

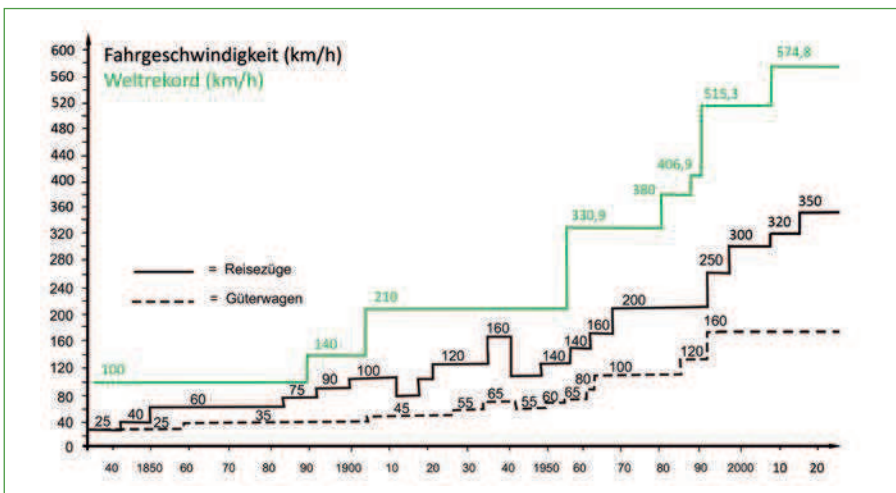
# Automatische Analyse und Ursachenangabe von Gleisgeometriefehlern

Bernhard Lichtberger

Mit dem vollhydraulischen Stopfantrieb werden Schotterbetteigenschaften erfasst. Durch Analyse der Schotterbettdaten und der Gleisgeometriedaten vor und nach der Stopfung werden die Ursachen der Gleisfehler, die Lokalisierung der Ursachen: Interaktion Schwelle-Schotter, Schotterdefekte, Probleme der Zwischenschicht Schotter und Planum sowie Tragfähigkeitsprobleme automatisch ausgewertet. Zur Anwendung kommen die Wavelet- und die Fraktalanalyse gestützt auf statistische Daten einer Vielzahl von Stopfeinsätzen.

## 1 Allgemeines

Der derzeit bestehende Weltrekord für Schienenfahrzeuge steht bei 574,8 km/h und wurde mit einem Zug der SNCF auf Schotterfahrbahn aufgestellt. Grundsätzlich gilt die Daumenregel: Weltrekord minus 200 km/h entspricht sicheren möglichen



**Abb. 1:** Chronologische Entwicklung der Fahrgeschwindigkeiten von Hochgeschwindigkeitszügen, Güterzügen und Weltrekorden

Quelle: B. Lichtberger [1]

Betriebsgeschwindigkeiten. Neue Hochgeschwindigkeitsstrecken werden mit einer Streckengeschwindigkeit von  $\geq 350$  km/h entworfen und gebaut. Die Abb. 1 zeigt die chronologische Entwicklung der Fahrgeschwindigkeiten von Personenzügen, Güterzügen und die Entwicklung der Weltrekorde.

Die Europäische Kommission gibt in der EU-Richtlinie 2011/275/EU [3] für alle neuen Strecken der europäischen Güterverkehrskorridore 25 t Achslast als Designkriterium vor. Der Vorteil ist die höhere Nutzlast der Waggons, die reduzierte Anzahl benötigter Wagen und die Steigerung der Transportleistung. Nachteilig sind die höheren Investitionskosten in die Infrastruktur und die höhere Belastung des Gleises.

Einerseits steigen die Fahrgeschwindigkeiten, und andererseits werden die Achslasten erhöht. Die Strategie der Europäischen Union, Verkehr von der Straße auf die umweltfreundliche und nachhaltige Eisenbahn zu verlagern, erhöht die Ansprüche der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Strecken. Instandhaltungsarbeiten sind betriebsbehindernd und werden immer weiter beschnitten, bzw. es wird nach Methoden gesucht, die nachhaltig die Gleislage verbessern und dies in kürzerer zur Verfügung stehender Zeit.

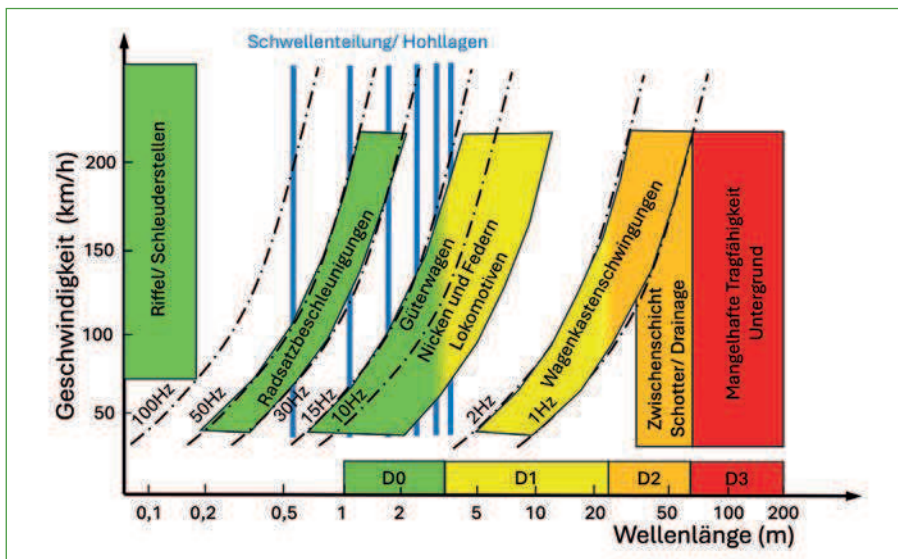
Inspektionen der Infrastruktur werden mit Gleismesswagen, Begehung oder mit mobilen Messgeräten durchgeführt. Sensorik, die auf Schienenfahrzeugen aufgebaut ist, erlaubt das Zustandsmonitoring der Funktionen Antrieb, Versorgung, Elektronik. Stationär aufgebaute Sensoren im Gleis überwachen die Fahrzeuge (Radunrundheiten, Radprofil, Achslasten, Asymmetrie der Beladung) oder sich selbst (Weichenantriebe). Messsysteme, die direkt auf Zügen installiert sind, wie Beschleunigungssensoren auf Achslagern, Drehgestellen oder Wagenkästen, überwachen kontinuierlich die Anlagenqualität [1]. Elektronische Gleismesswagen erfassen keine kurzweiligen Fehler im Bereich von 10 bis 100 cm. Ihr Messbereich überstreicht üblicherweise einen Wellenlängenbereich von 3 bis 100 m. Dies entspricht den international definierten Wellenlängenbändern D1 (3-25 m), D2 (25-70 m) und teilweise D3 (70-150/200 m).

Der wichtigste überwachte Gleisgeometrie-Parameter ist die Längshöhe. Fehler in der Längshöhe bestimmen zu 75 % die geometrischen Gleislagefehler bei der Deutschen Bahn AG [17]. Drei Bereiche sind die wesentlichen Kostentreiber der Lebensdauerkosten eines Gleises: der Rad-Schiene-Verschleiß, der Verfall der Gleisgeometrie in Schottergleisen, Weichen und Kreuzungen [2]. Daraus folgen naturgemäß die Schwerpunkte der Gleisüberwachung. Kostentreiber der Infrastruktur sind Schienepflege, Weichen und Schotter. Die Gleisgeometrie ist nicht der größte Kostentreiber, obwohl sie für die sichere Funktion des Gleisnetzes bedeutend ist.

Grenzwerte für die Ergebnisse von Messwagen beruhen meist auf Standardabweichungen und geben die notwendigen Handlungsschritte vor: Planung, geplante oder sofortige Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen, Einrichtung von

Langsamfahrstellen oder Sperrung des Gleises aus Sicherheitsgründen. Wie für alle sicherheitsrelevanten Parameter notwendig, werden die Gleisgeometriefehler (insbesondere mit kurzen und mittleren Wellenlängen) auf einem ungefährlichen Level gehalten. Die Überwachung der Gleisgeometrie ist von enormer Wichtigkeit, nicht nur wegen der Sicherheit, sondern auch wegen der Instandhaltungskosten. Die Instandhaltungsarbeiten erfolgen heute zustandsorientiert und nicht mehr ausschließlich präventiv. Analyse und Planung von Stopfarbeiten sind ausgereift, Eingriffsschwellen und Auswirkungen des Stopfens sind bestens bekannt, erforscht und organisiert [18]. Es existieren verlässliche europäische Standards wie EN 1231-1 und EN 13848-5.

Die Abb. 2 zeigt Gleisfehler, Schwellenteilungen, Hohllagen, geometrische Abmessungen von Fahrzeugen und Fehlern, wie der Polygonisierung der Räder, als vertikale periodische Anregung im Gleis.



