



© 2019 Stadler Rail

Entwicklungen in der Schienenfahrzeugklimatisierung

Trends in HVAC of Railway Rolling Stock

Sensorschwellentechnologie: Ein Blick zwischen Schwelle und Schotter

Sensor Sleeper Technology:
Looking Between Sleeper and Ballast



Einsatz von umweltneutralen Kältemitteln in Bahnklimaanlagen

Use of Environmentally Neutral Refrigerants
in Rail HVAC Systems

Der Einfluss eingebrachter Traktionsenergie auf den Schienenverschleiß

The Influence of Traction Energy Input on Rail Wear



© ALSTOM SE 2023

Sprachbarrieren im europäischen Schienengüterverkehr

Language Barriers in European Rail Freight Transport

Neubaustrecke Wendlingen – Ulm: Messtechnischer Nachweis von Berührungsspannungen

New Railway Line Wendlingen – Ulm:
Proof of Touch Voltages by Measurements

Sensorschwellentechnologie: Ein Blick zwischen Schwelle und Schotter

Sensor Sleeper Technology: Looking Between Sleeper and Ballast

Michael Sehner MSc, Ing. Andreas Augustin, Dipl.-Ing. Martin Quirschmair, Dr. Harald Loy, Bürs (Österreich)

Zusammenfassung

Die fortschreitende Mobilitätswende führt zu neuen Herausforderungen im Bahnverkehr bzgl. Kapazität und Verfügbarkeit des Streckennetzes. Das Ziel der Getzner Werkstoffe GmbH ist die ständige Verbesserung des Eisenbahnoberbaus mittels elastischer Elemente, damit dieser möglichst zuverlässig und wartungsarm ist. Dieser Artikel beschäftigt sich mit der Sensorschwelle, einem neuen Werkzeug für Forschung, Entwicklung und Zustandsüberwachung. Die Sensorschwellentechnologie erlaubt einen direkten Blick in die kritische Schnittstelle zwischen Schwelle und Schotter und misst direkt die dort auftretenden Pressungen (Kräfte) zwischen der Schwellenunterseite und den einzelnen Schottersteinen. Es werden die Vorteile und Möglichkeiten der Technologie für die Weiterentwicklung des Eisenbahnoberbaus hervorgehoben, sowie Ergebnisse von Forschungsprojekten gezeigt, in denen die Sensorschwelle verwendet wurde.

Abstract

The progressive mobility shift is leading to new challenges in rail transport with regard to capacity and availability of the route network. The aim of Getzner Werkstoffe GmbH is to continuously improve the railway superstructure using elastic elements so that it is as reliable and low-maintenance as possible. This article deals with the Sensor Sleeper, a new tool for research, development and condition monitoring. The sensor sleeper technology allows a direct view into the critical interface between sleeper and ballast and directly measures the pressures (forces) occurring there between individual ballast stones and the underside of the sleeper. The advantages and possibilities of the technology for the further development of the railway superstructure are highlighted, and results of research projects in which the sensor sleeper was used are shown.

1 Einleitung

Bahnbetreiber, Universitäten und die Industrie beschäftigen sich intensiv mit der Weiterentwicklung des Systems Eisenbahn [1]. So forscht auch Getzner Werkstoffe an Themen wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltung und Sicherheit des Eisenbahnoberbaus vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen und ökologischen Nachhaltigkeit und bedient sich dafür einer Vielzahl von Methoden. Wirtschaftliche Modelle geben Auskunft über die Lebenszykluskosten (LCC). In

der Technik werden Simulationen (Digital Twin – virtuelles Abbild eines Objekts oder Systems aus der realen Welt), Laborprüfungen, Teststrecken und moderne Messmethoden im Gleis genutzt, um Produkte sowie Technologien zu entwickeln und zu verbessern. Diese Forschungen finden im Rahmen von internationalen Initiativen wie dem europäischen Shift2Rail-Projekt statt oder werden von Förderprogrammen wie der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft unterstützt. Diese innovationsfreundlichen Rahmenbedingungen haben die Ent-

wicklung der Sensorschwellentechnologie erleichtert.

Seit der Umstellung von Holz- auf Betonschwellen, ist der Schotter die schwächste Komponente im Schotteroberbau. Schienen, Schwellen und Schienenbefestigungssysteme haben in der Regel eine längere Lebensdauer. Daher besteht der Ansatz von Getzner im instandhaltungsoptimierten Oberbau darin, den Schotter zu schonen, damit Veränderungen in der Gleislage über die Zeit möglichst klein gehalten werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden spezielle PUR-Elastome-



