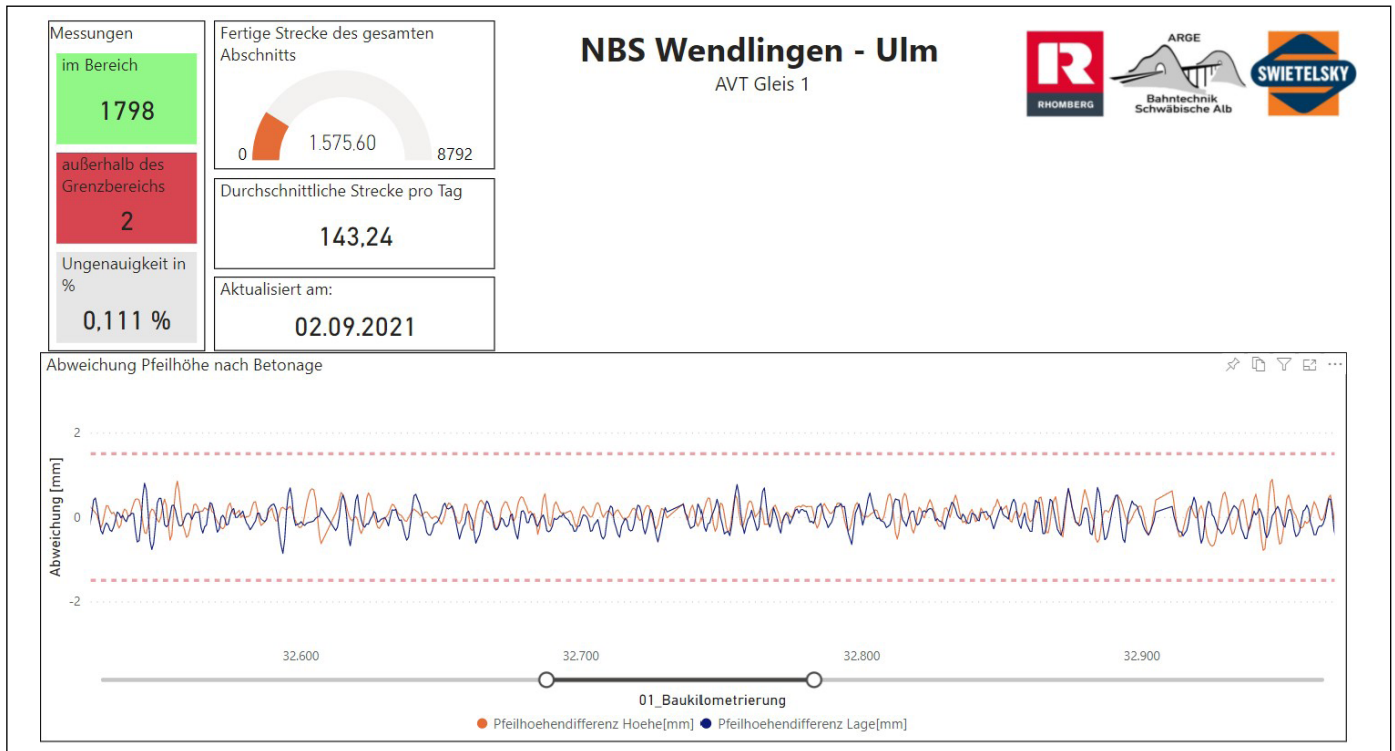


Abb. 3: Grafik der Web-Applikation mit den Ergebnissen der inneren Geometrie des aktuellen Abschnittes

Herstellung einer halbautomatischen Auswertung zur Gewährleistung der Verfügbarkeit der Ergebnisse auf einem Dashboard. Sobald die mechanischen und betrieblichen Grundlagen hergestellt waren, wurde das erste System in den Dauerbetrieb gestellt. Datenübertragung und Ergebnisdarstellung wurden sukzessive schon während des laufenden Betriebes umgesetzt und verbessert. Schließlich waren durch den Einsatz von zwei Betonfertigern auch zwei modifizierte GEDO IMS Wagen im Einsatz, welche im Dauerbetrieb die innere Geometrie der FF direkt nach dem Betonieren kontrollierten.