**Abb. 2:** Relevante Wellenlängen der Vertikalgeometrie [7]

Quelle: B. Lichtberger

Diese Frequenzen initiieren entsprechende Längshöhenfehler. Typischerweise liegen im D1-Band (Wellenlängen von 3-25 m) die Achsabstände von zweiachsigen Güterwagen und die Drehzapfenabstände von Personenwagen. In der Praxis werden Fehleramplituden mit diesen Wellenlängen in den Abnahmeschrieben und Messaufzeichnungen von elektronischen Gleismesswagen gefunden. Das D2-Wellenlängenband spielt im Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) eine bedeutende Rolle. Die Anregungsfrequenzen im Bereich um 1 Hz treffen dort mit den typischen

Eigenfrequenzen der Vertikalfederung von HGV-Fahrzeugen zusammen. Riffel und Schleuderstellen erzeugen sehr hohe Frequenzen. Fährt eine ungefederte Masse über verriffeltes Gleis, werden sehr hohe Beschleunigungen erzeugt. Die Beschleunigung nimmt theoretisch quadratisch mit der Frequenz zu, in der Praxis sind die Auswirkungen wegen der gedämpften und gefederten Fahrzeugmassen geringer.

Nach den europäischen Normen werden die typischen Wellenlängenbereiche für die Längshöhe in vier Kategorien eingeteilt. Diesen werden nach Praxiserfahrungen und Messungen Ursachen zugeordnet.

Bezeichnung	Wellenlängenbereich (m)	Beschreibung	Zugeschriebene Ursache
D0	$0,1^1 < \lambda \leq 3 (5)^2$	Kurzwellig	Schienenoberflächenfehler (Riffel, Schleuderstellen), Schwelleninteraktion mit dem Schotter, Schwellenhohllagen, Schienenstöße
D1	$3 < \lambda \leq 25$	Mittelwellig	Schotterverschmutzung, Schotterbeschädigung, Weiße Stellen, Drainageprobleme
D2	$25 < \lambda \leq 70$	Langwellig	Mischzone und Untergrundprobleme, mangelhafte Drainagewirkung
D3	$70 < \lambda \leq 150$	Großwellig	Untergrundprobleme

**Tab. 1:** Wellenlängenbereiche und Zuordnung der Gleiseigenschaften Quelle: Lichtberger

- 1 Die typische Abtastrate von elektronischen Gleismesswagen beträgt 0,25 m. Diese ist für kurze Riffel nicht ausreichend.
- 2 Auf den Schotter aufschlagende Schwellen bilden sich bei 1,2 m und zwischen 3 und 3,6 m bevorzugt (das entspricht dem 2- und 5-6-fachen der üblichen Schwellenteilung von 0,6 m) aus [19].

Tab. 1 zeigt die Einteilung der Wellenlängenbereiche und die Ursachenzuordnung. Der Wellenlängenbereich D0 wird durch elektronische Inspektionsmessfahrten meist nur rudimentär erfasst und ausgewertet. Er wird durch Schwellenhohllagen und Reaktionen zwischen Schwelle und Schotter verursacht. Der Bereich D1 ist der typische Bereich der Stopfberichtigung, in welchem sich durch Wagenkastenbewegungen und Drehgestellbewegungen quasiperiodische Gleisfehler ausprägen. Die dynamischen Lasten, die auf die Schiene einwirken, führen zur Schotterdegradation. Die Folge: Schotterabrieb und Schotterkornbruch. Als Instandhaltungsmaßnahme wird der Schotter gereinigt und der Abraum durch Neuschotter ersetzt. D2 entsteht teilweise in der Mischzone Schotter – Untergrund, beruht aber schwerpunktmäßig auf Untergrundproblemen. Diese sind gekennzeichnet durch nicht ausreichende Tragfähigkeit. Mögliche Ursachen: mangelhafte Drainage, gering tragfähiger anstehender Boden (Lehm, Ton, Torf), ungeeignetes Planumsmaterial oder fehlende bzw. zu schwache Planumsschutzschicht. Der Bereich D3 ist auf die gleichen Untergrund-

probleme zurückzuführen, oftmals sind die großwelligen Längshöhenfehler von Verdrehungsschwankungen begleitet. Kurzwellige Fehler (D0-D1) sind für die Sicherheit des Eisenbahnbetriebes ausschlaggebend. Mittel- und langwellige Gleislagefehler (D2, D3) wirken sich nachteilig bei hohen Geschwindigkeiten aus. Sie sind nicht betriebsgefährdend. Harmonische kurz- und mittelwellige Fehler weisen tendenziell auf Inhomogenitäten des Schotterbettes hin. Nichtharmonische mittel- bis langwellige Fehler zeigen als Ursache den Unterbau / Untergrund an [8].

Wie die Radkräfte von der Fahrgeschwindigkeit und der Wellenlänge sinusförmiger Gleisfehler abhängen, zeigt der folgende Zusammenhang:

$$\Delta Q = m_{RG} \cdot a = m_{RG} \cdot A_0 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot v}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

$m_{RG}$  ... Rad-Gleis-Ersatzmasse (typisch 100 kg)

$\Delta Q$  ... dynamische Kraft durch periodische Gleisfehler (N)

$A_0$  ... Amplitude des Gleisfehlers (m)

$\lambda$  ... Wellenlänge des Gleisfehlers (m)

$a$  ... Vertikale Beschleunigung ( $m/s^2$ )

$v$  ... Geschwindigkeit (m/s)

Die Gleichung zeigt eine Kraftwirkung, bei der die Wellenlänge verkehrt proportional und die Geschwindigkeit direkt proportional quadratisch eingehen. Je kürzer die Wellenlängen sind, umso größer die Kraftwirkung. Deshalb führen kurze Gleisriffele zu enormen Beschleunigungen und Schäden am Oberbau und dem Rad. Der Anteil der Fehleramplitude selbst geht nur linear und direkt proportional in die Gleichung ein.

Da mittlerweile die Fahrzeugreaktionen zunehmend in den Fokus der Betrachtung geraten, gibt es Modelle, die den Zusammenhang zwischen Gleislagefehlern und Fahrzeugreaktionen beschreiben. Die Mehrheit der gängigen Modelle nähert den Zusammenhang zwischen Gleislage und Fahrzeugreaktion als lineare Funktion. Lineare Modelle sind einfacher aufzustellen und zu berechnen. Untersuchungen des europäischen Projektes DynoTRAIN weisen aber auf nichtlineare Zusammenhänge hin. In [7] wird berichtet, dass die seitliche Lageverschlechterung eines Gleises ein nichtlinearer und komplizierter Prozess ist, der bisher kaum verstanden wird. Die seitliche Verformung hängt vom Y/Q-Verhältnis und von der Größe der Führungskräfte ab.

Neuere Ansätze verwenden Waveletfunktionen zur Klassifizierung von typischen Einzelfehlerformen. Simulationen geben zu diesen klassifizierten Fehler-Waveletformen zugehörige Fahrzeugreaktionskräfte an. Der Vorteil: Eine Berechnung der Fahrzeugreaktionen ist nicht mehr notwendig [2].

## 2 Wellenlängen von Längshöhenfehlern und deren Ursachen

### 2.1 Kurzwellige Gleisfehler ( $D_0 < 5$ m)

Wellenlängen im Bereich 0,6-0,7 m stammen von der Schwellenteilung. Fehler der Wellenlänge 0,7-2 m stammen typischerweise von der Interaktion der Drehgestelle mit dem Gleis, Wellenlängen im Bereich von 2-3 m sind auf den Einfluss der Eisenbahnräder zurückzuführen. Der Wellenlängenbereich von 5-10 m auf das Aufschaukeln der Fahrzeugkästen über die Fahrzeugfederung verursacht [17].

Die minimale Länge der Gleislagefehler entspricht der ungleichen Setzung der Einzelstützpunkte. Nach Zimmermann errechnet sie sich abhängig von der Biegesteifigkeit der Schiene und der Gleissteifigkeit zu [11]:

$$\lambda \geq 2 \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{8 \cdot E \cdot I}{C}} \quad (2)$$

E ... Elastizitätskonstante Schienenstahl ( $21 \cdot 10^6$  N/cm<sup>2</sup>)

I ... Trägheitsmoment der Schienen (cm<sup>4</sup>)

C ... Bettungssteifigkeit (N/cm)

$\lambda$  ... Wellenlänge (cm)

Setzt man für eine Schiene 49E1 und eine Gleissteifigkeit C von  $1,1 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{cm}}$  (3) ein, ergibt sich eine minimale Länge von 4,1 m.

Holtzendorff [10] weist auf einen kritischen Wellenlängenbereich zwischen 2,4 und 3,6 m hin. Das entspricht einer 4. bzw. 6. Schwelle ohne Hohllage. Bei diesen Wellenlängen tritt ein maximales Anwachsen der Hohllagen und damit der entsprechenden Fehleramplituden auf.

Unstetigkeiten der Rad-Schiene-Wechselwirkung, wie Schienenstöße, Schienenoberflächenfehler und Schwellenhohllagen, führen zu Einzelfehlern mit hoher dynamischer Zusatzbelastung [8]. Zu Beginn wird der Schotter überbeansprucht, und die Schotterkörner werden zertrümmert. Es treten Kornumlagerungen und Setzungen auf. Typisch dafür sind weiße Stellen, die sich in Fahrrichtung ausdehnen. Wird die Schadensursache nicht beseitigt, kommt es zu einer Überbeanspruchung des Unterbaues mit begleitenden Tragfähigkeitsschäden [8].

