

Frühzeitige Detektion von punktuellen Instabilitäten am Bahnkörper

Bericht vom Auftaktworkshop zur frühzeitigen Erkennung von punktuellen Instabilitäten an bestehenden Bahnkörpern in Schotterbauweise

**NORBERT LILLIN | SEBASTIAN RAPP |
 STEPHAN FREUDENSTEIN |
 ULLRICH MARTIN | CHRISTIAN MOORMANN**

Am 22. März 2018 fand der Auftaktworkshop zu dem von der DFG geförderten Forschungsprojekt „Frühzeitige Erkennung von punktuellen Instabilitäten bei zyklisch dynamischer Einwirkung an bestehenden Bahnkörpern in konventioneller Schotterbauweise bei bindigen Böden im Unterbau/ Untergrund“ (EPIB) am Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München statt. Etwa 50 Vertreter aus Wissenschaft, Wirtschaft und von Eisenbahninfrastrukturunternehmen verfolgten elf Vorträge zu den vier Themenfeldern Fahrwegmonitoring, Gleisdatenanalyse, Modellierung der Interaktion von Gleis und Untergrund und Nachweis der dynamischen Stabilität von Eisenbahnfahrwegen. Ziel des Workshops war die Bearbeitung des aktuellen Wissensstands und der fachliche Austausch zu den vier Themenfeldern.

Das Forschungsprojekt EPIB, eine Kooperation der Universität Stuttgart, vertreten durch das Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen und

das Institut für Geotechnik, sowie der Technischen Universität München, vertreten durch den Lehrstuhl und das Prüfamts für Verkehrswegebau, befasst sich mit der Fragestellung der frühzeitigen Erkennbarkeit von punktuellen Instabilitäten im Unterbau bzw. Untergrund von bestehenden Eisenbahnkörpern. Punktuelle Instabilitäten – wie z.B. Schlammstellen – können zu einer signifikanten Schädigung des Bahnkörpers führen, wodurch aufwendige Bau- und Instandhaltungsmaßnahmen notwendig werden. Ziel ist es deshalb, die Charakteristik solcher Instabilitäten zu bestimmen, um diese mittels an Zügen des Reise- und Güterverkehrs angebrachten Sensoren möglichst zuverlässig und zerstörungsfrei erkennen zu können. Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein (Technische Universität München), Ordinarius des Lehrstuhls und Direktor des Prüfamts für Verkehrswegebau, eröffnete den Workshop mit einer Einführung in die vier Themenfelder und der Vorstellung des Verbundprojekts EPIB.

Gleisdatenanalyse und Fahrwegmonitoring

Dr.-Ing. Burchard Ripke (DB Netz AG) stellte den aktuellen Stand des „Fahrwegmonitorings im Netz der Deutschen Bahn“ vor, welches als Ergänzung zur vorgeschriebenen Regeln-

spektion betrieben wird. Das Ausrüsten von Regelfahrzeugen mit spezieller Messtechnik, aktuell eines ICE 2 und einer Güterlokomotive BR189, ermöglicht die kontinuierliche Überwachung der Gleisgeometrie (Abb. 1). Die weitere Ausrüstung von Regelfahrzeugen und Ausweitung des Monitorings, beispielsweise auf die Schienenlaufflächen, ist zukünftig vorgesehen. Dabei soll das Fahrwegmonitoring eine effizientere sowie prognosebasierte Instandhaltung ermöglichen, wodurch eine Reduktion von Störstellen am Fahrweg erreicht wird. Für eine effiziente und zielgerichtete Datenverarbeitung werden aktuell Analysetools entwickelt, die eine Prognose der Gleislageentwicklung sowie die kontinuierliche und zeitnahe Bewertung von Umbau- und Instandhaltungsmaßnahmen ermöglichen [13].

Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Landgraf (Technische Universität Graz) präsentierte die Ergebnisse der Forschung seines Instituts im Bereich der „Gleislagedatenanalyse zur Beschreibung des Fahrwegzustands“. Mit dem Ziel einer objektiven und automatisierten Zustandsbeschreibung des Eisenbahnfahrwegs wurde zur komponentenspezifischen Beurteilung von Fehlern im Gleis ein Verfahren entwickelt, welches den Zustand der Schwellen, des Schotterbetts und des Unterbaus kennzeichnet. Die

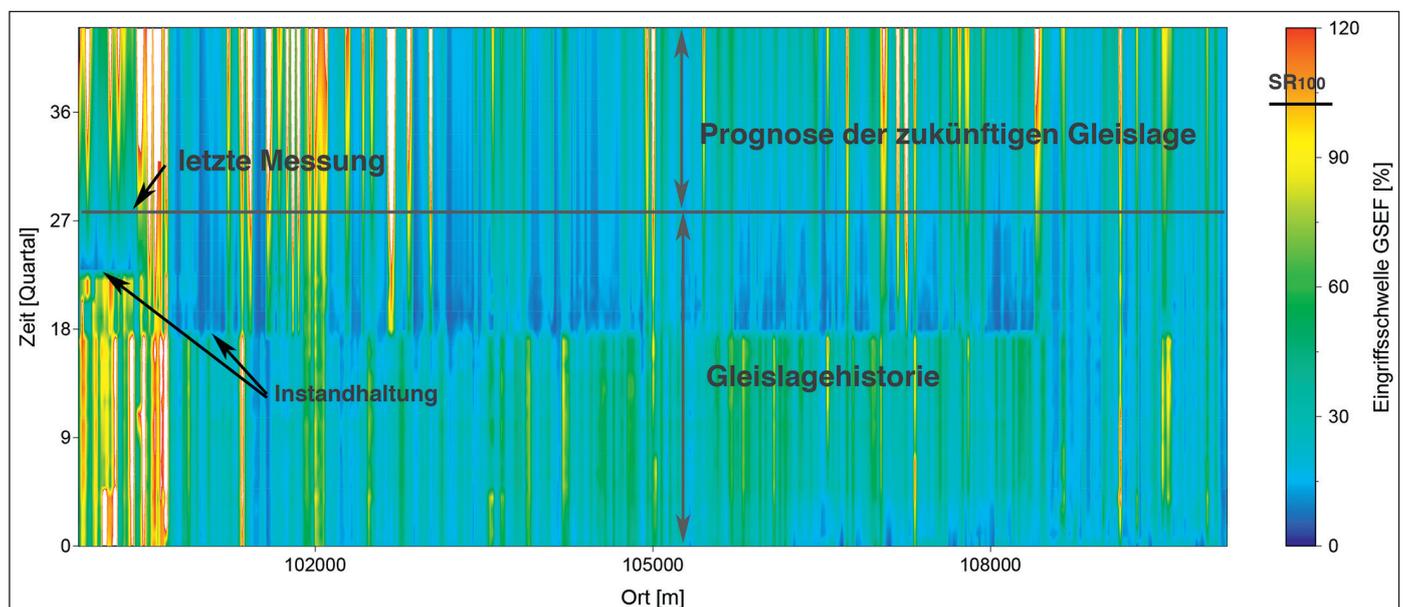


Abb. 1: Gleislagebewertung und -prognose aus Inspektionsdaten und der aus der kontinuierlich gemessenen Achslagerbeschleunigung abgeleiteten Längshöhe [13]

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU München /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DVV Media Group, 2018.