Bild 1: Aus drei Elementen bestehende Sensorschwelle beim Einbau in das Gleis

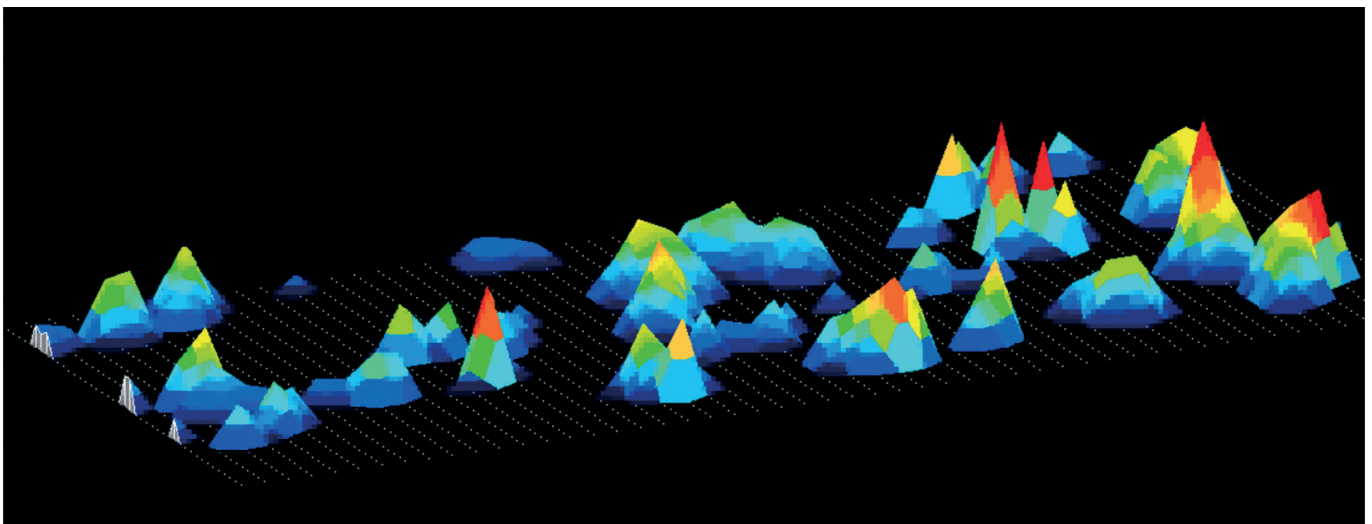


Bild 2: Visualisierte gemessene Pressungen einzelner Schottersteine

re verwendet. Mit ihnen wird direkt und positiv Einfluss auf die Lastabtragungseigenschaften genommen, unabhängig davon, ob sie zwischen Schiene und Schwelle, Schwelle und Schotter oder unterhalb des Schotters eingesetzt werden. Die besten Erfolge hinsichtlich Stabilisierung und Kräfte- und Vibrationsreduktion im Schotteroberbau, sind in der Regel direkt in der Grenzschicht von Schwelle zu Schotter mit Schwellenbesohlungen zu erzielen [2]. Das Verständnis hinsichtlich dieser Grenzschicht ist also von großer Wichtigkeit, wodurch sich der Bedarf ergibt, diese Ebene sichtbar zu machen und messtechnisch zu erfassen.

2 Technologie der Messungen

Bisher standen für die Messung in der Grenzschicht Schwelle zu Schotter unterschiedliche indirekte Messmethoden zur Verfügung. Vibrationen und Einsenkungen lassen Schlüsse auf die elastischen Eigenschaften sowie die Gleislagequalität zu und Kräfte können mit Hilfe von Dehnungen und Spannungen abgeschätzt werden. Eine direkte Messung von Kräften im Lastabtragungspfad bedeutete gerade unter der Schwelle einen großen Eingriff in die Eigenschaften des Oberbaus und war aufgrund der schlechten

Beständigkeit der Sensorik allenfalls für kurze Experimente möglich [3]. Die Sensorschwelle löst dieses Problem auf eine innovative Art und Weise [4]. Sie weist eine Reihe von nachfolgend beschriebenen Eigenschaften auf, die sie zu einem verlässlichen Messinstrument für den Eisenbahnoberbau mit seinen rauen Umgebungsbedingungen macht.

Die Sensorschwelle (*Bild 1*) erlaubt es, die Pressungen einzelner Schottersteine (*Bild 2*) direkt in der Schnittstelle von Schwelle zu Schotter auf der Schwellenunterseite mit einer Auflösung/Pixelgröße von 4,7 mm x 9,3 mm zu messen. Sie besteht aus mehreren Sensor-

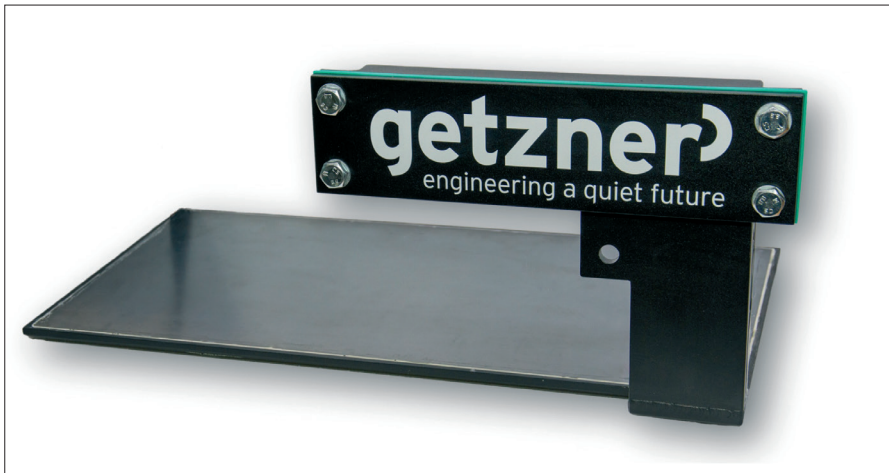


Bild 3: Sensorelement

Daten schnell und leicht zugänglich gemacht und direkt weiterverarbeitet werden. Dies erlaubt es, die Messdaten in einem weiteren Schritt mit anderen, teilweise frei verfügbaren Datensätzen wie Temperatur, Vibration oder Dehnungen zu verknüpfen. Das Reporting kann dann in Berichtsform oder ebenfalls kontinuierlich mit einem Cloud-Dashboard (Bild 4) erfolgen. Ein weiterer Vorteil eines Fernzugriffs ist, dass der Gefahrenraum Gleis für die Messung nicht von Personen betreten werden muss.