Für jeden Betonierabschnitt wurden durch den vor Ort tätigen Vermesser in der Bauleitung die Trassierungsdaten so aufbereitet, dass sie durch das Messsystem verwendet werden konnten. Ebenso wurde die Liste der Schwellen angelegt. Weiter wurde sichergestellt, dass es besonders in den Tunnelabschnitten Internetverbindung über WLAN-Router gab. Dies ist zwar keine zwingende Bedingung für den Betrieb des Messsystems, erleichtert jedoch die Datenübertragung und auch den Eingriff bei möglichen Störungen. Das Messsystem selbst wird einmal in der Nähe des Einsatzabschnittes kalibriert und ist damit messbereit. Es wird dann zum Betonfertiger transportiert, aufgebaut und aufgleist, mit dem Betonfertiger gekoppelt sowie die Stromversorgung hergestellt (Abb. 1).

Start und Abschluss der Messungen wurden durch die Poliere am Betonfertiger vorgenommen. Dazu wird das System – es verbleibt dauerhaft am Gleis – vor Start des Fer-

tigers eingeschaltet und damit die örtliche Initialisierung gestartet. Nach Abschluss der Initialisierung (ca. 5 Minuten im Stillstand) wird die aktuelle Schwellennummer eingegeben, auf der sich das System befindet. Dadurch ist die Verknüpfung zur Solltrassierung hergestellt. Das System ist dann im Messmodus und beginnt die Aufzeichnung. Die aktuelle Abweichung der inneren Geometrie wird permanent am Bildschirm des Feldrechners angezeigt (Abb. 2).

Die Messdaten der abgeschlossenen Schichten wurden täglich durch den vor Ort tätigen

Vermesser heruntergeladen und dort mittels einer automatisierten Routine einem Dashboard zugeführt. Auf diesem Dashboard sind nicht nur die Abweichungen der inneren Geometrie dargestellt, sondern auch die aktuelle Tagesleistung und der Prozentsatz der bereits fertiggestellten FF am aktuellen Betonierabschnitt (Abb. 3). Das Dashboard steht den verantwortlichen Mitarbeitern der Bauleitung zur Verfügung. Zusätzlich werden diese auch via Mail informiert, sobald Abweichungen signifikant größeren Ausmaßes erkennbar sind.



Abb. 4: Gleismesswagen GEDO IMS mit IMU, Totalstation und Feldcomputer an einer Stop-Position (Messung der aktuellen absoluten 3D-Lage)

Schlussdokumentation der Gleisgeometrie

Eine weitere Aufgabe, welche mittels IMU gelöst wurde, ist die Schlussdokumentation der FF vor Übergabe gemäß DB-Richtlinie. Diese sieht vor, dass an jeder Schwellenposition die absolute Gleislage zu prüfen ist. Dies wird herkömmlich mit einem mobilen Gleismesswagen mit Prisma unter Verwendung einer Totalstation, welche im Feld der umliegenden Referenzpunkte stationiert wird, durchgeführt. Der Gleismesswagen wird dann an jeder Schwelle angehalten, die Position des Prismas gemessen und in weiterer Folge unter Verwendung der geometrischen Kalibrierwerte, dem Querneigungswert (Überhöhung) und der Spurweite die Gleislage im Vergleich zu Solltrassierung berechnet. Kurze Stop-and-Go-Intervalle, Umsetzen der Totalstation am Stativ sowie deren Stationierung und die Montage/Demontage der Prismenadapter auf den GVP sind zeitaufwendige Prozesse.

Aus diesem Grund wurde durch die Trimble Railway GmbH in Zusammenarbeit mit der RSRG das eingesetzte Gleismesssystem GEDO IMS für die schnellere Durchführung dieses Prozesses optimiert. Neben softwaretechnischen Anpassungen wurde auch Spezialzubehör zur Steigerung der Produktivität entwickelt und gefertigt.