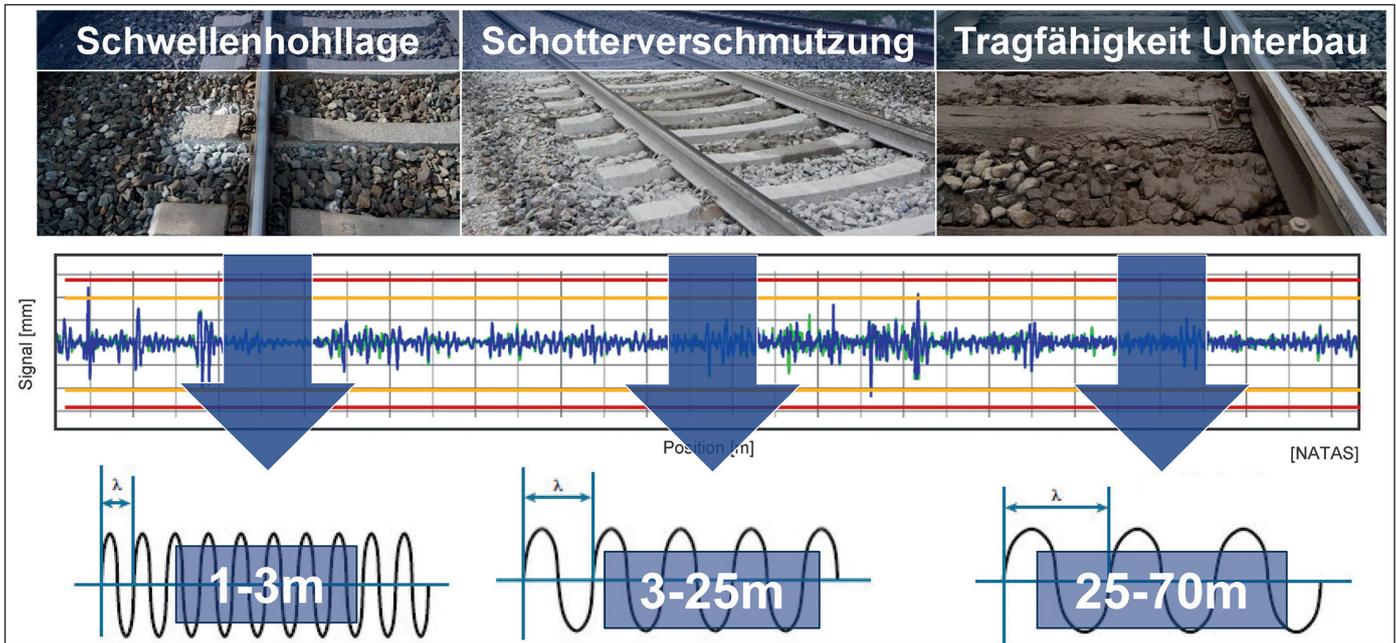


Abb. 2: Fehlerklassifizierung nach Wellenlängenbereichen in der gemessenen Längshöhe [10]

Auswertung des Längshöhenprofils mit der Fraktalanalyse ermöglicht dabei die separate Evaluierung von Schotterbett und Unterbau (Abb. 2). Mit der Standardabweichung der modifizierten Spurweite wird ergänzend der Schwellenzustand bestimmt. Zusätzlich können für die Ermittlung des Fahrwegzustands Georadarmessdaten genutzt werden, um die Mächtigkeit der einzelnen Schichten im Oberbau sowie deren Verschmutzungsgrad und Feuchtegehalt analysieren zu können [10].

Kangle Chen, M.Sc. (Technische Universität München) hielt einen Vortrag über seine Forschung am Lehrstuhl und Prüfam für Verkehrswegebau im Bereich der „Analyse lokaler Steifigkeitsschwankungen“ im Gleis. Lokale Steifigkeitsschwankungen, wie beispielsweise punktuelle Instabilitäten oder der Wechsel der Oberbauart, rufen bei Zugüberfahrt eine erhöhte Krafteinwirkung in Fahrzeug und Fahrweg hervor und können so einen negativen Einfluss auf den Fahrkomfort und die Betriebssicherheit nehmen sowie erhöhte Instandhaltungskosten bedingen. Ziel der laufenden Forschung ist es, die Interaktion Fahrzeug-Fahrweg entlang solcher Unstetigkeitsstellen zu untersuchen, um Erkenntnisse für eine fahrzeugseitige Detektion von lokalen Steifigkeitsschwankungen zu gewinnen und eine Klassifizierung derer Ursachen und Auswirkungen zu ermöglichen. Über eine Co-Simulation, welche die Finite-Elemente-Methode und die Methode der Mehrkörpersimulation koppelt, wird die Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion abgebildet. Ein zentraler Bestandteil zur Ermittlung von Gleisteifigkeit und dynamischer Schieneneinfederung in diesem Modell ist der Vergleich von Messungen der Schienenlängshöhe unter Last (aufgenommen von einem RAILab-Messzug) und der unbelasteten Schienenlängshöhe (ge-

messungen mit einem handgeschobenen Gleislaagemesssystem). Zur Validierung des Simulationsmodells werden weitere Messungen im Gleis vorgenommen, wie Georadarmessungen und Einfederungsmessungen, etwa mit einem Benkelmanbalken [3].