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Möglichkeiten einer kontinuierlichen Datenaufzeichnung. Um Langzeitentwick-

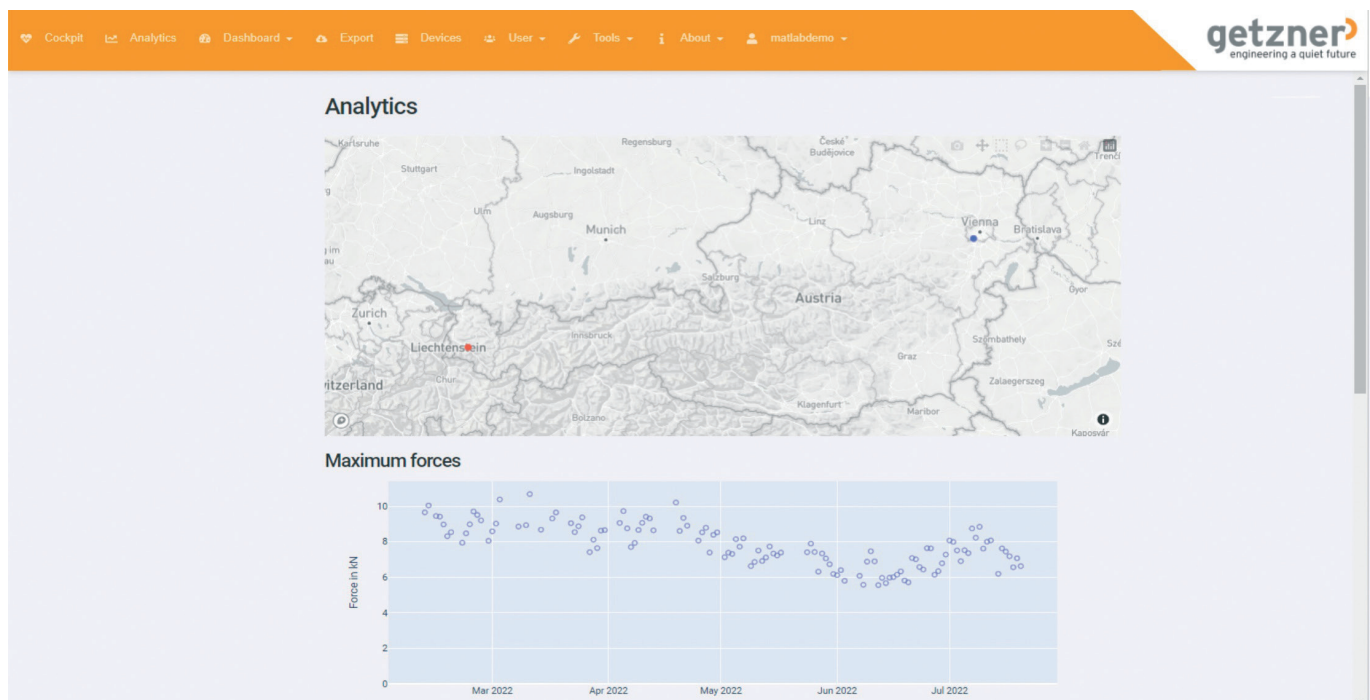


Bild 4: Dashboard mit Übersicht über verschiedene Assets und Lastentwicklung über die Zeit

elementen (Bild 3) mit einer Größe von ca. 55 cm x 28 cm, die nur wenige Millimeter (3 bis 5 mm) dünn sind. Der Einfluss der Messtechnologie auf das Gesamtsystem Eisenbahnoberbau wird dadurch minimiert. Der stabile Aufbau der Sensorik erlaubt es, dass die Sensorschwelle wie jede andere Schwelle eingebaut und gestopft werden kann. Somit ist es möglich, realistische Einbaubedingungen zu schaffen – die Grundlage für qualitativ hochwertige Messergebnisse. Das System ist so widerstandsfähig, dass Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen und hohe dynamische Kräfte aus dem Rad-Schiene-Kontakt keinen negativen Einfluss auf die Messergebnisse haben,

was Beobachtungen über mehrere Jahre zulässt. Gleichzeitig können mit der Sensorschwellentechnologie auch dynamische Vorgänge, die nur Sekundenbruchteile dauern, analysiert werden. Dabei spielt es keine Rolle, ob einzelne Schottersteine oder komplexe Systeme wie ganze Weichen betrachtet werden. Neben der exakten quantitativen Auswertung und Interpretation der Messdaten ermöglicht die bildliche Darstellung mittels Farbcode zusätzlich eine schnelle, intuitive Erfassung der Belastungssituation (Bild 2). Um die Messdaten besser und ausführlicher zu nutzen, können diese kontinuierlich erfasst und in einer Cloud gespeichert werden. Auf diese Art können die

