

# Präzise Gleisvermessung mit einem inertialen Mess- und Navigationsmesssystem

Prüfung nach EN 13848-3 eines inertialen Mess- und Navigationsmesssystems als Abnahmemesssystem auf der Universalstopfmaschine 4.0 der Fa. System7

**BERNHARD LICHTBERGER | PAUL MITTERMAYR | CHRISTOPH KUTTELWASCHER**

In die Universalstopfmaschine 4.0 der Fa. System7 wurde ein inertiales Gleisgeometrie-Abnahmesystem integriert. Auf Gleisen der Österreichischen Bundesbahnen AG (ÖBB) wurde eine geeignete Prüfstrecke mit Anforderungen an vorgeschriebene Geometrieelemente und Mindestangaben für Standardabweichungen der Längshöhe und Richtung ausgewählt. ÖBB-Fachkräfte begleiteten die Messkampagne. Unabhängige Gutachter überprüften die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messfahrten. Die gemessenen Wegdifferenzen der verschiedenen Prüffahrten wiesen kaum Drift auf, die Summenverteilung aller Messungen sowie die Vergleiche der Messfahrten mit gedrehter Maschine hielten deutlich die Grenzwerte ein. Die Tauglichkeit des auf der Universalstopfmaschine 4.0 installierten inertialen Mess- und Navigationsmesssystems für Abnahmemessungen konnte nachgewiesen werden.

## Anforderungen an Abnahmemesssysteme

Alle Bau- oder Instandhaltungsarbeiten im Gleis sind nach Fertigstellung auf Konformität zu den vertraglichen Vereinbarungen (Ausführungsqualität und Ausführungsquantität) zu überprüfen. Europäische Grundlage für solche Abnahmemessungen bei Oberbauarbeiten bildet die ÖNORM EN 13231-1 [2]. Der Umfang der Prüfungen richtet sich nach der Art der durchgeführten Arbeiten.

Da die meisten Oberbauarbeiten die Gleislage unmittelbar beeinflussen, werden vor einer

Gleisfreigabe für den Regelbetrieb Gleisgeometriemessungen zum Nachweis der Gleislage durchgeführt. Die erzielte Qualität der Gleislagegeometrie ist mit Gleismessfahrzeugen oder mit Gleisbau- und Instandhaltungsmaschinen nachzuweisen. Voraussetzung dafür ist für Gleismessfahrzeuge die Konformität zu den Vorgaben der ÖNORM EN 13848-2 [3], für Gleisbau- und Instandhaltungsmaschinen die Konformität zur ÖNORM EN 13848-3 [4]. Heute übliche Stopfmaschinen erfüllen diese Vorgaben. Damit sind sie für Abnahmemessungen im Zuge der Gleisbauarbeiten geeignet.

Bei der Abnahme von Stopfarbeiten wird zwischen vorläufiger und endgültiger Abnahme unterschieden. Vorläufig abgenommen wird ein Gleis unmittelbar nach Beendigung der Arbeiten zur Aufnahme des Betriebes bis zur endgültigen Abnahme. Die endgültige Abnahme erfolgt innerhalb eines vom Auftraggeber definierten Zeitraums, der sich nach der Art der durchgeführten Arbeit richtet. Für die endgültige Abnahme von Erneuerungs- und Neubauarbeiten ist bei der ÖBB eine zusätzliche Nachmessung mit qualifizierten Messsystemen erforderlich.

Zur Abnahme der Gleisgeometrie werden in Österreich folgende Messparameter erfasst und überprüft: Richtung, Längshöhe, Überhöhung, Verwindung, Spurweite und Absolutdaten. Die Einhaltung der Grenzwerte gem. ÖBB-Regelwerk 07.07 [5] gewährleistet eine sichere Gleislage und eine hohe Gleislagequalität. Die Präzision der Messung ist von entscheidender Bedeutung für Sicherheit und Komfort des Bahnverkehrs und Nachhaltigkeit der Gleislage. Schienengebundene Gleisbaumaschinen benötigen in Österreich eine technische Einsatzgenehmigung, der die Kriterien der ÖNORM EN 14033-2 [6] zugrunde liegen. Zusätzlich