Dr.-Ing. Sebastian Rapp (Universität Stuttgart, Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen) gab einen Einblick in die Erforschung der „Erkennung von punktuellen Instabilitäten am Fahrweg“ im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsprojekts EPIB. Punktuelle Instabilitäten sind häufig das Resultat des Zusammenwirkens mehrerer Umstände, wie dem Vorhandensein bindiger, teils wassergesättigter Böden und einer lokal erhöhten dynamischen Einwirkung am Bahnkörper. Das ungünstige Zusammenwirken dieser Umstände kann einen selbstverstärkenden Prozess verursachen, der in einem relativ kurzen Zeitraum zu einer rapiden Verschlechterung der Gleislage führt. Ziel des Forschungsprojekts EPIB ist die frühzeitige Erkennung von punktuellen Instabilitäten mittels der am Fahrzeug kontinuierlich gemessenen Achslagerbeschleunigung. Als Vorarbeit wurde deshalb ein speziell konstruiertes Fahrzeug-Fahrwegmodell aufgebaut, mit dem Beschleunigungsverläufe für unterschiedliche Fehlerarten erzeugt werden können. Unter anderem wurden im Modell mangelhaft ausgeführte Schienenstöße sowie eine punktuelle Instabilität im finalen Zustand abgebildet. Die Anwendung verschiedener Methoden zur Identifizierung und Klassifizierung der punktuellen Instabilität im Messschrieb der Beschleunigung wurden vorgestellt. Mittels einer Kreuzkorrelation (Referenzmuster - Beschleunigungssignal) oder einer Frequenzanalyse konnte die punktuelle Instabilität

im Modell zuverlässig detektiert werden. **Dipl.-Ing. Giuseppe Staccone** (Ground Control – Geophysik und Consulting GmbH) legte die Möglichkeiten der „Kartierung von Schlammstellen auf Eisenbahnstrecken mit dem Georadarverfahren“ dar. Das Georadar ist ein geophysikalisches Verfahren, welches entlang einer Strecke kontinuierliche Informationen über den geotechnischen Zustand der Schotterbettung und der darunterliegenden Schichten liefert. Durch das Senden von elektromagnetischen Impulsen in den Boden wird anhand der Laufzeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der reflektierten Wellen der Verlauf sowie der geotechnische Zustand der Schichten im Oberbau bestimmt. Direkte Aufschlüsse sind notwendig, um die Radargramme gezielt kalibrieren zu können. Das Messsystem lässt sich leicht an Schienenfahrzeugen befestigen und auch bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten einsetzen. Das Georadar wird unter anderem seit vielen Jahren im Netz der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) zur Kartierung von Schlammstellen in der Schotterbettung und im Unterbau eingesetzt [15].

Dr.-Ing. René Kipper (Gepro Ingenieurgesellschaft mbH) stellte eine Methodik zur „Überwachung von Verformungen an Erdkörpern von Schienenfahrwegen unter der Nutzung von Gleismessdaten“ vor. Mithilfe von Längshöhendaten, gewonnen mit dem Gleismessfahrzeug RAILab (Rollendes Analyse- und Inspektionslabor), und der Längshöhe aus der Trassierung kann die Abweichung der aktuellen Gleislage berechnet werden. Über eine Fourierzerlegung wird ein Leistungsdichtespektrum erzeugt, welches hinsichtlich der charakteristischen Wellenlängenbereiche von mittel- und langwelligen Gleislagefehlern ausgewertet wird, die für Verformungen in Unterbau und

Untergrund kennzeichnend sind. Für relevante Wellenlängenbereiche der Lagefehler können schließlich die maximalen Amplituden entlang der Strecke bestimmt werden und damit eine Bewertung der Gleislageveränderung vorgenommen werden. Das entwickelte Verfahren wurde zur Überwachung der Gleislage in Weichschichtbereichen an der Strecke Berlin Gesundbrunnen – Eberswalde – Stralsund angewendet und verifiziert. Es wurde weiterhin bei der NBS Erfurt – Halle/Leipzig eingesetzt [9].