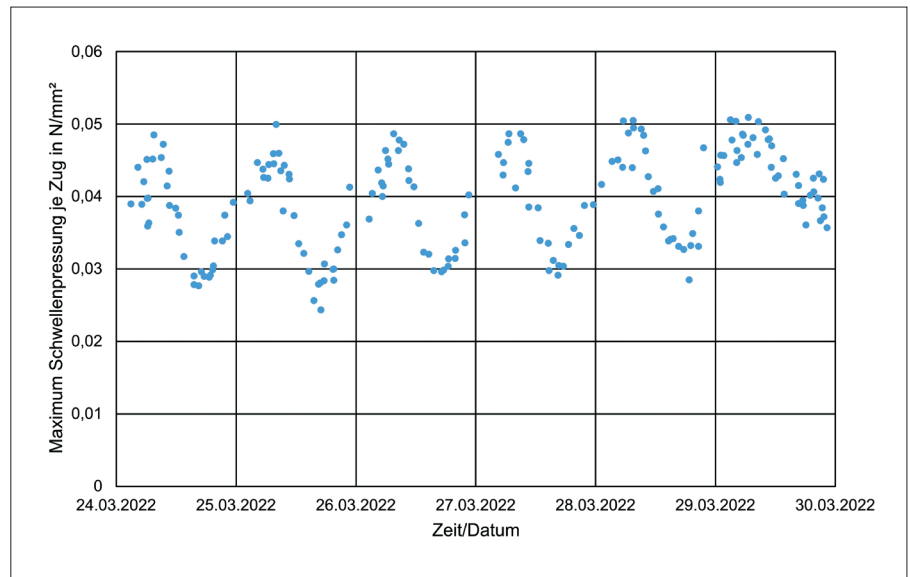
lungen darzustellen, wurden die maximalen Schwellenpressungen (Durchschnittswert über die Sensorfläche) in einzelnen Sensorelementen für jede Zugüberfahrt ermittelt. Erwartet wurde eine langsame Änderung der Messwerte über mehrere Wochen oder Monate, zum Beispiel aufgrund von Setzungen des Fahrwegs. Stattdessen konnten über einen Tag verteilt Schwankungen von $\pm 25\%$ um einen Mittelwert beobachtet werden (Bild 5). Die Amplitude der Veränderungen ist so groß, dass sie sich nicht durch Veränderungen im Sensor selbst, zum Beispiel durch schwankende Temperaturen, erklären lässt. Je nach Sensorelement und Position auf der Schwelle sind die Änderun-

gen zudem unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Kraftänderungen sind also tatsächlich auftretende Tagesgänge, die mithilfe der kontinuierlichen Datenaufzeichnung gefunden wurden (Bild 5). Der Ursprung dieser Schwankungen ist derzeit nicht endgültig geklärt und Gegenstand laufender Untersuchungen. Bei einer kurzen Messung über wenige Stunden wäre dies unerkannt geblieben.

3 Forschungsergebnisse

Die Vielseitigkeit des Messsystems hat bereits verschiedenste Untersuchungen im Labor und im Gleis möglich gemacht. Je nach Aufgabenstellung werden dafür mehrere Sensorelemente an der Unterseite der Schwelle angebracht.

Zum Beispiel wurde im Labor der Effekt von Schwellenbesohlungen auf die Schotterkontaktpressungen zwischen Schwelle und Schotter sichtbar gemacht und gemessen. Bild 6 zeigt einen Vergleich zwischen einer Schwelle ohne Besohlung und einer Schwelle mit einer PUR SLB3007-Schwellenbesohlung. Die Aufzeichnung entstand bei einem Ganzschwellentest, angelehnt an die EN 16730:2016(E) mit einer dynamischen Belastung zwischen 5 kN und 100 kN. Die ermittelten Spitzenpressungen, bei denen die Medianwerte der acht höchsten Pressungswerte verglichen wurden, waren mit Besohlung um 75 % kleiner als ohne Besohlung. Die gemittelte Schotterkontaktpressung, die berechnet wurde, indem die Gesamtkraft durch die belastete Sensorfläche dividiert wird, war ebenfalls um 76 % kleiner. Bild 7 zeigt das Pressungshistogramm bei Maximalkraft. Es ist dargestellt, welche Kraftanteile bei bestimmten Pressungen abgetragen werden. Werden mehr Kraftanteile bei hohen Pressungen abgetragen, führt dies zwangsläufig zu einer größeren Schotterzerstörung. Zusätzlich sind die kumulierten Kräfte

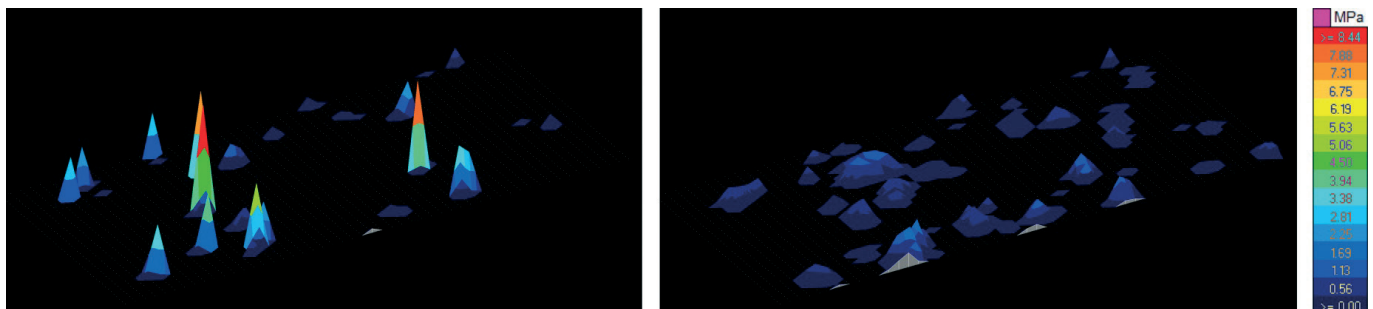


■ Bild 5: Tagesgänge der maximalen Schwellenpressung für jeden Zug über 6 Tage

dargestellt. Ohne Schwellenbesohlung wurden 80 % der Gesamtkraft bei Pressungen $\leq 7,6 \text{ N/mm}^2$ abgetragen. Im Fall der besohnten Schwelle liegt dieser Wert deutlich niedriger bei $\leq 1,05 \text{ N/mm}^2$. Die Pressungen sind somit bei der besohnten Schwelle deutlich niedriger und homogener auf den Schotter verteilt, was zu einer stark verbesserten Schotterschonung führt.