Zunächst wird die Totalstation auf dem Gleismesswagen montiert, und zwar in einer starren Konfiguration, sodass keine Horizontierung erforderlich ist. An den GVP werden Spezialadapter montiert, welche Prismen aufweisen,

die Visuren aus zwei Richtungen ohne Notwendigkeit einer Neuausrichtung zulassen. Das Verfahren sieht Stop-Positionen vor, an denen mithilfe der Totalstation die Position mittels mehrfach überbestimmter freier Stationierung gemessen wird (Abb. 4). Nach einer Lernphase an der Startposition des zu messenden Gesamtabschnittes erfolgen alle weiteren freien Stationierungen vollautomatisch ohne Bedieneringriff. Die hinterlegte Solltrassierung, der zurückgelegte Weg, welcher mittels Odometer (Messrad) des Gleismesswagens gemessen wird, die gemessene Querneigung sowie die Kalibrierdaten der Totalstation am Wagen dienen der Vorbereitung einer hinreichend genauen Näherungsposition und -orientierung für jede einzelne Stop-Position. Die dreidimensionalen Koordinaten dieser Stop-Positionen werden anhand der automatisch gemessenen Winkel und Strecken zu 6 bis 8 GVP exakt berechnet. Zwischen diesen einzelnen Positionen wird mittels IMU die dreidimensionale Trajektorie gemessen.

Im Auswerteprozess werden die einzelnen Trajektorien auf die ausgeglichenen Koordinaten der Stop-Positionen transformiert und somit die Istlage des gesamten Gleisabschnittes bestimmt. An den Stationierungen der Schwellen, welche schon für die Qualitätskontrolle am Fertiger in Verwendung waren, werden die einzelnen Istpositionen berechnet. Mithilfe dieser Daten werden die üblichen grafischen und tabellarischen Auswertungen erstellt – Soll-Ist-Tabelle, Pfeilhöhenvergleich etc. (Abb. 5).

Nach Absolvierung von mehreren Tests konnte schließlich dieses Kombinationssystem aus Totalstation und IMU in Betrieb genommen werden. Dazu wurden zunächst einzelne Abschnitte, welche bereits mit der herkömmlichen Methode dokumentiert wurden, gemessen. Auf den offenen Strecken wurden Abschnitte mit ca. 1 km Länge mittels der Spezialadapter signalisiert und dann in einem Zug zunächst das erste Richtungsgleis in einer Richtung und unmittelbar danach das zweite Richtungsgleis in entgegengesetzter Richtung aufgenommen. Die unmittelbar darauf erzeugten Ergebnisse konnten direkt mit den Daten der herkömmlichen Messung verglichen werden und zeigten Übereinstimmung von unter 1 mm (Abb. 6).

Erfahrungen und Ausblick

Der Bau einer FF entwickelt sich immer mehr zu einer industriellen Produktion. Für so einen Prozess sind laufende Qualitätskontrollen unerlässlich, um auftretende Abweichungen frühzeitig erkennen zu können. Die frühzeitige Erkennung von Abweichungen ermöglicht erwiesenermaßen wesentlich kostengünstigere Korrekturmaßnahmen als zu einem späteren Zeitpunkt.

Aus diesem Grund stellt die messtechnische Kontrolle der inneren Geometrie des Gleises einer FF unmittelbar während des Betonierungsvorganges eine fortschrittliche Maßnahme dar, welche potenzielle Folgekosten von zu spät erkannten Abweichungen stark reduzieren kann. Der Einsatz einer IMU für so eine Aufgabe ist