Modellierung des Untergrundes von Bahnkörpern und dynamische Stabilität des Fahrwegs

Prof. Dr.-Ing. Stavros A. Savidis (Technische Universität Berlin und GuD Consult GmbH) präsentierte Erkenntnisse aus der Forschung seines Institutes im Bereich der „elastodynamischen 3D-Simulation der Interaktion von Gleis und Untergrund“. Im DFG-Schwerpunktprogramm „Systemdynamik und Langzeitverhalten von Fahrwerk, Gleis und Untergrund“ [11] (Laufzeit von 1996 bis 2002) wurden Fragestellungen der dynamischen Boden-Bauwerk-Interaktion im Gleis bearbeitet und Methoden zur 3D-Simulation entwickelt. Eine Co-Simulation aus der Finite-Elemente-Methode und der Boundary-Element-Methode, gekoppelt mithilfe eines diskretisierten Interaktionshorizontes, lieferte das Grundgerüst. Mit dem aufgebauten Simulationsmodell konnten der Einfluss der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die dynamische Einsenkung von Gleiskörpern sowie die Ausbreitung von Scherwellen im Untergrund untersucht werden. **Prof. Dr.-Ing. Savidis** trug des Weiteren Ergebnisse aus dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekt „Praxisgerechtes Prognoseverfahren für Schienenverkeherschütterungen“ [2] vor, bei dem sein Institut die Teilaufgabe der Analyse und Integration von Minderungsmaßnahmen bearbeitete, welche in den Feldern Emission, Transmission und Immission von Erschütterungen erfolgte. Als Resultat des

Projektes wurde ein Prognosetool für Schienenverkehrserschütterungen entwickelt. Abschließend beschrieb Savidis die Perfectly-Matched-Layer-Methode zur numerischen Behandlung von Wellenausbreitungsphänomenen in unendlich ausgedehnten Medien sowie die Möglichkeit, die Methode in Finite-Elemente-Modellen zu implementieren [14].

Dipl.-Ing. Jan-Erik Fitz (Universität Stuttgart) zeigte den aktuellen Stand der Forschung am Institut für Geotechnik (IGS) zur „Entwicklung eines ganzheitlichen Simulationsmodells zur Untersuchung lokaler Instabilitäten im Schottergleis“ im Rahmen des für den Workshop anlassstiftenden DFG-Projektes. Zum Erreichen des Gesamtzieles, der Entwicklung von Verfahren zur frühzeitigen Detektion von lokalen Instabilitäten, wird am IGS ein 3-D-Kontinuumsmodell aufgebaut, um die Bettungsantwort bei Zugüberfahrt von lokalen Instabilitäten zu erhalten. Die komplexen geotechnischen Phänomene rund um die Entstehung von punktuellen Instabilitäten, im Zusammenspiel mit zyklischen und dynamischen Belastungen aus dem Zugverkehr, erfordern eine Entsprechung in der stofflichen Modellierung und den Simulationsmodellen im Ganzen. So wird die Akkumulation von Verformungen und Porenwasserdrücken in einem hochzyklischen Akkumulationsmodell abgebildet und die nichtlineare, spannungsabhängige Steifigkeit von Geomaterialien, unter Anwendung von hypoplastischen Stoffgesetzen, berücksichtigt [5].

Dr.-Ing. Silke Appel (GuD Consult GmbH) verdeutlichte den „Einfluss der Modellbildung auf die Prognose der dynamischen Gleisstabilität“. Im Rahmen des Projektes ABS Oldenburg – Wilhelmshafen wurde die dynamische Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrt gemäß der „DB Planungshilfe – Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten“ [18] untersucht. Die gleisdynamische Berechnung wurde rechnergestützt sowohl mit einem 2-D-Modell als auch mit einem 3-D-Modell durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse

wurden mit gemessenen Scherdehnungen und effektiven Schwinggeschwindigkeiten verglichen. Der Zwischenstand der Untersuchung zeigte unter anderem, dass beide Modelle, im Vergleich zu den Feldmessungen, konservative Ergebnisse liefern. In Abhängigkeit vom Bodenprofil stellen sich starke Unterschiede in den zu bewertenden Effektivwerten der Schwinggeschwindigkeiten ein. Die variierenden Prognosewerte werden unter anderem auf eine unterschiedliche Ausprägung der Frequenzinhalte zurückgeführt, welche aus der dynamischen Lastanregung resultiert [1].