Bei einer anderen Messkampagne wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts die Lastabtragungseigenschaften von Schwellen mit verschiedenem Schwellendesign bei Zugüberfahrt ermittelt. Bei den zu untersuchenden Schwellendesigns handelte es sich einerseits um die gut erprobte, besohlte Schwelle mit der L2-Schwellengeometrie mit einer Länge von 2,6 m und andererseits dem innovativen, neuen Schwellendesign der besohnten Schwelle mit der L17-Schwellengeometrie mit einer Länge von nur 2,4 m. Zur Untersuchung des Lastabtragungsverhaltens wurden je drei aufeinanderfolgende Schwellen halbsseitig, unter Annahme einer symmetrischen Lastabtragung, mit zwei Sensorele-

menten ausgestattet. Anschließend wurde die maximale Schwellenpressung bei Überfahrt einer Lokomotive mit ca. 22 t Radsatzlast ermittelt. Für die Auswertung wurde jedes Sensorelement in drei annähernd gleich große Teile unterteilt und die ermittelte Schwellenpressung als Funktion vom Abstand zur Schwellenmitte dargestellt. Aus den Mittelwerten der drei Schwellen ergab sich das in Bild 8 dargestellte Ergebnis. Die Pressungsbilder lassen erkennen, dass die besohlte, kürzere L17-Schwelle erwartungsgemäß etwas höhere Pressungen im Bereich des Schienenauflagers und des Schwellenendes aufweist, da gesamthaft eine geringere Auflagefläche zur Verfügung steht. Richtung Schwellenmitte hin zeigt das neue Design einen sehr ähnlichen Pressungsverlauf wie die erprobte, vollbesohlte L2-Schwelle. Ergänzt wurden die ermittelten Pressungsdaten mit Ergebnissen von Verformungsmessungen an den Schwellenenden und in Schwellenmitte (Schwellenbiegung). Die Verformungsmessungen zeigten eine gleichmäßigere Gesamtschwelleneinsenkung bei der L17-Schwelle im Vergleich zur L2-Schwelle.



■ Bild 6: Vergleich von Pressungen unter einer Schwelle, links ohne Besohlung und rechts mit einer PUR SLB3007-Schwellenbesohlung