müssen Gleisbau- und Instandhaltungsmaschinen mit inkludierten Gleisgeometriemesssystemen die in der ÖNORM EN 13848-3 angeführten Genauigkeitsanforderungen erfüllen. Um verlässliche Messergebnisse über eine vollständige Bausaison zu gewährleisten, werden seitens der ÖBB jährliche Wiederholbarkeitsmessungen zu jeder eingesetzten Stopfmaschine gefordert und kontrolliert. Im Falle unzulässiger Abweichungen sind Nachkalibrierungen nötig oder ggf. die Messsysteme umzurüsten.

Die Fa. System7 railsupport GmbH entwickelte eine neue Universalstopfmaschine. Eine der realisierten Innovationen in dieser Universalstopfmaschine bestand in der Entwicklung eines Abnahmegleismesssystems mit inertialem Mess- und Navigationsmesssystem.

Die Überprüfung von inertialen Gleisgeometriemesssystemen auf Instandhaltungsmaschinen stellt eine nationale und internationale Novität dar. Um die Transparenz der Beurteilung zu gewährleisten, beauftragt die ÖBB international erfahrene Gutachter auf dem Gebiet der Inertialmessung.

## Anforderungen an das Messgleis und die Durchführung

Grundlage für die Durchführung der laut Norm erforderlichen Messfahrten ist ein Messgleis, das die geometrischen Anforderungen erfüllt (Tab. 1). Die nach aktuell geltender ÖNORM EN 13848-3 relativ hohen Standardabweichungen sind in modernen Gleisinfrastrukturen bei gleichzeitig sehr gutem Oberbauzustand (Schienen, Schwellen, Befestigungen, ...) schwer zu finden.

Die betriebliche Durchführung von Messfahrten stellt für den Infrastrukturbetreiber eine Herausforderung dar, da bei teilweise sehr geringen Fahrgeschwindigkeiten (1 km/h) Gleislängen von mindestens 500 m mehrfach befahren werden müssen. Um unnötig lange Sperrzeiten zu vermeiden, sollte sich außerdem eine Wendemöglichkeit in unmittelbarer Umgebung befinden. Im Gleisnetz der ÖBB konnte nach aufwendiger Recherche ein geeigneter Gleisabschnitt im Raum Linz zur Durchführung der Messungen ermittelt werden (Abb. 1).

Vor Stopfeinsätzen werden die geometrischen Gleislage-Korrekturdaten vom Infrastrukturbetreiber ermittelt. Diese ergeben sich aus dem Vergleich der Ist-Gleisgeometrie mit der Soll-

Bezeichnung	Forderungen
Gerade	Im Messabschnitt vorhanden
Linksbogen	Radius $\leq 1.500$ m
Rechtsbogen	Radius $\leq 1.500$ m
Übergangsabschnitte	Im Messabschnitt vorhanden
Überhöhung	$\geq 70$ mm
Längshöhe	Standardabweichung $\geq 2,0$ mm
Richtung	Standardabweichung $\geq 1,2$ mm

Tab. 1: Anforderungen an das Messgleis gem. ÖNORM EN 13848-3

Gleisgeometrie. Dieser Prozess wird als Vormessung bezeichnet. Bei der ÖBB ist iGleisgeometrie die zentrale Datenbank (Soll-Geometriedaten, Bezugspunkte, Nachmessdokumentationen, ...). Diese stellt die von unterschiedlichen Messsystemen und Gleisbaumaschinen erzeugten Messdaten den Soll-Werten gegenüber. Alle Elemente der Linienführung werden so zentral auf Normenkonformität überprüft. Erst dann erfolgt die digitale Übergabe der Korrekturdaten an die Stopfmaschinen zur Herstellung der vorgegebenen Gleisgeometrie. Auch die Nachmessdaten der Stopfmaschinen werden digital an die Gleisdatenbank iGleisgeometrie übergeben. Nach einer Qualitätsüberprüfung durch Fachkräfte der ÖBB erfolgt die endgültige Abnahme. Alle Stopfeinsätze und deren Qualität (ggf. Abweichungen zu den Soll-Daten) werden so in Österreich zentral erfasst und dokumentiert.