Dr.-Ing. Dirk Wegener (Gepro Ingenieurgesellschaft mbH) referierte zum Thema „Untersuchungen zur dynamischen Stabilität bei Weichschichten im Unterbau von Schottergleisen“. Aufbauend auf der „DB Planungshilfe – Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten“ [16, 17] aus dem Jahr 2013, wurden Untersuchungen vorgenommen, um einerseits die vereinfachte qualitative Beurteilung von bestehenden Strecken weiterzuentwickeln und andererseits die rechnerische Nachweisführung der dynamischen Stabilität mit Messungen abzusichern. Anhand von Langzeitverformungsmessungen an zwei Projekten (Bauvorhaben Casekow – Tantow und Bauvorhaben Prenzlau – Pasewalk) wurde bestätigt, dass ein Vergleich von Scherdehnungen mit Scherdehnungsgrenzen, wie in der Planungshilfe empfohlen, als Nachweis der dynamischen Stabilität eingesetzt werden kann (Abb. 3). Eine Parameterstudie zum Einfluss der Zuggeschwindigkeit, Art der Weichschicht, deren Dicke und Überlagerung lieferte Erkenntnisse für die Weiterführung der Planungshilfe [18]. Im Zuge dessen wurden die Diagramme zur Abschätzung von als dynamisch kritisch zu bewertenden Streckenabschnitten in Abhängigkeit von den Einflussparametern in der aktuellen Versionen der Planungshilfen [4] und [18] ergänzt [20].

Dipl.-Phys. Dieter Jung (DB Engineering & Consulting GmbH) legte „Erfahrungen mit

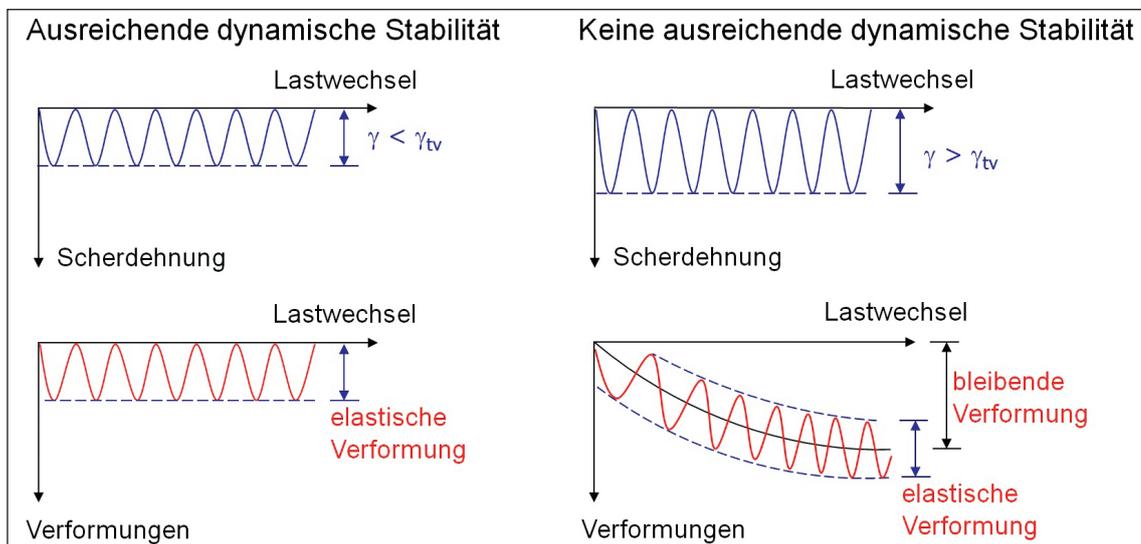


Abb. 3: Vergleich der einwirkenden mit der zulässigen Scherdehnung [20]