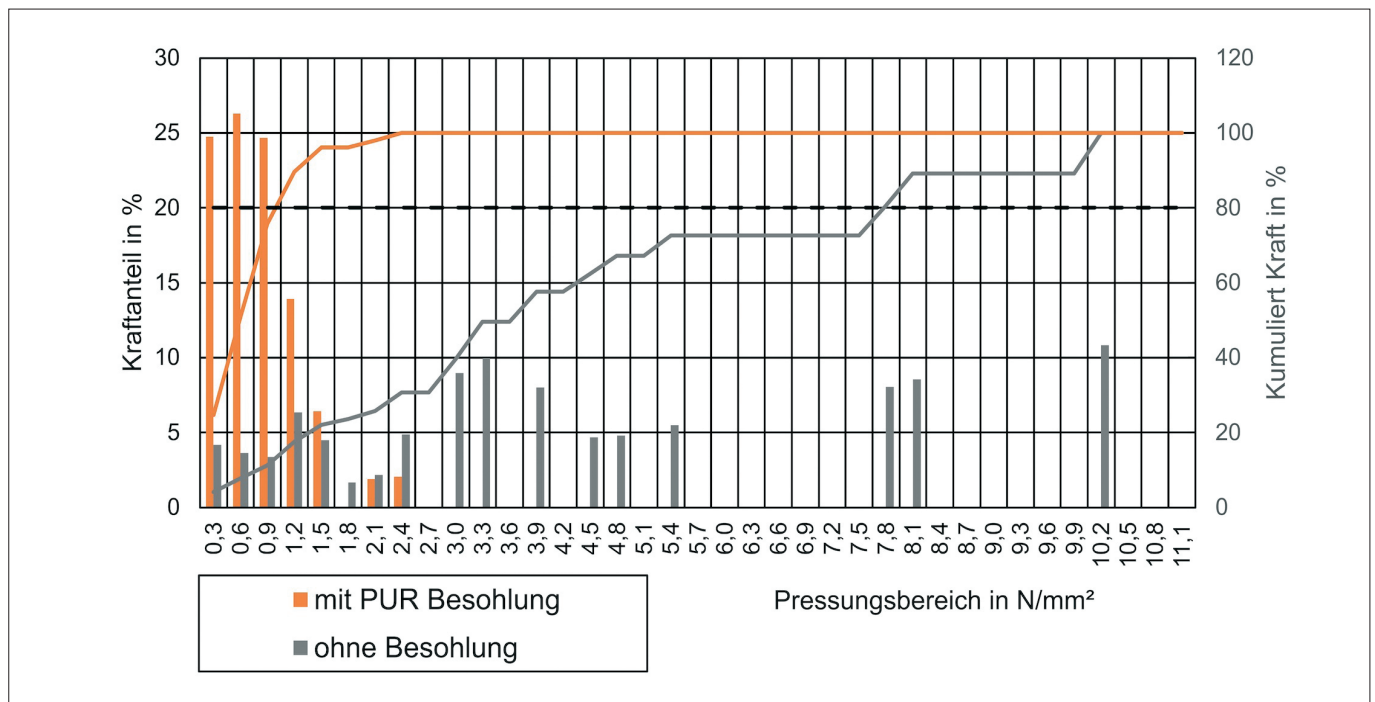


Bild 7: Pressungshistogramm bei Maximalkraft

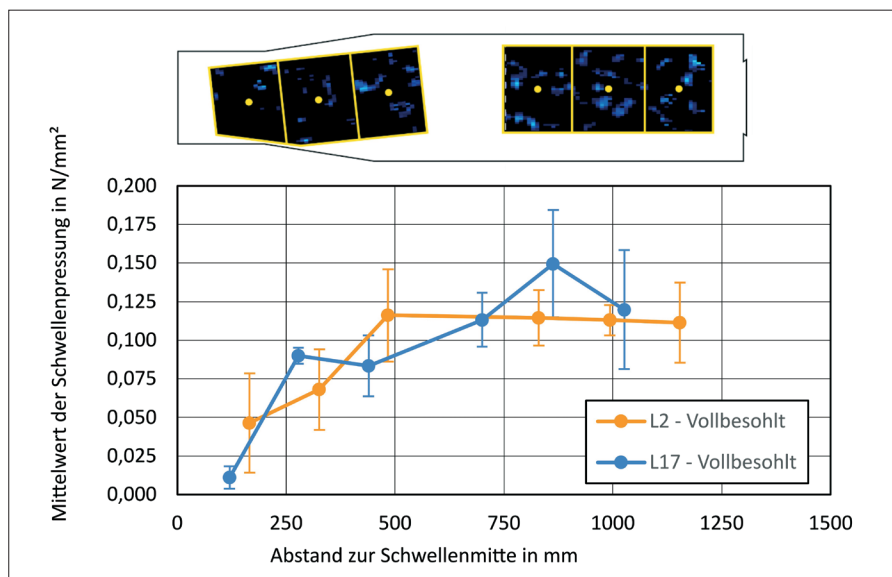


Bild 8: Lastverteilung zweier beschlter Schwellentypen (Mittelwerte aus drei Schwellen)

Die Betrachtung und Interpretation beider Messgrößen (Verformung und Pressungsverteilung) bestätigten, dass sich das neue Schwellendesign gemäß der theoretischen Berechnung verhält und somit im Feld validiert ist. Damit ist auch erwiesen, dass sich die Sensorschwellentechnologie bestens eignet, um Systemeigenschaften von Schwellen punktgenau und direkt zu messen und deren Lastabtragung zu charakterisieren.

Diese ersten Anwendungen haben gezeigt, wie die Sensorschwelle zur Charakterisierung von Oberbaukomponenten und gan-

zen Oberbausystemen verwendet werden kann. Ein drittes Beispiel zeigt, wie damit auch Instandhaltungsmaßnahmen untersucht werden können. Bei einer mit drei Sensorelementen ausgestatteten Schwelle (Bild 9 (a)) wurde festgestellt, dass diese hohl im Schotterbett aufliegt, woraufhin eine Stopfung veranlasst wurde. Die Bettungssituation einer Schwelle hat einen direkten Einfluss auf ihr dynamisches Verhalten und ihre Einsenkung bei Zugüberfahrt. Die Pressungsverteilung an der Schnittstelle von Schwelle zu Schotter vor und nach dem Stopfen ist in Bild 9 (b)

und Bild 9 (c) dargestellt. Bild 10 zeigt das Zeitsignal der über die Sensorfläche gemittelten Schwellenpressung bei Zugüberfahrt. Die Veränderung der Schwellenbettung durch den Stopfvorgang ist sowohl in der Pressungsverteilung wie auch in der absoluten Größe der Zeitsignale deutlich erkennbar. Darüber hinaus ist auch eine Messung während des Stopfvorgangs technisch möglich.

4 Zusammenfassung

Insgesamt wurden bis dato 54 Sensorelemente verteilt auf 18 Sensorschwellen in verschiedenen Anordnungen im Feld verbaut. Die Sensoren liefern nach wie vor verwertbare Daten. In Kombination mit der remote Datenübertragung in eine Cloud ist die Sensorschwelle ein modernes Forschungs-, Mess- und Monitoringsystem, das für viele Messaufgaben verwendet werden kann. Bisher wurden mit ihr Komponenten und Oberbauvarianten verglichen und validiert. Die Sensorschwellentechnologie kann in der Grundlagenforschung verwendet werden, um die Basis für die Entwicklung neuer Komponenten und Methoden zu schaffen. Die größte Stärke der Sensorschwellentechnologie ist, dass Schotterkontaktpressungen in der heiklen Schnittstelle zwischen Schwelle und Schotter direkt unter realistischen Einbaubedingungen gemessen werden können. Um die auf-