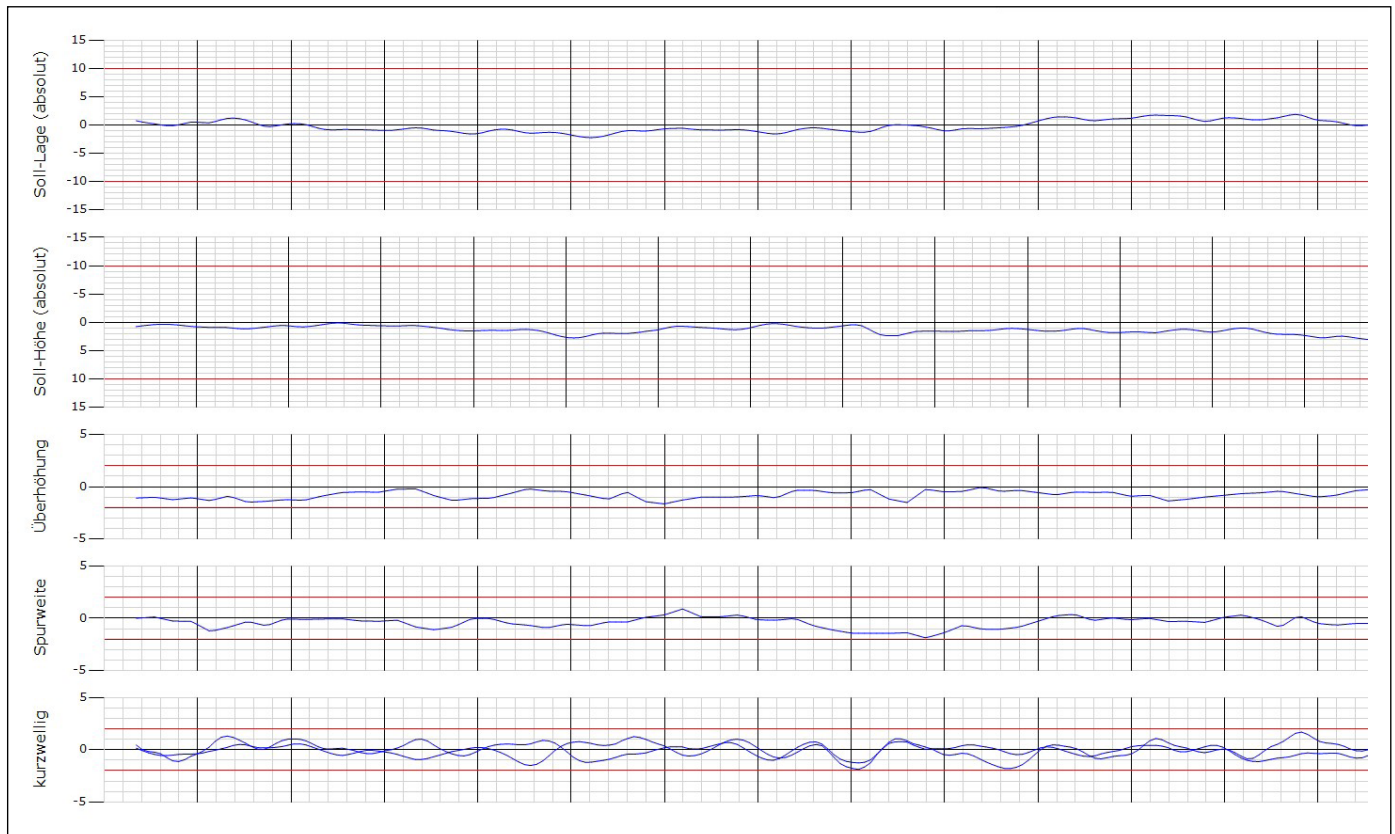


Abb. 5: Ergebnis der Schlussdokumentation in Form einer grafischen Darstellung

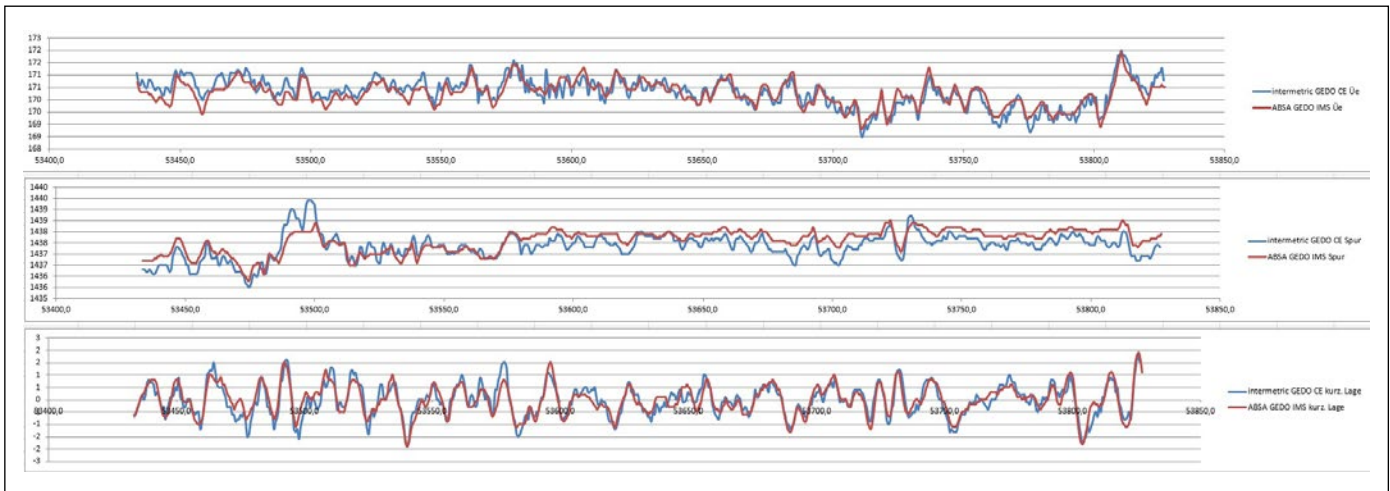


Abb. 6: Vergleich der IMU-Messergebnisse mit jenen einer herkömmlichen Messung mit Stop an jeder Schwelle

aufgrund der aktuellen technischen Möglichkeiten ein logischer Schritt. Bei der Umsetzung dieser Idee bewies diese Technologie, dass sie in hohem Maße geeignet ist, eine derartige Messaufgabe zu übernehmen. Schwierigkeiten bei der Umsetzung zeigten sich auch eher in trivialen Randbedingungen. Schienenstöße wiesen Lücken auf, welche im ersten Ansatz für den Gleismesswagen nicht überfahrbar waren. Dies wurde durch verschiedene mechanische Maßnahmen – zusätzliche Stützräder, Zusatzgewichte, Blechbrücken – überwunden. Das Personal auf dem Betonfertiger war behutsam mit den einfachen, aber neuen Aufgaben vertraut zu machen. Schließlich war die Aufrechterhaltung einer Internetverbindung vor allem in den Tunnelabschnitten eine notwendige Zusatzmaßnahme, obwohl diese Bedingung nicht unbedingt entscheidend für die generelle Funktionstauglichkeit des Systems ist.

Die Schlusskontrolle eines Bauwerkes, insbesondere eines Hochgeschwindigkeitsgleises, stellt eine Standardmaßnahme vor Übergabe dar. Mit der verfügbaren, modifizierten und dann eingesetzten Technologie kann dieser