**Inertiales Mess- und Navigationsmesssystem**

Die heute weit verbreitete Messtechnik bei Instandhaltungsmaschinen verwendet physikalische Pendel zur Messung der Überhöhung und Sehnennesssysteme zur Aufzeichnung der Richtung (Pfeilhöhe) und Höhe (Längshöhe). Dabei wird eine Sehne, zumeist mit 10 m Länge und einer Teilung 5 m zu 5 m oder auch



Abb. 1: Gewählter Gleisabschnitt (roter Kreis) und Wendemöglichkeit (grünes Dreieck)  
Quelle Kartenhintergrund: OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA

4 m zu 6 m zwischen zwei von der Maschine im Gleis geführten Spannwagen eingesetzt. Bei der gewählten Teilung der Sehne wird ein dritter Wagen geführt, der meist mit Messgebern auf Potenziometerbasis die Lage einer Mittelsehne abtastet. Die Höhenlage beider Schienen wird aus der Längshöhe der Mittelsehne und den gemessenen Überhöhungen errechnet. Mit der Pfeilhöhenformel

$$f = \frac{a \cdot b}{2R}$$

kann der Abstand der Sehne im Bogen zur Schiene berechnet werden. Es bedeuten:  
a – kurzer Sehnensegment  
b – langer Sehnensegment  
R – Gleisbogenradius  
f – Pfeilhöhe



**DIE ZUKUNFT DES STOPFENS – HEUTE SCHON REALITÄT**

Die Universalstopfmaschine Universal Tamper 4.0 von System 7



Unerreichte Stopfqualität und Dauerhaftigkeit der Gleislage durch unabhängig geregelte vollhydraulische Stopfantriebe und S7-Automatikstopfen



NEU: Schotterbettabnahmeschrieb und automatischer Analysereport



NEU: Fälschungssichere digitale Übermittlung der Abnahmedaten



Web-Plattform RaVeM für trendbasiertes Condition Monitoring und Web-Plattform INFrame für Speicherung/ Analyse der Gleiseigenschaften

www.s7-railsupport.com

office@s7-rt.com

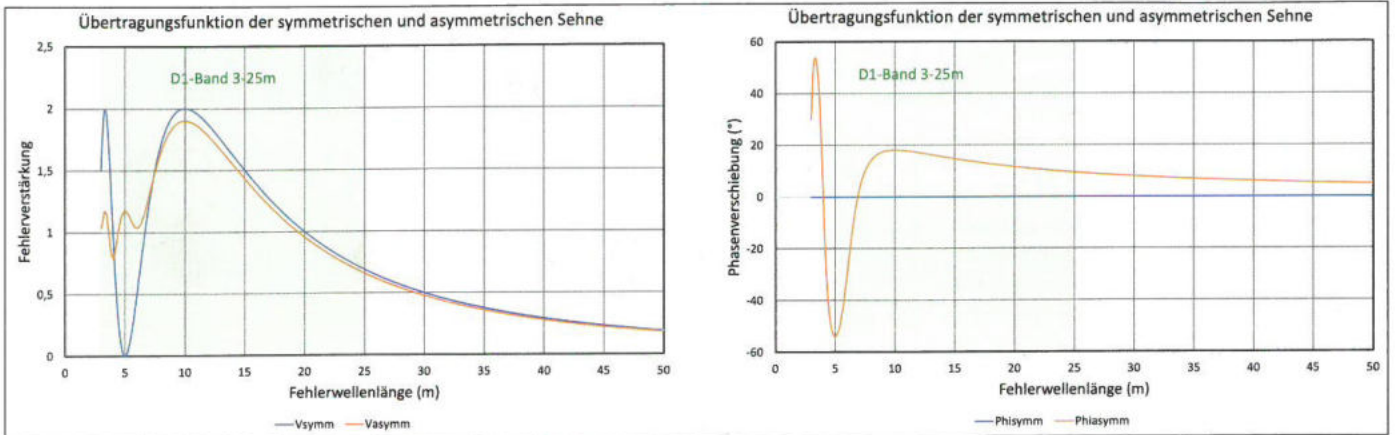


Abb. 2: Übertragungsfunktionen einer symmetrischen 5/5 m- und einer asymmetrischen 4/6 m-Sehne