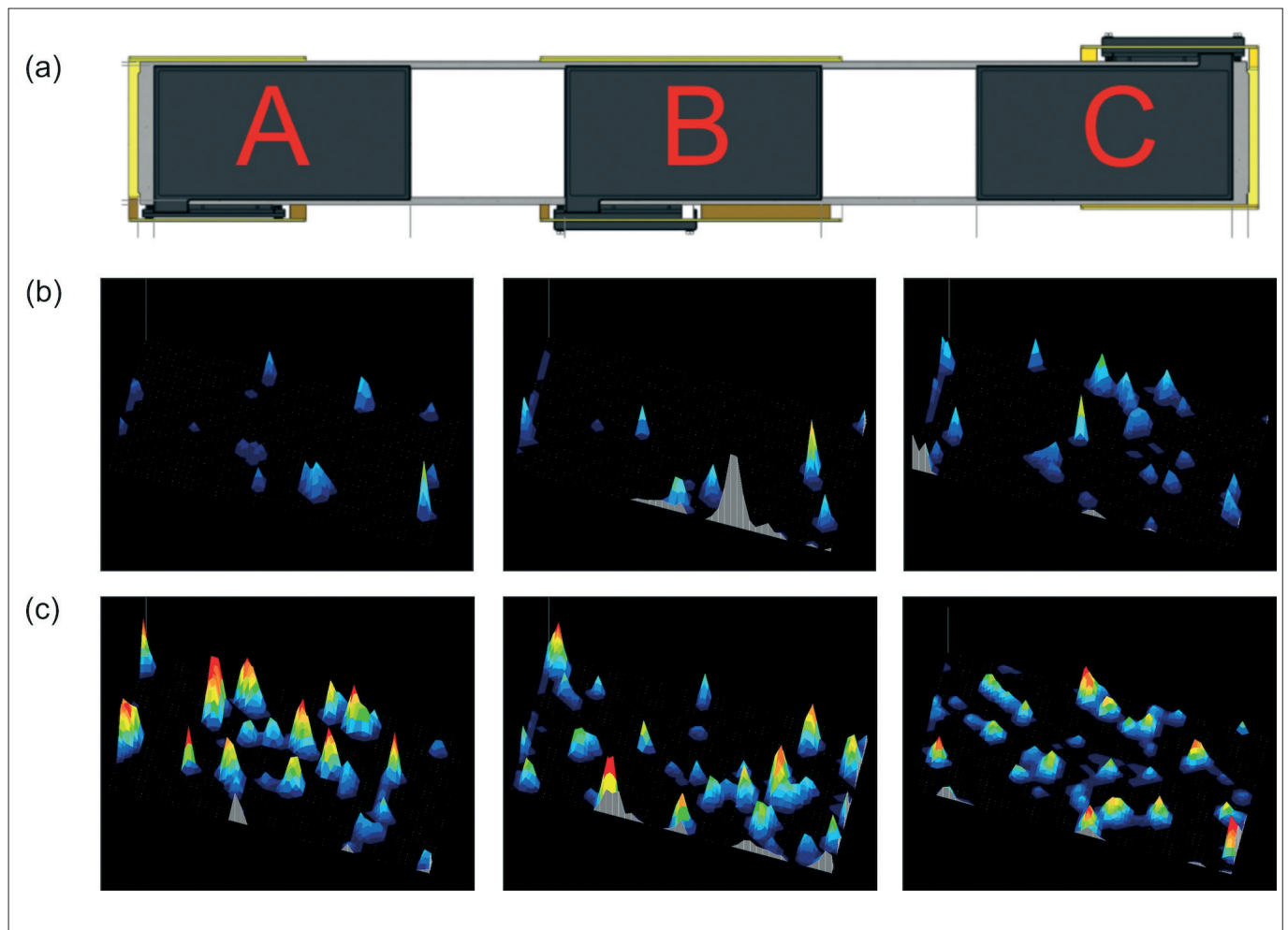


Bild 9: (a) Verteilung der Sensoren auf der Schwellenunterseite; Pressung unter einer Sensorschwelle (b) vor und (c) nach dem Stopfvorgang

tretenen Belastungssituationen auf einfache und intuitive Art und Weise beurteilen zu können, bietet die Technologie neben der qualitativen Auswertung zusätzlich die Möglichkeit, die Pressungsverteilungen als farbcodierte Bilder darzustellen.

Ein weiterer Vorteil der Messkette mit remote Datenzugriff ist, dass auch aus weit entfernten Gebieten kontinuierlich Messdaten übertragen und ausgewertet werden können. Der Personalaufwand, der bei aufwändigen und langen Messkampagnen oft erheblich ist, wird hierdurch deutlich reduziert. Weniger Gleiszutritte bedeuten gleichzeitig eine Erhöhung der Sicherheit für das Personal.

Über die genannten Beispiele hinaus sind noch viele andere Anwendungen für die Sensorschwellentechnologie denkbar. Kritische Oberbausysteme bzw. Hot Spots wie Weichen, Übergänge, Isolierstöße oder enge Bögen können an ihrem schwächsten Interface (zum Schotter hin) überwacht werden. Die Auflagesituation einer Weiche, zum Bei-

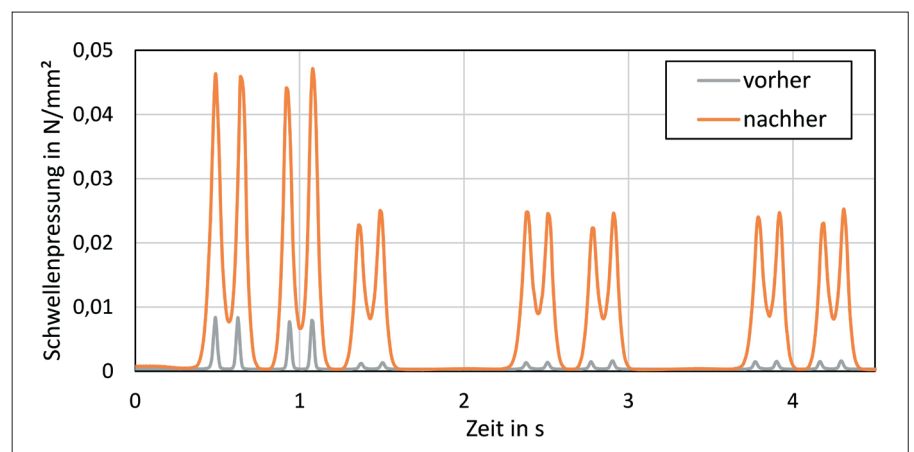


Bild 10: Zeitsignal der gemittelten Schwellenpressung bei Zugüberfahrt (Lokomotive + Wagen) vor und nach dem Stopfvorgang