Aufwand bei gleichwertigen Ergebnissen wesentlich reduziert werden.

Beide Messsysteme für die Qualitätsprüfung werden daher auf zukünftigen Projekten, an denen die RSRG beteiligt ist, eingesetzt werden. ■

QUELLEN

- [1] Ril 883.2000, DB-REF Festpunktfeld (gültig ab 15.11.2020), DB Netz AG
- [2] Ril 883.4000, Geodätische Fahrbahnvermessung: Fahrbahnen mit $V_e > 230 \text{ km/h}$ (gültig ab 01.05.2021), DB Netz AG
- [3] Ril 883.4500 Geodätische Fahrbahnvermessung: Feste Fahrbahn (gültig ab 01.05.2021), DB Netz AG
- [4] NBS Wendlingen – Ulm, Technische Vorbemerkungen zur Ausschreibung Oberbau&Kabeltiefbau Bereich Wendlingen – Ulm (Strecke 4813), DB International GmbH, Version vom 20.05.2016



**Dipl.-Ing. Dr. nat. techn.
Helge Grafinger**

Projektleiter Produkte & Innovation
Rhombeg Sersa Rail Group, AT-Villach
helge.grafinger@rsrg.com



Dipl.-Ing. Lisa-Maria Riedel

Vermessungsingenieurin
Rhombeg Bahntechnik GmbH,
AT-Bregenz
lisa-maria.riedel@rsrg.com



Dipl.-Päd. Uwe Döring

Vermessungskordinator
Rhombeg Bahntechnik GmbH, Essen
uwe.doering@rsrg.com



28. Internationale Ausstellung
Fahrwegtechnik



**Liebe Aussteller, denken Sie an Ihren
Eintrag im offiziellen Messekatalog!**

Weitere Informationen: Sarah Wendt • 040 237 14 303 • sarah.wendt@dvvmedia.com

**31. Mai – 02. Juni 2022
in Münster**