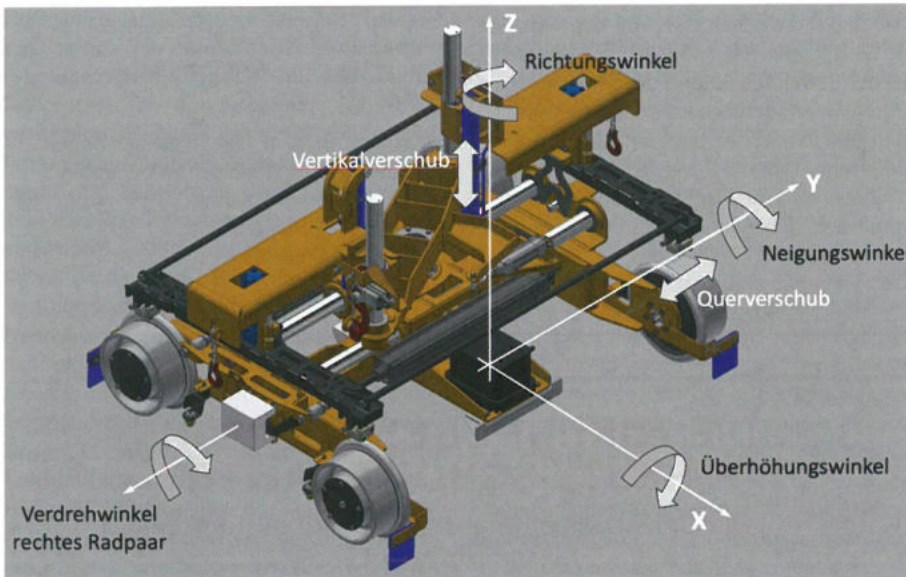


Abb. 3: Schematische Darstellung des IMU-Messwagens mit Angabe der Freiheitsgrade und der Koordinatenachsen

den Gleissollgeometrie und Korrekturwerte zur Führung der Stopfmaschine ermittelt. Die Messgeschwindigkeit mit physikalischen Pendeln für eine ausreichende Genauigkeit liegt bei etwa 3 km/h.

Sehnenmessungen verzerren abhängig von der Wellenlänge des Gleisfehlers die Aufzeichnung nachteilig. Dieses Systemverhalten beschreiben Übertragungsfunktionen.

Die Übertragungsfunktionen in Abb. 2 zeigen links die Verstärkung und rechts die Phasenverschiebung einer symmetrischen (blaue Linie) und einer asymmetrischen (orange Linie) Sehne. Symmetrische Sehnen weisen keine Phasenverschiebung der gemessenen Fehlerwellenlänge auf. Andererseits haben sie Nullstellen (z.B. bei 5 m) und eine maximale Fehlerverstärkung von zwei. Sehnenmesssysteme zeichnen Gleisfehler auf, die in Größe (Verstärkung), Form und örtlicher Lage (Phase) verformt sind. Abnahmerelevant für Instandhaltungsarbeiten sind Fehlerwellenlängen im Bereich von 3-25 m (D1-Band).