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU München /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DVV Media Group, 2018.

der derzeitigen Bewertung der dynamischen Stabilität“ dar und gab Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung des Verfahrens. Der derzeitige Nachweis der dynamischen Stabilität (nach [18]) mit fester Scherdehnungsgrenze nach Vucetic [6, 19] liefere keine Angabe zur Größe der Verformungen und führe im Nahbereich der Verkehrslast zu großen Fehlern bei der Ermittlung der vorhandenen Scherdehnung. Unter Einsatz des High-Cycle-Accumulation-Modells wäre eine Prognose der dynamisch bedingten Setzungen für nichtbindige Böden unter Beachtung von Einschränkungen möglich. Des Weiteren können Steifigkeitssprünge im Ober- oder Unterbau zu erhöhter dynamischer Belastung führen, wodurch lokal verstärkte Setzungen entstehen, die wiederum einen selbstverstärkenden Prozess der Gleislagerverschlechterung hervorrufen können. Jung stellte außerdem ein von ihm durchgeführtes Forschungsprojekt zur Kontakterosion unter dem Einfluss von Wechsellasten [8] vor [7].

Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein rundete die Veranstaltung mit einem Rückblick sowie einem Plädoyer für die Unabdingbarkeit von fachbereichsübergreifender Zusammenarbeit und Forschung ab. Besonders komplexe Phänomene, wie die Entstehung von Schlammstellen, erfordern eine gesamtsystemische Denk- und Herangehensweise, die Fahrzeug, Fahrweg und Unterbau mit einbezieht.

Fazit

Die vielen überzeugenden Beiträge führten zu einem regen fachlichen Austausch zwischen den Teilnehmern und verdeutlichten so die Relevanz des notwendigen Forschungsbedarfs in den vier Themenfeldern Fahrwegmonitoring, Gleisdatenanalyse, Modellierung der Interaktion von Gleis und Untergrund und Nachweis der dynamischen Stabilität von Eisenbahnfahrwegen. Obwohl die Erkennung von punktuellen Instabilitäten mit unterschiedlichen Mess- und Analyseverfahren möglich ist, ist aktuell eine zerstörungsfreie sowie frühzeitige Erkennung nicht möglich. Durch die kontinuierliche Zustandserfassung des Fahrwegs mit an Regelzügen angebrachten Sensoren entstehen enorme Datenmengen, die für eine zielgerichtete Anwendung mit entsprechenden Analysemethoden ausgewertet werden müssen. Eine Fehlerklassifizierung von Gleislagefehlern anhand der Fahrzeugreaktion ist bisher nur eingeschränkt möglich. Im Zuge des Forschungsprojekts EPIB soll deshalb durch die Ausarbeitung der Fehlercharakteristik von punktuellen Instabilitäten die Grundlage für die frühzeitige und zerstörungsfreie Identifizierung mittels kontinuierlich gemessener Achslagerbeschleunigung geschaffen werden.

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Ermöglichung des Forschungsprojekts EPIB mit dem zugehörigen Auftaktworkshop. Im Frühjahr 2020 wird zum Abschluss des Forschungsprojekts EPIB ein Abschlussworkshop an der Universität Stuttgart stattfinden. ■