Kurzwellige Schienenoberflächenfehler, wie Riffel oder Schlupfwellen, führen zu besonders hohen Beanspruchungen der Fahrzeuge und des Gleises. Punktuellen Instabilitäten wurde in der Vergangenheit bei der Erfassung, Analyse und Vermeidung entsprechend ihrem Schädigungspotenzial zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die frühzeitige Erkennung und die daraus abgeleiteten Maßnahmen sind entscheidend für die Gleisqualität [3] und die Instandhaltungskosten.

Andere Problembereiche sind Unstetigkeitsstellen. Hier ändert sich auf kurze Distanzen in Gleisrichtung die Gleissteifigkeit. Diese führen zu dynamischen Zusatzlasten mit Überbeanspruchung im Ober- und Unterbau. Es kommt zu Nachverdichtungen, Kornumlagerungen und Setzungen, sowohl der Bettung als auch des Unterbaus und Untergrundes. Typisch dafür sind Übergangsstellen der Schotterfahrbahn auf Brücken, Steifigkeitsübergänge von Bereichen mit und ohne Unterschottermatten, Wechsel von unbesohlenen auf besohlte Schwellen oder der Übergang von Schotter auf Feste Fahrbahn.

## 2.2 Gleisfehler mit mittlerer Wellenlänge (D1 3-25 m)

Infolge einer Überbeanspruchung der Bettung und/oder Verschmutzung des Schotters verändert sich das Verformungs- und Elastizitätsverhalten. Die Scherfestigkeit sinkt, und der Lastausbreitungswinkel der Bettung verringert sich. Damit erhöht sich die Beanspruchung des Schotters und des Untergrundes. Werden diese höheren Belastungen nicht mehr aufgenommen, treten schädliche Verformungen des Untergrundes auf.

Ansätze, das Verformungsverhalten im Schottergleis zu berechnen, beruhen auf der Kenntnis des Verlaufs des Bettungsmoduls. Bei bindigen Böden spielt der Porenwasserdruck eine wichtige Rolle, der bei mehrfachen Belastungen durch abrollende Achsen zu einer Verringerung der Steifigkeit unter dem Zug führt. Der Rückgang der Tragfähigkeit wirkt längere Zeit nach (Dauer: Minuten). Ursachen sind gestörte Entwässerungen, aber auch eingebaute Spund- und Lärmschutzwände nach einer Neubebauung. Diese beeinträchtigen oftmals den Wasserabfluss, wodurch in kurzer Zeit eine lokale Instabilität auftreten kann. Sofortige Maßnahmen zur Behebung sind sinnvoll, weil wirtschaftlich.

Weisse Stellen, Setzungen und Riffelbildung sind Folgen von Steifigkeitsunterschieden im Schotteroberbau. Hohllagen führen zu Folgeschäden wie Spannklemmen-, Bolzenbrüchen oder Schwellenrissen [9]. Die Riffelbildung ist Ausdruck unterschiedlicher Anregungen im Schottergleis und der Festen Fahrbahn. Meist ist die Schotterfahrbahn zu steif ausgeführt und muss mittels hochelastischer Stützpunkte verbessert werden.

Bezugnehmend auf die Entstehung bestimmter Wellenlängen in den Rundlaufversuchen von Augustin, gibt Gudehus [12] die folgende Formel zur Berechnung der bevorzugten Wellenlänge  $l_e$  an. Hier ist  $m_d$  die unabgefederte Masse des Fahrzeugs,  $v$  die Fahrgeschwindigkeit,  $EI$  die Biegesteifigkeit der Schiene und  $k_s$  die Bettungssteifigkeit des Unterbaus. Diese Formel ist aus der Bewegungsgleichung eines elastisch gebetteten Balkens abgeleitet und gilt für artreinen Verkehr.

$$l_e = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_d \cdot v^2}{2k_s} + \sqrt{\left(\frac{m_d \cdot v^2}{2k_s}\right)^2 + \frac{E \cdot I}{k_s}}} \quad (4)$$

Für einen ICE-Mittelwagen (bei  $v = 250$  km/h) ergibt sich eine Wellenlänge von ca. 4,5 m und für Güterwagen (bei  $v = 120$  km/h) eine Wellenlänge von ca. 3,5 m.

Diese Gleisgeometriefehler des D1-Bereiches erfassen elektronische Gleismesswagen sehr gut. Die Eigenschaften der Bettung werden mit modernen Stopfmaschinen mit vollhydraulischen mit Sensoren bestückten Stopfantrieben schwellegenau erfasst.

### 2.3 Gleisfehler mit Wellenlängen im Bereich D2 (25-70 m)

Bei Überbeanspruchung durch Zusatzbelastungen, wegen mangelnder Lastverteilung in der Bettung oder verminderter Tragfähigkeit des anstehenden Planums durch erhöhten Wassergehalt treten elastische und plastische Verformungen auf. Diese bewirken Tragfähigkeitsschäden, welche an der Schienenoberfläche als vertikale Gleisfehler mit einer Wellenlänge im Bereich von 25-70 m sichtbar werden.

Ein Hochgeschwindigkeitszug, der mit 250 km/h fährt und mit einer typischen (luftgefederten) Eigenfrequenz der Federung von 1 Hz schwingt, erzeugt eine periodische Kraft mit einer Wellenlänge entsprechend

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{250}{3,6 \cdot 1} = 69,4\text{m} \quad (5)$$

Diese Schwingung wirkt auf die führende Schiene und bewirkt entsprechende periodische Setzungen.

Selbst in modernen Bahnnetzen gibt es Problemstellen in Form von Übergangsbereichen. Ein Übergang tritt als Unstetigkeit der Gleissteifigkeit zutage, merkbar an einer sich unterschiedlich ausprägenden Einsenkung. Bei Überfahrt zeigen sich erhöhte dynamische Krafteinwirkungen und in Folge davon ein beschleunigter Verschleiß der Infrastrukturkomponenten. Diese Stellen werden durch den Einbau elastischer Elemente entschärft. Beim Übergang von Fester Fahrbahn auf Schotter sind Setzungen und Schotterumlagerungen mit erhöhtem Verschleiß kaum vermeidbar. Diese Stellen bedürfen einer gesteigerten Instandhaltungsfrequenz des Stopfens [1]. Dies führt neben dem Steifigkeitsunterschied zu einem die Dynamik weiter vergrößern Höhenunterschied.

### 2.4 Gleisfehler mit langen Wellenlängen (D3 70-150 m)

Feinkörnige Böden ohne ausreichende Scherfestigkeit, Weichschichten und verlagerungsempfindliche Sande werden unter Belastung bzw. dynamischer Zusatz-

belastung zusammengedrückt oder umgelagert und führen zu langwelligen Setzungen und Gleislageveränderungen [8]. Gleislagefehler mit größeren Wellenlängen als 70 m entstehen durch ungleichförmige Setzungen im Unterbau und Untergrund. Sie sind nicht das Ergebnis einer Rad-Schiene-Wechselwirkung [3]. Lange Wellenlängen sind wegen der geringen auftretenden Beschleunigungen nicht sicherheitsrelevant.

Die Längshöhenfehler mit den Wellenlängenbereichen D2 und D3 werden mit elektronischen Systemen erfasst, die Inertialsysteme einsetzen.

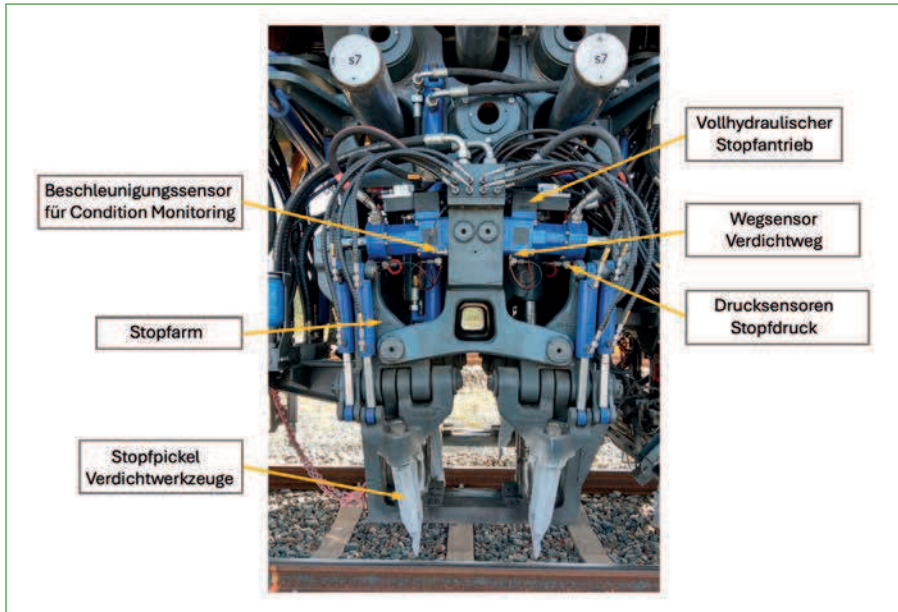
### **3 Erfassung der Gleisfehler und der Eigenschaften der Schotterbettung**

Stand der Technik der Bewertung von Gleisen ist die Erfassung gleisgeometrischer Daten. Der Zustand der Schotterbettung wird bislang kaum durchgängig gemessen. Die bisher bekannten Methoden Schotterprobenentnahme mit anschließender Siebung, Bohrentnahmen oder Georadar sind aufwendig oder ungenau.