Mit dem inertialen Mess- und Navigationssystem der Fa. System7 sind Messgeschwindigkeiten bis 30 km/h möglich. Inertialmesssysteme erfassen Gleislagefehler im interessierenden Wellenlängenbereich großen- und formrichtig. Ein inertiales Mess- und Navigationssystem oder auch IMU-Messsystem (inertiale Messeinheit, IMU) besteht aus drei faseroptischen Gyros (FOG) und drei Präzisionsneigungsmessern. Während einer kurzen Initialisierungsphase (2-3 Minuten) bestimmt das System die Lage der Schwerachse (z-Achse) und durch Messung der Bewegung der Gyros mit der Erde die Nordrichtung (x-Achse). Die dritte Achse (y-Achse) wird orthogonal zu den beiden anderen Achsen gewählt. Bei kurzen Stillständen (10 Sekunden) der Maschinen kalibriert das System automatisch. Die Beschleunigungsaufnehmer im Zusammenwirken mit der IMU erlauben die Angabe absoluter Raumwinkel. Die Angabe des Richtungswinkels (die Himmelsrichtung) ist für Eisenbahnfahrzeuge nicht weiter relevant, weil diese spurgebunden sind.

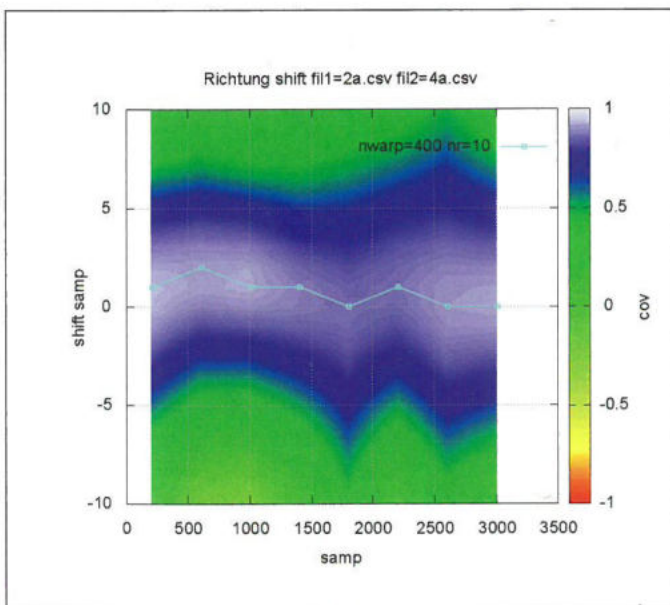


Abb. 4: Optimaler Shift (linke Skala) zur Maximierung der Kovarianz (rechte Skala) zweier Messfahrten am Beispiel Richtung

Die Sehnenmesssysteme bewähren sich in der Praxis, weisen aber Nachteile auf. Die Messung der Überhöhung mit einem physikalischen Pendel limitiert die Messgeschwindigkeit. Die auftretenden Fliehkräfte lenken das Pendel aus und verfälschen das Ergebnis. In vielen Ländern ist die Lage der exakten Gleis- und Übergangsbögen nicht exakt bekannt. Dort wird vor der Arbeit die Gleislage mit den vorhandenen Maschinenmesssystemen erfasst und daraus wer-

Das gemessene Winkelbild wird gefiltert und daraus wird durch einfache Integration über die Bogenlänge die Raumkurve des Gleises errechnet. Die Projektion dieser Raumkurve auf die xy-Ebene ergibt den Grundriss („Landkartenansicht“) und die Projektion auf die yz-Ebene den Höhenverlauf in Gleislängsrichtung. Die bei der Bahn üblichen auf Sehen bezogenen Pfeilhöhen und Längshöhen werden rechnerisch aus dem Grundrissbild und dem Höhenbild ermittelt. Für eine Bestimmung der realen unverzerrten Gleisfehler in einem bestimmten Wellenlängenbereich (D1-Band oder D2-Band von 25-70 m) werden die Messdaten entsprechend gefiltert.