QUELLEN

[1] Appel, S.; Richter, T.: Einfluss der Modellbildung auf die Prognose der dynamischen Gleisstabilität ABS Oldenburg – Wilhelmshaven. GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [2] Auersch, L.; Gerstberger, U.; Meinhardt, C.; Rucker, W.: Praxisgerechtes Prognoseverfahren für Schienenverkehrrschütterungen, Schlussbericht zum BMBF-Vorhaben Nr. 19U0039B. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Fachgruppe VII.2 Ingenieurbau, 06/2006
 [3] Chen, K.; Freudenstein, S.: Analysis of local track stiffness discontinuities. Lehrstuhl und Prüfam für Verkehrswegebau der Technischen Universität München, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [4] DB Netz AG: Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten – Vereinfachte Bewertung der dynamischen Stabilität von bestehenden Strecken. Planungshilfe, Stand Januar 31.01.2018
 [5] Fitz, J. E.; Moormann, C.: Entwicklung eines ganzheitlichen Simulationsmodells zur Untersuchung lokaler Instabilitäten im Schottergleis. Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [6] Hsu, C. C.; Vucetic, M.: Volumetric Threshold Shear Strain for Cyclic Settlement, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 130, 01/2004
 [7] Jung, D.: 1. Bewertung der dynamischen Stabilität – Schwierigkeiten und mögliche Weiterentwicklung 2. Kontakterosion unter dem Einfluss von Wechsellasten. DB Engineering & Consulting, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [8] Jung, D.: Zur Gefahr der Kontakterosion bei geschichtetem Boden unter Wechsellasten, geotechnik, Vol. 23, 4/2000
 [9] Kipper, R.: Nutzung von Gleismessdaten für die Überwachung von Verformungen an Erdkörpern von Schienenfahrwegen. GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [10] Landgraf, M.: Gleislagedatenanalyse zur Beschreibung des Fahrwegzustands. Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Technischen Universität Graz, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [11] Popp, K.; Schiehlen, W.: System Dynamics and Log-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2003
 [12] Rapp, S.; Ullrich, M.: Erkennung von punktuellen Unstetigkeitsstellen am Fahrweg am Beispiel eines Fahrzeug-Fahrwegmodells – Ansatz zur Modellbildung (EPIB 1.1). Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [13] Ripke, B.: Fahrwegmonitoring bei der DB mit Regelfahrzeugen. DB Netz AG, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [14] Savidis, S. A.; Schepers, W.; Fontana, N.: Elastodynamische 3D-Simulation der Interaktion von Fahrwerk, Gleis und Untergrund. Technische Universität Berlin und GuD Consult GmbH, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [15] Staccione, G.: Kartierung von Schlammstellen auf Eisenbahnstrecken mit dem Georadarverfahren. Ground Control - Geophysik und Consulting GmbH, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [16] Vogel, W.; Lieberenz, K.; Neidhart, T.; Wegener, D.: Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten – Qualitative Beurteilung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrt. Planungshilfe, DB Netz AG, Stand 20.08.2013
 [17] Vogel, W.; Lieberenz, K.; Neidhart, T.; Wegener, D.: Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten – Rechnerisches Verfahren zur Untersuchung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrten. Planungshilfe, DB Netz AG, Stand 20.08.2013
 [18] Vogel, W.; Wegener, D.; Hleibich, J.: Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten – Rechnerisches Verfahren zur Untersuchung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrten. Planungshilfe, DB Netz AG, Stand 31.03.2018
 [19] Vucetic, M.: Cyclic threshold shear strains in soils, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, 12/1994
 [20] Wegener, D.; Fischer, R.; Weber, T.: Untersuchungen zur dynamischen Stabilität bei Weichschichten im Unterbau von Schottergleisen. GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH und DB Netz AG, Auftaktworkshop EPIB, 03/2018
 [21] Wichtmann, T.; Triantafyllidis, Th.: Inspection of a high-cycle accumulation model for large numbers of cycles (N = 2 million). Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 75, pp 199-210, 2015



Norbert Lillin, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Prüfam für Verkehrswegebau der Technischen Universität München
 norbert.lillin@tum.de



Dr.-Ing. Sebastian Rapp

Akademischer Mitarbeiter am Institut für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart
 sebastian.rapp@ievwwi.uni-stuttgart.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein

Ordinarius des Lehrstuhls für Verkehrswegebau und Direktor des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München
 stephan.freudenstein@tum.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin

Professor und Direktor des Instituts für Eisenbahn- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart sowie Direktor des Verkehrswissenschaftlichen Instituts der Universität Stuttgart
 ullrich.martin@ievwwi.uni-stuttgart.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann

Ordinarius und Direktor des Institutes für Geotechnik an der Universität Stuttgart
 christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

Raten oder Radar?

- Georadamessung und -analyse
- Zustandsbezogene Instandhaltungsplanung
- Seit 25 Jahren weltweit im Einsatz

SAFERAILSYSTEM.COM