#### **3.1 Erfassung der Schotterbetteigenschaften**

Die vollhydraulischen Stopfantriebe der Firma System7 rail GmbH (System7) sind mit Sensoren zur Messung der Verdichtbewegung und der Vibrationsamplitude sowie zur Ermittlung der Größe der Verdichtkraft ausgerüstet. Jeder einzelne vollhydraulische Stopfantrieb wird unabhängig gesteuert und geregelt. Damit sind die Schotterbetteigenschaften unter jeder Schwelle erfassbar. Dies sowohl vor und hinter jeder Schwelle als auch links innen und rechts außen neben der Schiene. Das ergibt ein detailliertes Bild der Schottereigenschaften. Werden die Werte in Längsrichtung des Gleises aufgezeichnet und dargestellt, wird die Lage von Einzelfehlern (weiße Stellen oder Stellen mit notwendiger häufiger notwendiger Stopfung) oder Unstetigkeitsstellen in Form von Einbrüchen der herstellbaren Schotterverdichtung deutlich sichtbar.

Abb. 3 zeigt das vollhydraulische Stopfaggregat mit Sensorik. Die Kräfte, die während der Verdichtung mit dem Stopfaggregat gemessen werden, zeigen die Reaktionen des Schotters. Werden die Kräfte auf den Schotter unter der Schwelle zu groß, beginnt er zum Vorkopf der Schwelle wegzuzufließen [5]. Handelt es sich um einen leichten Oberbau, hebt der Schotter die Schwelle mit der Schiene an. Beides ist unerwünscht. Schwellenhebungen führen zu einer fehlerhaften Gleishöhenlage, zum Vorkopf abwandernder Schotter reduziert den verdichteten tragenden Bereich unter der Schwelle und verringert die Haltbarkeit der Gleislage. Vollhydraulische Stopfaggregate, die im Modus System7 Automatikstopfen betrieben werden, schalten sich bei Erreichen der optimalen Verdichtkraft (Abflachen des Kraftanstiegs bis zur Waagrechten) selbsttätig ab. Jeder Stopfpickel wird unabhängig gesteuert und passt sich optimal an die herrschenden Stopfverhältnisse an. Bei Erreichen der op-



**Abb. 3:** Sensorik des vollhydraulischen Stopfaggregates

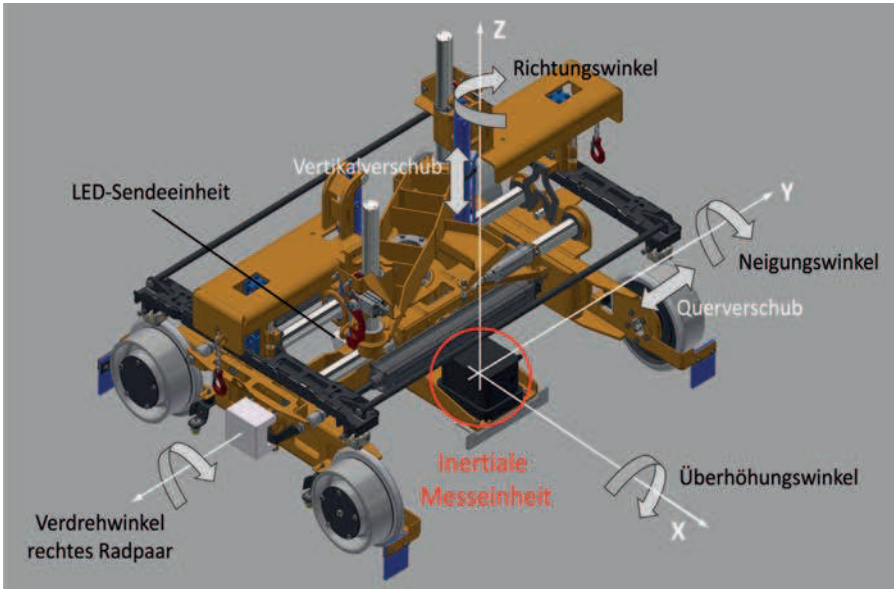
Quelle: System7 rail GmbH

timalen Verdichtung schaltet sich die Vibration schlagartig ab, der Stopfpickel hält Position, bis alle Werkzeuge fertig sind. Anschließend öffnen und heben sich die Pickel ohne Vibration. Die Verdichtfront weicht nicht auf, der Verdichtbereich bleibt maximal. Erfahrungen und umfangreiche Versuche der englischen Eisenbahn zeigen als Ergebnis im Durchschnitt eine um 30 % längere Haltbarkeit der Gleislage. Wegen der Vorverdichtung des Schotters durch die eindringenden voluminösen Stopfpickel in den Schotter zeigt sich als gemessenes Ergebnis eine sich automatisch einstellende optimale Stopfzeit zwischen 0,7 und 0,8 Sekunden. Dies ist erheblich kürzer als die konventionell eingestellten üblichen 1,2 Sekunden. Eine längere Stopfung ist ineffizient, da sie nicht nur die Schotterbeanspruchung erhöht, sondern sich darüber hinaus nachteilig auf die Haltbarkeit der Stopfung auswirkt.

### 3.2 Erfassung der langwelligen Gleisfehler durch inertielle Messeinrichtungen

In die Stopproboter 4.0 der Fa. System7 ist ein inertiales Gleisgeometrie-Abnahmesystem integriert. Unabhängige Gutachter analysierten die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messfahrten im Rahmen der Überprüfung der Genauigkeit [6]. Die gemessenen Wegdifferenzen der verschiedenen Prüffahrten wiesen kaum Drift auf, die Summen-

verteilung aller Messungen sowie die Vergleiche der Messfahrten mit gedrehter Maschine lagen deutlich unter den Grenzwerten. Dieses inertielle Navigationsmesssystem ist für sicherheitsrelevante Abnahmemessungen nach EN 13848-3 zugelassen (Abb. 4).



**Abb. 4:** Inertiales Navigationsmesssystem für Abnahmemessungen nach EN 13848-3

Quelle: B. Lichtberger

## 4 Beseitigung von Gleislagefehlern

Geometrische Gleislagefehler mit Wellenlängen von mehr als 3 m werden durch Stopfmaschinen behoben. Mithilfe eines Hebe-Richt-Aggregates wird das Gleis über ein als Regelkreis ausgeführtes Messsystem in die Soll-Lage gehoben und gerichtet. In dieser Lage fixieren Stopfaggregate über Verdichtung des Schotters das Gleis. Schienenoberflächenfehler werden durch Fräsmaschinen oder Schleifmaschinen beseitigt.

Ab Hebungen von mehr als 20 mm werden Gleisfehler dauerhaft behoben. Gleise, die nur 20 mm angehoben werden, fallen unter Belastung in die Ausgangslage zurück. Das Phänomen wird als „Gedächtnis des Gleises“ bezeichnet. Bei geringen Hebungen kommen die Schottersteine, die bereits unter der Schwelle liegen, bevorzugt zum Eingriff. Die Eigenschaften des Schotters unter der Schwelle ändern sich so nicht, weshalb sie unter Belastung wieder in dieselbe Ausgangslage zurückkehren. Erst bei größeren Hebungen kommen neue Schottersteine aus dem Zwischenfach

zum Einsatz. Dadurch ändert sich die Bettungsstruktur unter der Schwelle nachhaltig – das „Gedächtnis des Gleises“ wird gestört. Gleishöhenfehler werden nachhaltig behoben.

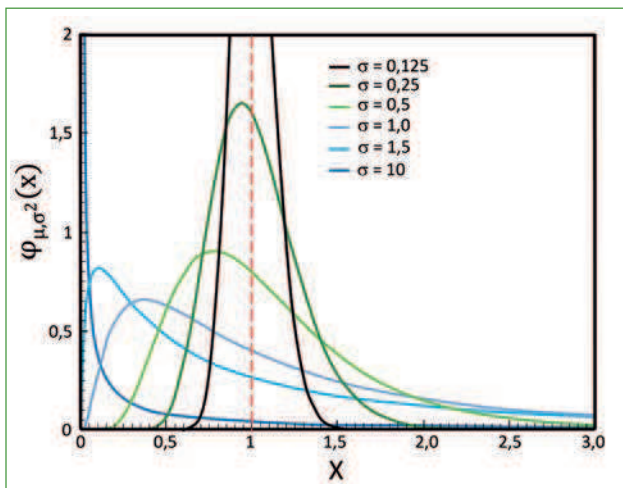
## 5 Automatisches Gleisanalyseprogramm CEO++Expert

Stopfroboter 4.0, die mit vollhydraulischen Stopfaggregaten und Sensoren sowie mit einem inertialen Navigationssystem ausgestattet sind, erlauben die langwellige phasen- und amplitudengenaue Erfassung von Gleislagefehlern und messen gleichzeitig die Schotterbetteigenschaften. Das automatische Gleisanalyseprogramm CEO++Expert erlaubt die Analyse der Wellenlängen der Gleisfehler, des Schotterbettzustandes, gibt die Position von dominanten Gleisfehlern an, weist auf mögliche Ursachen und Möglichkeiten zu deren Behebung hin. Die automatische Analyse wird als Schotterbettreport zur Verfügung gestellt.