Die Gleisgeometrieparameter werden mit zwei Radpaaren abgetastet (Abb. 3). Das linke Radpaar ist fest mit dem Wagenrahmen verbunden, das rechte Radpaar ist verdrehbar ausgeführt. Ein hochauflösender Absolut Encoder erfasst den Verdrehwinkel. Damit kann sich der Wagen frei an die Gleisverwindung anpassen. Das Navigationssystem sitzt mittig auf einer Konsole, die mit dem Wagen verbunden ist. Damit der IMU-Messwagen dem Gleis zwangsfrei folgen kann, muss er fünf Freiheitsgrade aufweisen. Dies sind drei Rotations- und zwei Verschiebungs-

freiheitsgrade. Den Rotationsfreiheitsgraden entsprechen Richtungswinkel, Neigungswinkel und Überhöhungswinkel. Die Verschiebungsfreiheitsgrade entsprechen dem Vertikalhub und dem Querverschub des Messwagens. Die Rotationen werden durch ein Kugelgelenk ermöglicht, die Verschiebungen durch einen horizontalen Linearschlitten und vertikal über Führungssäulen. Damit die Räder des Messwagens präzise an der bogenäußeren Schiene geführt werden, wird dieser über Pneumatikzylinder angepresst. Damit andererseits der Messwagen nicht entgleist, pressen gleichzeitig Vertikalzylinder nach unten. Für eine einwandfreie Funktion müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

1. Die Durchschubbedingung

$$F_H \geq \mu \cdot Q = \mu \cdot m \cdot g$$

(die Querverschiebekraft muss größer als die Reibungskraft sein) und andererseits

2. die Entgleisungssicherheitsbedingung

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_{lim} = \left(\frac{F_V}{\mu \cdot m \cdot g}\right)_{lim} \leq 1,2$$

(die Vertikalkraft muss die Räder am Aufklettern hindern).

Y – Querkraft

Q – Radaufstandskraft

μ – Reibungskoeffizient Rad-Schiene

m – Wagenmasse

g – Erdbeschleunigung

F<sub>V</sub> – Vertikalkraft

F<sub>H</sub> – Horizontalkraft

Für eine sichere und präzise Führung im Gleis sind Querkraftzylinder und Vertikalzylinder getrennt ausgeführt. Dies garantiert die Einhaltung der oben genannten Bedingungen auch unter variierenden Reibungsverhältnissen.

#### Nachweis der Einhaltung der Anforderungen nach EN 13848-3 des IMU-Messsystems

Die Beurteilung der Messsysteme für Gleisbau- und Instandhaltungsmaschinen ist in ÖNORM EN 13848-3 [4] beschrieben.

Zentrale Begriffe sind die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Gleisparameter. Der Grad der Übereinstimmung zweier aufeinander folgenden Messungen desselben Parameters unter gleichen Bedingungen (Geschwindigkeit, Messrichtung, Orientierung und Umgebungsbedingun-

## BAHNBAU WELS

### HÖCHSTE PRÄZISION IM GLEISBAU

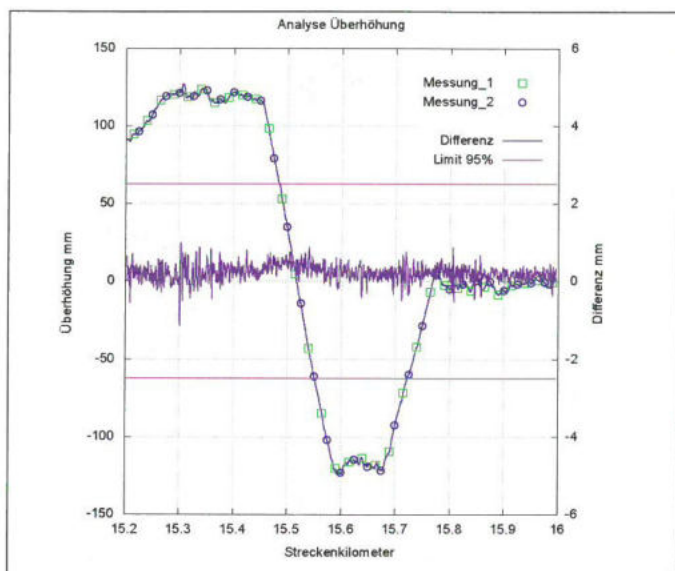
Ihr Projekt ist bei uns in guten Händen. Ein moderner Maschinenpark sowie jahrzehntelanges Know-how gewährleisten die optimale und effiziente Umsetzung Ihres Bauvorhabens. Sei es im maschinellen oder im gewerblichen Gleisbau sowie im Fahrleitungsbau - lassen Sie mehr als 70 Jahre Erfahrung für sich arbeiten.