spiel im kritischen Bereich des Herzes, ist somit kontinuierlich messbar und damit immer bekannt. Dieses Wissen kann für vorausschauende Instandhaltung und Sicherheitsthemen verwendet werden [5].

Gerade die Kombination aus der Messung in einer wichtigen Schnittstelle mit

den beschriebenen Funktionalitäten und Möglichkeiten lässt vermuten, dass noch viele weitere Anwendungen hinzukommen werden.

#866_A3

(Bildnachweis: 1 bis 10, Verfasser)

Literatur

- [1] Austria-Forum der TU Graz, erstellt am 12.08.2021. https://austria-forum.org/af/Wissenssammlungen/Neues_aus_der_Wissenschaft/Alles_auf_Schiene_Forschung_rund_um_die_Eisenbahn_an_der_TU_Graz, abgerufen am 22.03.2022.
- [2] Loy, H., Augustin, A.: Pushing the limits of ballasted track – PUR pads protect heavy freight corridors. Railway Gazette International, September 2014.
- [3] Mc Henry, Michael T.: PRESSURE MEASUREMENT AT THE BALLAST-TIE INTERFACE OF RAILROAD TRACK USING MATRIX BASED TACTILE SURFACE SENSORS. Thesis and Dissertation 2013, University of Kentucky, Civil Engineering.
- [4] Loy, H. et al.: Switches & crossings: defined elasticity for new turnout designs. Railway Engineering International 2022.
- [5] Iliev, D. L.: Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch beschlachten Schwellen. Dissertation 2011, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verkehrswegebau.



Michael Sehner MSc (33). Studium der Physik an der Universität Innsbruck mit Master in Experimentalphysik im Feld der Quantenoptik. Seit 2016 tätig als Entwicklungsingenieur in der Forschung und Entwicklung bei Getzner Werkstoffe GmbH

in den Bereichen Produktentwicklung und Messtechnik; verantwortlicher Ingenieur für die Sensorschwellentechnologie, die seit 2018 entwickelt wurde.

Anschrift: Getzner Werkstoffe GmbH, Herrenau 5, 6706 Bürs, Österreich.

E-Mail: michael.sehner@getzner.com



Ing. Andreas Augustin (46). Besuch der Höheren Technischen Bundeslehranstalt für Maschinenbau und Automatisierungstechnik in Bregenz; berufsbegleitender Studiengang der Integrierten Produktentwicklung IPD an der Fachhochschule

Dornbirn. Seit 1997 Tätigkeit als Konstrukteur im Maschinenbau. Ab 2000 Qualitätsingenieur in Forschung & Entwicklung. Nachfolgend verschiedene Führungspositionen im Qualitätswesen, der Entwicklung und der Geschäftsleitung bei der Getzner Werkstoffe GmbH; seit 2018 in der Unternehmensentwicklung.

Anschrift: Getzner Werkstoffe GmbH, Herrenau 5, 6780 Bürs, Österreich.

E-Mail: andreas.augustin@getzner.com



Dipl.-Ing. Martin Quirschmair (39). Studium der Technischen Physik an der Technischen Universität Wien. Seit 2013 Entwicklungsingenieur bei Getzner Werkstoffe GmbH mit Schwerpunkt Oberbauoptimierung und Schwingungsreduktion im

Eisenbahnoberbau mittels Elastomeren. Von 2015 bis 2017 als Projektmanager Railway für Getzner USA Inc. in Charlotte, North Carolina, tätig. Seit 2018 Entwicklungsingenieur in der Railway Division und u. a. Verantwortlicher für internationale Forschungsprojekte (z.B. Horizon 2020 – Shift2Rail), Fahrweg-Simulationen, Messungen im Gleis, Koordination von Laboruntersuchungen und die Produktgruppe Schwellenlager.

Anschrift: Getzner Werkstoffe GmbH, Herrenau 5, 6706 Bürs, Österreich.

E-Mail: martin.quirschmair@getzner.com



Dr. Harald Loy (48). Bauingenieurstudium an der Technischen Universität München, später Promotion an der Universität Innsbruck mit Auszeichnung. Ab 2000 Technischer Berater in München. Seit 2005 Entwicklungsingenieur bei Getzner Werkstoffe GmbH im Bereich Forschung & Entwicklung.

Von 2007 bis 2011 parallele Anstellung als Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Innsbruck und derzeit Postdoc am Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme. Schwerpunkte der Tätigkeit in den Bereichen Simulation, Laborprüftechnik und In-Situ-Messungen. 2014 Nominierung für den Staatspreis für Innovation, Übernahme der Verantwortung als Leiter Team Systementwicklung. Seit 2018 Head of R&D Railway Division.

Anschriften: Getzner Werkstoffe GmbH, Herrenau 5, 6706 Bürs, Österreich und Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Intelligente Verkehrssysteme, Technikerstr. 13, 6020 Innsbruck, Österreich.

E-Mail: harald.loy@getzner.com