Eine der Herausforderung bei der Entwicklung des Expertensystems war die Objektivierung der Messungen, die Zuordnung einer Klassifizierung bzw. einer objektiven Beurteilung der Qualität des Gleissystems.

### 5.1 Versuch, empirisches Wissen und Daten objektiv abzubilden

Oft wird die Gleisgeometrie mittels statistischer Gleisqualitätsziffern über gewichtete Standardabweichungen geometrischer Gleisgrößen (wie Längshöhe, Richtung, Überhöhung, Verwindung, Spurweite) beurteilt. Nachteilig an dieser Methode ist die nur allgemein



**Abb. 5:** Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Log-Normalverteilung

Quelle: B. Lichtberger

gültige Aussagekraft. Wellenlängenspezifische Besonderheiten werden kaum beachtet. Die genaue Lage besonders intensiver Fehler ist zwar bekannt, aber hinsichtlich ihrer Wellenlänge nicht spezifiziert. Über die Haltbarkeit der Stopfung sind keine Aussagen möglich, da der Schotterzustand (z.B. zerkleinerter runder oder kontaminierter Schotter) nicht bekannt ist.

## 5.2 Die System7 – CEO++Expert-Methode zur objektiven Beurteilung

Standardabweichungen und/oder Mittelwerte von Gleisparametern wie Geometriefehler, Schotterbetthärte und Verdichtbarkeit des Schotters werden bei dieser Methode nach Gleisklassen geordnet. Die Ergebnisse der Stopfarbeiten verschiedener Maschinen werden gesammelt. Von den interessierenden Parametern werden Verteilungen erstellt.

Die absoluten Fehlerdifferenzen nach einer Stopfarbeit sind nicht normalverteilt, sondern folgen einer Log-Normalverteilung (Abb. 5).

Für die Zufallsvariable X gilt:

$$F(x|\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma \cdot x}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

$\mu$  ... Mittelwert

$\sigma$  ... Standardabweichung

Die Datenbasis wird mit jeder erfassten Stopfarbeit erweitert und verfeinert die statistischen Verteilungen.

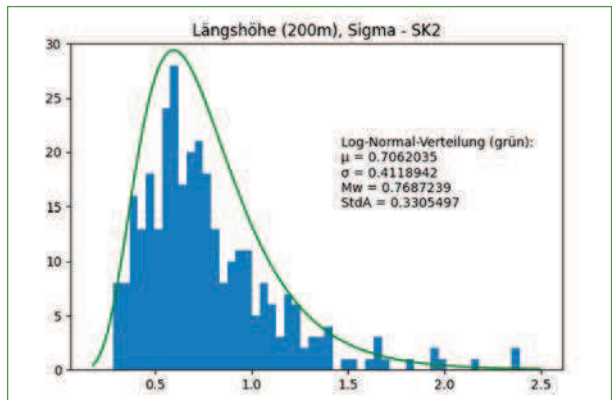
Die Verteilungskurven werden in zehn Klassen unterteilt, mit jeweils gleich vielen Elementen. Die Klasse 1 beschreibt die Gleise mit den geringsten Fehlern und die Klasse 10 jene der schlechtesten Kategorie.

Abb. 6 zeigt beispielhaft die logarithmische Normalverteilung der Standardabweichung 200 m langer gestopfter Gleisabschnitte.

## 5.3 Welche Methoden der Gleisanalyse werden angewandt?

### 5.3.1 Spektralanalyse mithilfe der Fourier-Analyse

Eine typische Methode ist die Analyse des Wellenlängenspektrums eines Gleisabschnittes mit bestimmter Länge (meist 200 m) mithilfe der Fourier-Analyse. Diese



**Abb. 6:** Logarithmische Normalverteilung der Standardabweichung der Längshöhe von 200 m langen bearbeiteten Gleisabschnitten

Quelle: B. Lichtberger

ordnet einzelnen Wellenlängenklassen eine Intensität zu. Damit sind die dominierenden Wellenlängen bekannt. Verloren ist allerdings die Information, an welchen Orten bestimmte Wellenlängen dominieren. Im Eisenbahnwesen wird die Fourier-Analyse oft zur Errechnung des Leistungsdichtespektrums angewendet.

Der Mangel an Ortsinformation der dominierenden Wellenlängen erlaubt es nicht, deren genaue Lage in Gleislängsrichtung anzugeben.

### 5.3.2 Fraktalanalyse

Die Fraktalanalyse ist eine andere Methode der Bestimmung von Fehlerwellenlängen, die in einem Gleisabschnitt auftreten. Auch diese Methode verliert die lokale Information, in welchen Bereichen bestimmte Fehlerwellenlängen auftreten. Mithilfe der Anwendung der Fraktaltheorie wird aus Längshöhenverläufen die Fraktalziffer berechnet [13, 14]. Für eine bestimmte Abschnittslänge einer Eisenbahnstrecke, beispielsweise 200 m, wird ein Polygonzug in den Verlauf der Längshöhe eingepasst und seine Länge, mit immer kleiner werdender Schrittweite, berechnet. Für die Länge dieses Polygonzuges gilt [15]:

$$L(d) = n \cdot d^{1-D_f} \quad (7)$$

$L(d)$  ... Länge des Polygons

$d$  ... Polygonschrittweite

$D_f$  ... fraktale Dimension

Logarithmiert man die Gleichung, gilt:

$$\log L(d) = (1 - D_f) \cdot \log(d) + \log(n) \quad (8)$$

In doppelt logarithmischer Darstellung werden (falls notwendig abschnittsweise) Regressionsgeraden berechnet. Die Steigung ist immer negativ (je feiner die Unterteilung, umso größer die Polygonzuglänge) und ergibt sich zu:

$$k = 1 - D_f \quad (9)$$

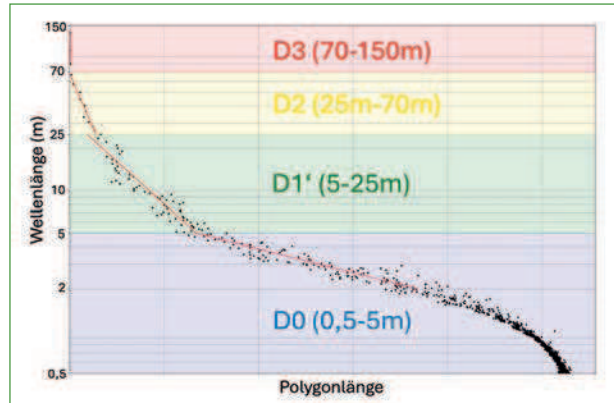
$k$  ... Fraktalzahl

Die doppelt logarithmische Darstellung wird als Richardson-Plot bezeichnet.

Amerikanische und Untersuchungen der Technischen Universität Graz zeigen, dass die unterschiedlichen Steigungen der Regressionsgeraden Wellenlängenbereichen der Längshöhe und deren Ursachen zugeordnet werden können [13, 15].

Abb. 7 zeigt das Ergebnis der Fraktalanalyse eines 400 m langen Gleisabschnittes nach einer Gleisstopfung.

Je steiler die Tangente der einzelnen Wellenlängenbereiche ist, desto intensiver die Gleislagefehler des entsprechenden Bereiches. Der Schnittpunkt der Tangente mit der Abszisse gibt Aufschluss über die vorherrschende Wellenlänge. Besonders aussagekräftig bei der Fraktalanalyse sind die Wellenlängenbereiche D1 (Schotterzustand) und D2 (Zwischenschicht- oder Drainageband).



**Abb. 7:** Fraktalanalyse der Längshöhenfehler eines 400 m langen Gleisabschnittes

Quelle: B. Lichtberger

Die flache Steigung im langwelligen Bereich (D3) deutet darauf hin, dass der Untergrund ausreichende Tragfähigkeit aufweist und in Ordnung ist. Die Fraktalanalyse kann für beliebige Längen durchgeführt werden, beispielsweise auf einem Gleisabschnitt oder einem gesamten Gleisnetz. Sie liefert numerische Größen, die unabhängig von der Länge des analysierten Musters sind [16].

Stopfen selbst nimmt nur geringen Einfluss auf die Fraktalanalyse, Stopfen ändert die Schotterbetteigenschaften nicht (oder nur geringfügig) [13]. Verschmutzter Schotter bleibt nach einer Stopfung verschmutzt, ebenso wenig verändern sich die Untergrundverhältnisse.

### 5.3.3 Waveletanalyse

Wavelets wurden aus der Idee heraus geboren, eine Strecke in kürzere Abschnitte zu unterteilen und mithilfe der Fourier-Transformation jene Stellen zu finden, an denen kurzweilige Gleisfehler auftreten (Kurzweg-Fourier-Transformation). Im Gegensatz aber zu den Sinus- und Cosinus-Funktionen der Fourier-Transformation besitzen Wavelets Lokalität im Wellenlängenspektrum und im Ortsspektrum. Vereinfacht gesagt wirkt die Wavelettransformation so, als würde das Signal stückweise mit einem Bandpass bestimmter Bandbreite gesiebt. So finden sich örtlich begrenzt bestimmte Fehlerwellenlängenbereiche. Aus einem einfachen Gleisfehlersignal folgt eine zweidimensionale Darstellung der Wellenlängen über den Ort. Es gibt verschiedene Waveletfunktionen, die angewendet werden. Typisch ist das Morlet-Wavelet oder der Mexikanische Hut.