www.bbww.at

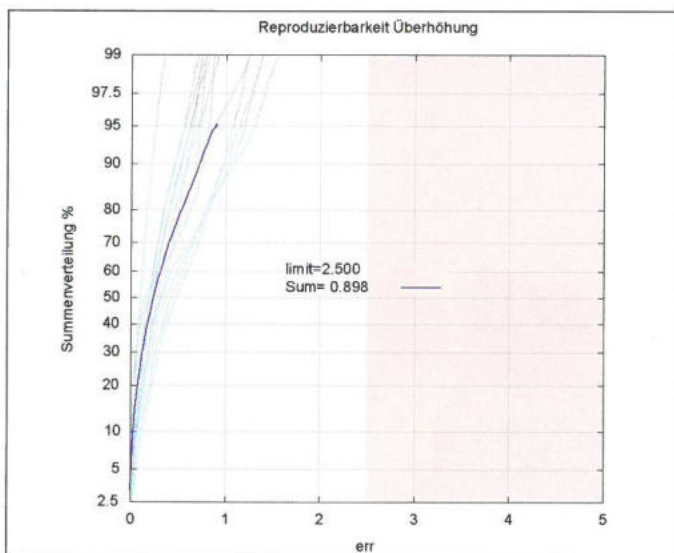
**bbww**  
BAHNBAU WELS

**RHOMBERG SERSA**  
RAIL GROUP





**Abb. 5:** Analyse der Abweichungen (rechte Skala in mm) am Beispiel der Überhöhung (linke Skala in mm); die roten Linien markieren die 95%-Perzentilwerte der Reproduzierbarkeit der Überhöhung.



**Abb. 6:** Summenverteilung in % der Messfahrtdifferenzen zur Prüfung der Reproduzierbarkeit der Überhöhung

gen) im selben Gleisabschnitt wird als Wiederholbarkeit bezeichnet. Bei Variation der zuvor genannten Bedingungen spricht man von Reproduzierbarkeit. In der Norm sind für die beiden Vergleichsszenarien unterschiedliche Grenzwerte im Anhang C angegeben. Zu prüfende Parameter sind Längshöhe, Richtung, Spurweite, Überhöhung

und Fahrtrichtung und Fahrzeugorientierung. In Tab. 3 der Norm werden die erforderlichen Vergleiche unterschiedlich nach Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit definiert. Die zusätzlichen Anforderungen an das Testgleis sind ebenfalls festgehalten. Die statistische Analyse von je zwei Messfahrten beruht auf der Verteilung der Differenzen. Vor-

und Verwindung. Die Gleisgeometriemessungen sollen auf einem belasteten Gleis durchgeführt werden. Diese Forderung hat sich aus dem Einsatz von Gleismessfahrzeugen ergeben; früher wurden Handmessgeräte verwendet. Durch diesen Paradigmenwechsel wird nun auch die Gleissteifigkeit – wenn auch nicht gemessen – als ein nicht zu vernachlässigender Faktor für die Gleislagequalität (siehe [7]) angesehen.

Nach der Kalibrierung ist eine Validierung in Form von Vergleichen verschiedener Messfahrten auf demselben Gleisabschnitt durchzuführen. In EN 13484-3, Abschnitt 6, werden die Anforderungen an die notwendigen Prüffahrten des Feldversuchs beschrieben. Da es sich um keine speziellen Gleisgeometriemesswagen handelt, ist im Vergleich zur EN 13484-2 eine geringere Anzahl Prüffahrten gefordert. Die Tab. 2 der Norm beschreibt die erforderlichen Prüffahrten mit Mindest- und Höchstgeschwindigkeit.

aussetzung hierfür ist eine präzise Synchronisation der aufgezeichneten Signale. Die Abtastung erfolgt in wegababhängigen gleichen Intervallen von nicht mehr als 0,5 m. Durch den Schlupf bedingt kann es zu Differenzen in der Stationierung kommen. In pr EN 13484-3:2020 wird die Synchronisierung als erforderlich beschrieben und vorgeschlagen, die Drift in kurzen Streckenabschnitten von z. B. 200 m durch Signalverschiebung auszugleichen. Dabei soll die Methode der Kreuzkorrelation verwendet werden. Eine andere interessante Methode das Dynamic Time Warping ist in [8] beschrieben. Bei sorgfältiger Messdurchführung, konstanter Geschwindigkeit und den im Vergleich zu speziellen Gleisgeometriemesswagen kurzen Messlängen sind diese Effekte zwar gering, aber nicht vernachlässigbar. Abb. 4 zeigt den notwendigen Wegversatz über den einzelnen Samples der Messungen.

Im nächsten Schritt wird eine Summenverteilung der Absolutbeträge der gleichen Parameter zweier Messfahrten berechnet (Abb. 5). Die Differenzen weisen kaum Drift auf und bleiben deutlich unter den Grenzwerten. Zur Bewertung wird der 95. Perzentilwert herangezogen. Dies ist am besten durch die Darstellung der Summenverteilung in einem Wahrscheinlichkeitsnetz sichtbar. Dabei wird auf der Abszisse die Quantile der Verteilung äquidistant und werden auf der Ordinate die zugeordneten Funktionswerte aufgetragen. Im Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung erscheint eine standardnormalverteilte Zufallsvariable als Gerade. Die Abb. 6 zeigt, dass nicht nur die Summenverteilung aller Messungen, sondern auch die Vergleiche der Messungen bei gedrehter Maschine deutlich unter dem Grenzwert liegen. Damit ist der Nachweis der Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzen für das geprüfte nordbasierte Abnahmemesssystem gegeben.

**QUELLEN**

- [1] ÖBB-Regelwerk 07.04 Vermessung von Gleisen und Weichen
- [2] ÖNORM EN 13231-1 Bahnanwendungen - Oberbau - Abnahme von Arbeiten - Teil 1: Arbeiten im Schotteroberbau - Gleise, Weichen und Kreuzungen
- [3] ÖNORM EN 13484-2 Bahnanwendungen - Oberbau - Geometrische Gleislagegüte - Teil 2: Messsysteme - Gleismessfahrzeuge
- [4] ÖNORM EN 13484-3 Bahnanwendungen - Oberbau - Gleislagequalität - Teil 3: Messsysteme - Gleisbau- und Instandhaltungsmaschinen
- [5] ÖBB-Regelwerk 07.07 Abnahme von Oberbauarbeiten
- [6] ÖNORM EN 14033-2 Bahnanwendungen - Oberbau - Schienengebundene Bau- und Instandhaltungsmaschinen - Teil 2: Technische Anforderungen an die Versetzfahrt und die Arbeitsstellung
- [7] Presle, G.; Hanreich, W.; Mittermayr, P.: The Austrian track testing and recording car EM250: A source for wheel/rail interaction analysis, TRB 2000
- [8] Xu, P.; Liu, R.-K.; Sun, Q.-X.; Jiang, L.: Dynamic-Time-Warping-Based Measurement Data Alignment Model for Condition-Based Railroad Track Maintenance, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 16(2), April 2015



**Dipl.-Ing. Christoph Kuttelwascher**  
Gleisbautechniker  
ÖBB Infrastruktur AG, AT-Wien  
christoph.kuttelwascher@oebb.at



**Dr. Paul Mittermayr**  
Geschäftsführer  
Dr. Mittermayr Scientific GmbH  
& Co. KG, AT-Wien  
paul.mittermayr@bamm.at



**Univ.-Doz. Dr. techn. Bernhard Lichtberger**  
Technischer Direktor  
System7 railsupport GmbH, AT-Wien  
bernhard.lichtberger@s7-rs.com