Das Wavelet des Mexikanischen Hutes (Abb. 8) wird mathematisch wie folgt beschrieben:

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3} \cdot \sqrt[4]{\pi}} \cdot (1 - x^2) \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \tag{10}$$

Die Wavelet Transformierte errechnet sich zu:

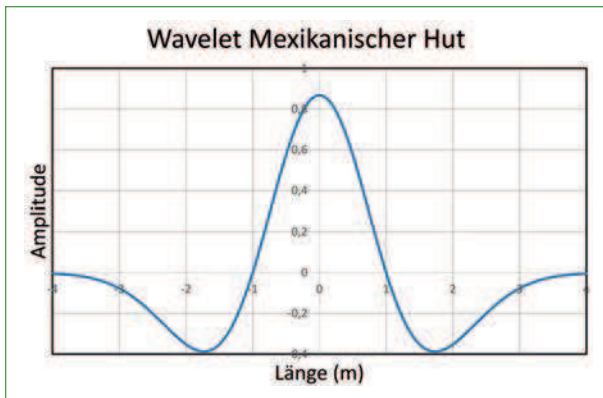
$$\mathcal{W}(F(x))(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \cdot \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx \tag{11}$$

und nennt sich Wavelet Transformierte von F(x) bezüglich  $\psi$ .

Mit b als Verschiebungsfaktor wird das Wavelet durch die Funktion F(x) geschoben, mit a (Skalenfaktor) als Wellenlängenparameter wird die Wellenlänge des Wavelets variiert. Dadurch ergibt sich eine zweidimensionale Darstellung (über b die Position, über a die detektierte Wellenlänge). Im Gegensatz zur Fourier-Transformation liefert die Wavelettransformation lokale Informationen sowohl im Orts- als auch im Wellenlängenbereich.

Abb. 9 zeigt die Analyse der Längshöhe eines Gleisabschnittes. Von blau nach rot geht die Intensität der Wellenlängenanteile. Deutlich sind im Wellenlängenbereich um 2 bis 6 m Gleislagefehler zu sehen. Von km 35 900 bis zu 35 800 ist ein ausgedehnter Fehler der Wellenlänge 70 m ersichtlich – ein Hinweis auf mangelhafte Drainage. Auch im Schotterzustandsbereich 3-25 m sind einige Bereiche schadhaften oder verschmutzten Schotters zu sehen.

### 5.3.4 Wie wendet das Expertensystem CEO++Expert die Wavelettransformation an?



**Abb. 8:** Wavelet Mexikanischer Hut

Quelle: B. Lichtberger

Die Waveletanalyse wird auf den langwelligen gemessenen Längshöhenverlauf 400 m langer Abschnitte angewendet. 400 m wurden gewählt, damit Wellenlängen bis zu 200 m erfasst werden können. Zusätzlich zur zweidimensionalen Heatmap wird die spektrale Waveletleistungsdichte errechnet.

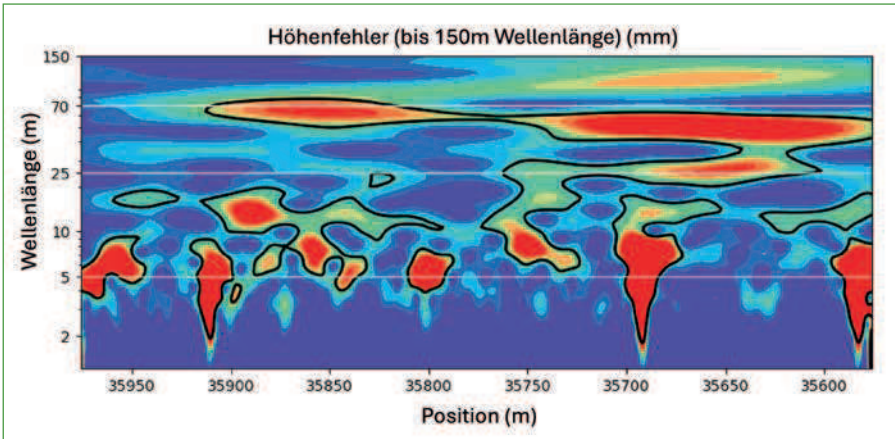


Abb. 9: Waveletanalyse eines 400 m langen Gleisabschnitts

Quelle: B. Lichtberger

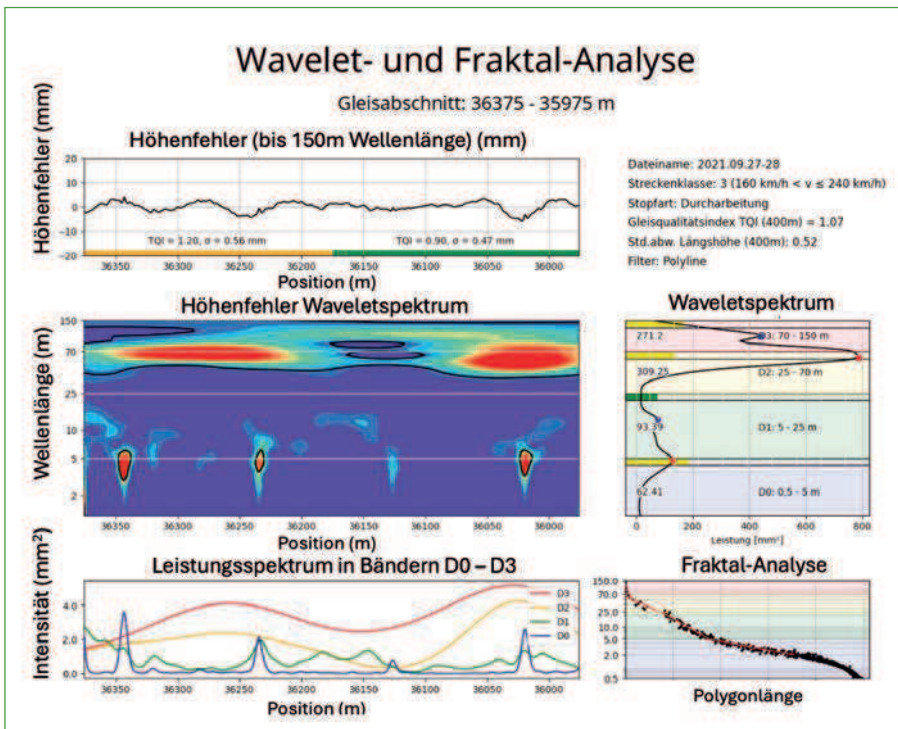
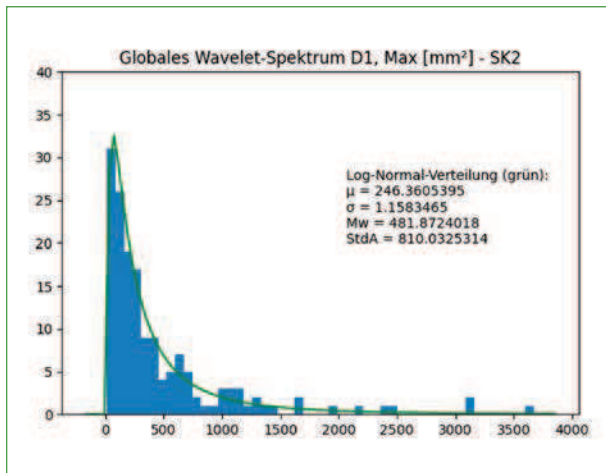


Abb. 10: Auswertediagramme eines 400 m langen Abschnitts mithilfe des CEO++Expert Tools

Quelle: System7 rail GmbH



**Abb. 11:** Logarithmische Normalverteilung der Maxima im globalen Waveletspektrum des D1-Bandes Quelle: B. Lichtberger

Diese zeigt in ihren Maximalwerten Wellenlängen mit sehr hoher Leistungsdichte an.

Die Farbgebung der Heatmap in Abb. 10 ist relativ. Das bedeutet, ein rot dargestellter Fehlerbereich muss nicht unbedingt qualitativ besonders schlecht sein. Um die Intensität eines derartigen Bereiches objektiv beurteilen zu können, werden Verteilungen vieler gemessener

400-m-Abschnitte einer bestimmten Gleisklasse klassifiziert.

Abb. 11 zeigt die logarithmische Normalverteilung der Maxima im globalen Waveletspektrum des D1-Bandes. Dieses wurde aus vielen Stopfarbeiten mit je 400 m Länge gewonnen.

Aus dieser Verteilung wird nun eine Summenkurve gebildet und in zehn Klassen unterteilt, wobei jede Klasse gleich viele Elemente enthält. Klasse 1 zeigt die besten Ergebnisse und Klasse 10 die schlechtesten.

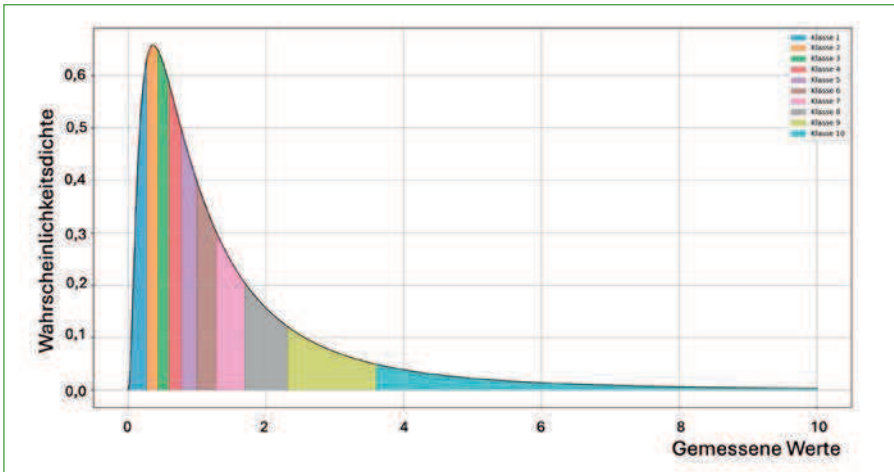
Abb. 12 zeigt die Klassifizierung einer logarithmischen Normalverteilung in zehn Klassen. Für eine absolute Bewertung der Gleisfehler hinsichtlich ihrer Intensität wird der zu analysierende Gleisabschnitt mit 400 m ausgewertet und der entsprechenden Klasse zugeordnet.

In Abb. 10 werden im Waveletleistungsspektrum bei jedem Wellenlängenband im oberen Balken (farbig hinterlegt) die Intensitäten dargestellt. Die Farbgebung der Klassenbereiche ist aus Tab. 2 ersichtlich.

Unter der Heatmap werden die mittleren Waveletleistungsdichten der vier Wellenlängenbänder errechnet und in Diagrammform dargestellt. Diese verdeutlicht Bereiche besonders hoher Intensität. Die Darstellung erlaubt die Angabe des Ortes und der Wellenlänge von Einzelfehlern besonders großer Ausprägung.

Im Längshöhenverlauf werden für jeweils 200 m-Abschnitte ein Track Quality Index TQI und die Standardabweichung angegeben.

Der TQI errechnet sich zu:


**Abb. 12:** Klassifizierung der logarithmischen Normalverteilung

Quelle: B. Lichtberger

$$TQI = \sqrt{(\sigma_L + \sigma_u)^2 + \sigma_R^2} \quad (12)$$

 $\sigma_R$  ... Standardabweichung Richtung (mm)

 $\sigma_u$  ... Standardabweichung Überhöhung (mm)

 $\sigma_L$  ... Standardabweichung Längshöhe (mm)

Die Zuordnung der TQI für die einzelnen Streckenklassen erfolgt in vier Farben (sehr gut = grün, gut bis mäßig = gelb, ausreichend = orange, mangelhaft = rot).

## 6 Schotterbettreport

Der Schotterbettreport wird auf allen Stopfrobotern der Fa. System7 in Echtzeit erstellt und nach der Abspeicherung automatisch an die Webplattform INFRame (Infrastructure Monitoring) drahtlos überspielt. Abb. 13 zeigt eine Seite aus einem Schot-

Klassenbereich	Farbzuordnung	Beurteilung
$0 \leq n < 2$	grün	Sehr gut
$2 \leq n < 4$	gelb	Gut
$4 \leq n < 7$	orange	Befriedigend
$7 \leq n \leq 10$	rot	Mangelhaft

**Tab. 2:** Klassifizierung und Beurteilung der Fehlerintensität

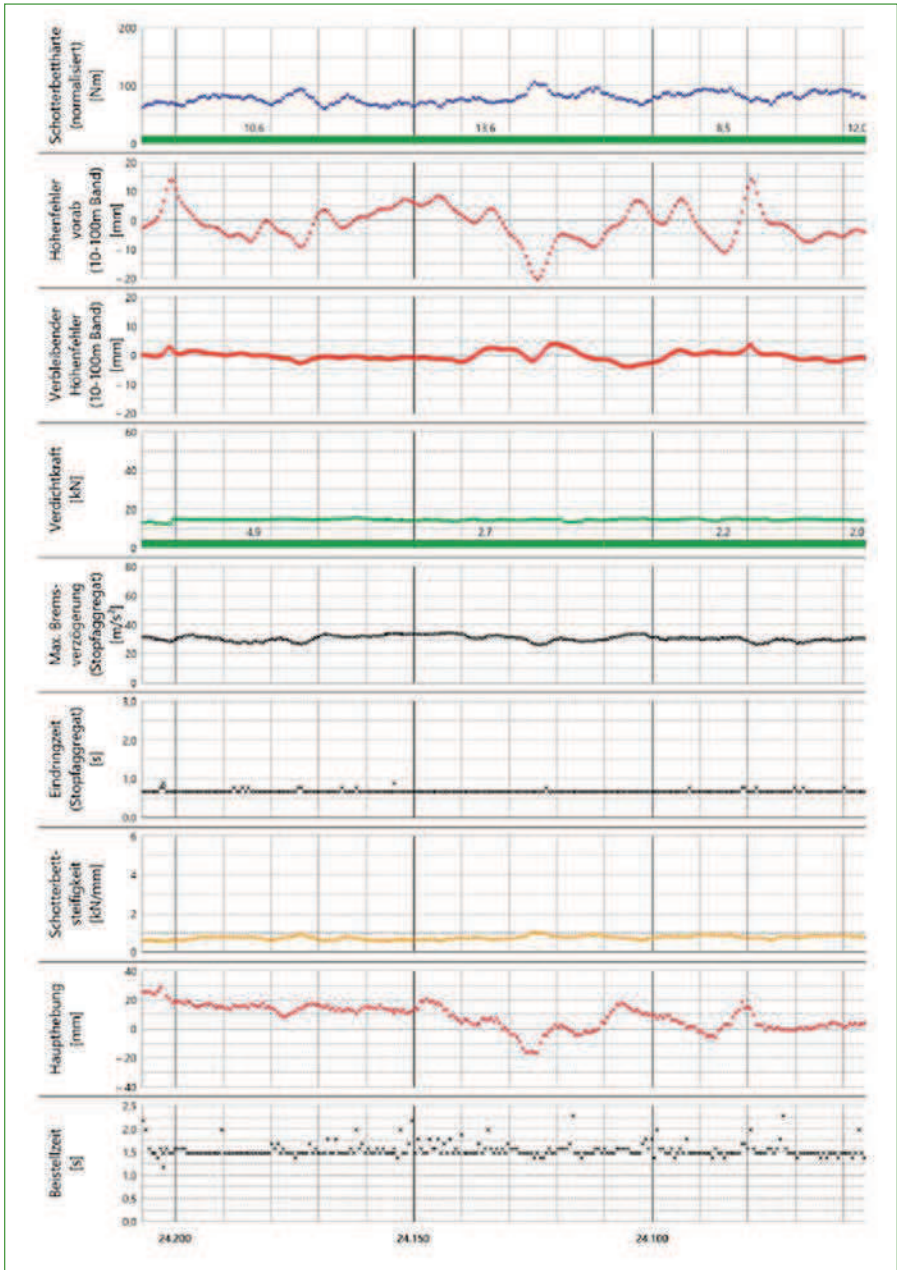


Abb. 13: Schotterbettreport mit wichtigen Parametern

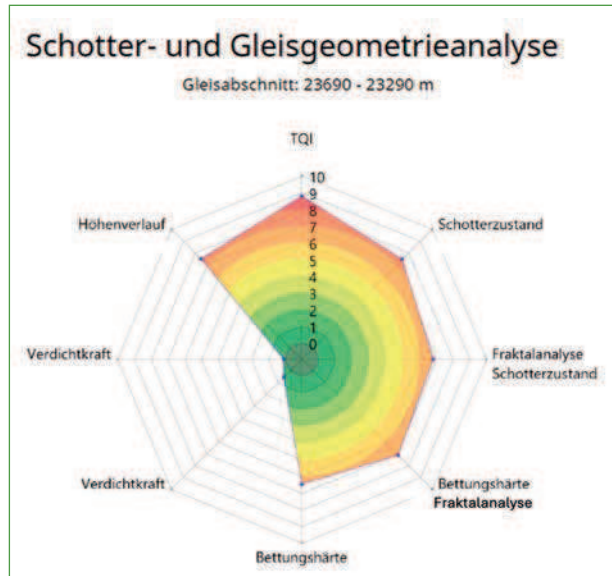
Quelle: System7 rail GmbH

terbettreport. Das erste Diagramm oben zeigt den Verlauf der Schotterbetthärte (wird in Nm gemessen und entspricht der normierten Verdichtungsenergie, die an jeder Schwelle beim Stopfen gemessen wird). Darunter befindet sich der langwellige Gleishöhenfehler (10-100 m). Da üblicherweise die Erfassung der Korrekturwerte äquidistant alle 5 m erfolgt, werden nur Wellenlängen ab 10 m erfasst. Unter dem gemessenen langwelligen Längshöhenfehler

wird der langwellige Gleishöhenfehler gezeigt, der nach der Stopfarbeit zurückbleibt. Die vierte Zeile zeigt die erreichte Verdichtung des Gleises an. Sie beträgt etwa 15 kN und weist wegen des geringen Wertes auf eine Gleisneulage hin. Darunter die Diagramme geben die maximale Bremsverzögerung der Stopfaggregate und die Eindringzeit der Stopfaggregate ins Schotterbett an. Es folgt die vertikale Schottersteifigkeit gefolgt von der Hebung, die an den Hebezyindern während der Arbeit gemessen wurde. Das unterste Diagramm gibt die Beistellzeit wieder. Die Werte um 1,6 Sekunden sind auf Doppelstopfen, wegen der Schotterneulage, zurückzuführen.

Basierend auf den Messungen des Schotters und der Gleisgeometrie erfolgt die Analyse der Stopfarbeiten für jeweils 400 m lange Abschnitte. Um die Analyse schnell und einfach überblickbar zu machen, werden zwei Netzdiagramme je 400 m Abschnitt erzeugt.

Das erste umfasst eine Analyse des vorhandenen Schotters und der Gleisgeometrie (Abb. 14). Die Klassenzuordnung der einzelnen Parameter wird als Ast im Netzdiagramm dargestellt. Der Allgemeinzustand wird über die überspannte Gesamtfläche des aufgespannten Netzes beurteilt. Je kleiner die aufgespannte Fläche, umso höher die Qualität des Gleisabschnittes. Das zweite Netzdiagramm in Abb. 15 zeigt die Gleisfehleranalyse. Das Blatt zeigt einen 400 m-Abschnitt in



**Abb. 14:** Netzdiagramm Schotter- und Gleisgeometrieanalyse

Quelle: System7 rail GmbH

schlechtem Zustand. Es tritt ein Einzelfehler mit einer Länge von 46 m auf. Das 5 m-Band zeigt eine hohe Schwellendynamik, im Schotterband tritt insbesondere bei 23844 verschmutzter abgenutzter Schotter auf, der sich nicht mehr hinreichend verdichten lässt, im Drainageband gibt es auf 76 m Länge einen kritischen Bereich. Auf 126 m Länge bei 24035 m scheint ein Tragfähigkeitsproblem vorzuliegen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Weiter entwickelte vollhydraulische Stopftechnik mit Sensorik ermöglicht die Messung von Schotterbetteigenschaften. Die Erfassung von weiteren Parametern wie Bremsverzögerung, Stopfzeit, Verdichtung, Eindringzeit der Stopfaggregate, Korrekturwerte vor der Stopfarbeit, Restfehler nach der Stopfarbeit erlauben die Analyse und Beurteilung des Schotterzustandes und der Haltbarkeit der Gleisgeometrie. Das inertielle Navigationsmesssystem erlaubt die amplituden- und phasengenaue (lagegenaue) Erfassung langwelliger Fehler. Die wellenlängenspezifische Analyse mittels Wavelets zeigt die örtliche Lage der Gleisfehler an und gibt Hinweise auf deren mögliche Ursache. Mit dem CEO++Expert-Analysetool werden Stopfarbeiten und Gleiszustand mit System7-Stopfro-

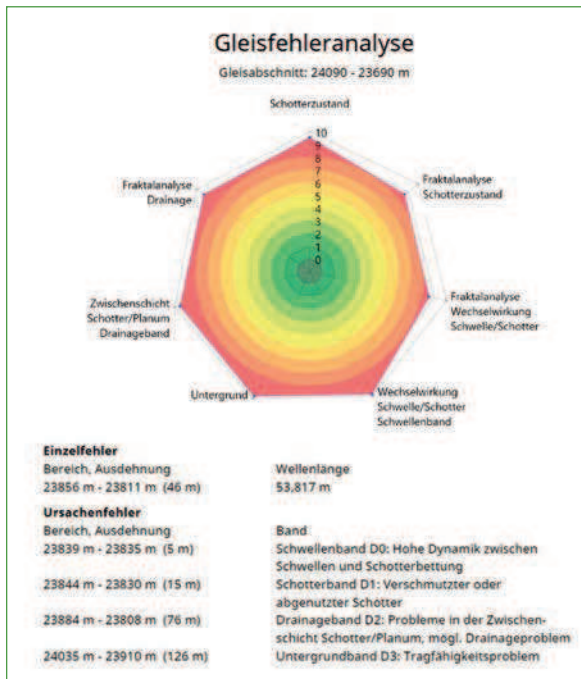


Abb. 15: Netzdiagramm Gleisfehleranalyse

Quelle: System7 railsupport GmbH

botern analysiert und in Form übersichtlicher Netzdiagramme aufbereitet. Die Fraktalanalyse ist für die Wellenlängenbänder D1, D2 und D3 eine Ergänzung. Mithilfe der Statistik über viele Stopfeinsätze gelingt die Objektivierung. Derzeit läuft eine Entwicklung, die mithilfe dieser Ergebnisse eine Künstliche Intelligenz trainiert. Mit jeder weiteren erfassten Stopfarbeit wird die Datenbank erweitert und verfeinert die Aussagen der statistisch basierten Analyse. Das CEO++Expert-Analysetool gibt dem Maschineneigner ein Tool in die Hand, mit der er die hohe Qualität seiner

Arbeit nachweisen kann. Der Infrastrukturbetreiber erhält ein Werkzeug, welches ihm hilft, Schwächen seines Gleises örtlich und im Hinblick auf wahrscheinliche Ursachen zu erkennen. Die Behebung von Gleisfehlern, insbesondere auf stark befahrenen Strecken, führt zu einer Verlängerung der Lebensdauer der Gleiskomponenten – was im Regelfall hoch wirtschaftlich und effizient ist.

## Quellen

- [1] Lichtberger, B.: Das Große Buch der Gleisinstandhaltung, Band 1, tredition Verlag, Hamburg, 2022
- [2] Lichtberger, B.: Das Große Buch der Gleisinstandhaltung, Band 2, tredition Verlag, Hamburg, 2023
- [3] Lichtberger, B.: Handbuch Gleis – Unterbau Oberbau Instandhaltung Wirtschaftlichkeit, DVV Media Group GmbH/ Eurailpress, Hamburg, 3. Auflage, 2010
- [4] Lichtberger, B.; Schmitzberger, H.: Abnahmeschrieb des Schotterbettzustandes durch eine Hochleistungsmaschine – in situ Messung während des regulären Stopfbetriebes, ZEVrail 144, 10/2020, S. 372-378
- [5] Lichtberger, B.: Das neue System7-Automatikstopfen erhöht die Haltbarkeit der Gleislage: Einsatzergebnisse, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 09/2020, S. 58-63
- [6] Lichtberger, B.; Mittermayr, P.; Kuttelwascher, C.: Präzise Gleisvermessung mit einem inertialen Mess- und Navigationsmesssystem, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2020, S. 46-50
- [7] Esveld, C.; Jourdain, A.; Kaess, G.; Shenton, M. J.: Historic data on track geometry in relation to maintenance, Rail Engineering International Edition, Number 2/1988, p. 16-19
- [8] Lieberenz, K.; Kipper, R.: Zum Einfluss des Unterbaues und des Tragsystems auf die Gleislage, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 08/2009, S. 18-24
- [9] Kipper, R.; Gerber, U.; Schmeister, J.: Bestimmung langweiliger Gleisverformungen und deren Bewertung, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 2/2013, S. 11-16
- [10] Holtzendorff, K.: Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahn, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2003
- [11] Eisenbahntechnische Publikationen, IF 1/85: Möglichkeiten eines einheitlichen Beurteilungssystems für den Gleiszustand zur Planung von Gleisunterhaltungsarbeiten unter Verwendung der elektronischen Datenverarbeitung, Juni 1985
- [12] Gudehus, G. (1998): Entstehung und Bewältigung von Gleisbettwellen. Baugrundtagung 1998, Stuttgart: DGGT, pp. 457-463
- [13] Neuhold, J.; Landgraf, M.: Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme? ZEVrail 140, 06+07/2016, S. 232-238
- [14] Hansmann, F.; Landgraf, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn? ZEVrail 137, 11+12/2013
- [15] Hyslip, J. P.; Trosino, M. J.; Selig, E. T.: Fractal Analysis of Geometry Data, Journal of the Transportation Research Record, 2002
- [16] Landgraf, M.; Enzi, M.: Smart Data for a Pro-active Railway Asset Management, Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA, Wien, 2018
- [17] Wolter, K. U.; Erhard, F.; Gabler, H.; Hempe, T.: Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 7 + 8/2014, S. 32-36
- [18] Lichtberger, B.: Stopftechnologien und ihre Auswirkung auf die Haltbarkeit der Gleislage, ZEVrail 147, 09/2023, S. 340-347
- [19] Hohlfeld, T.: Geophysikalische Verfahren zur Strukturerkundung, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 01/2018, S. 48-52



**Univ.-Doz. Dr. Bernhard Lichtberger**  
 Geschäftsführender Gesellschafter und CTO  
 System7 rail GmbH, AT-Laakirchen  
 bernhard.lichtberger@s7-rail.com