

Zur Reduktion der Schlupfwellenbildung

Konstruktive Möglichkeiten zur Verzögerung der Schlupfwellenbildung an den bogeninneren Schienen in engen Gleisbögen

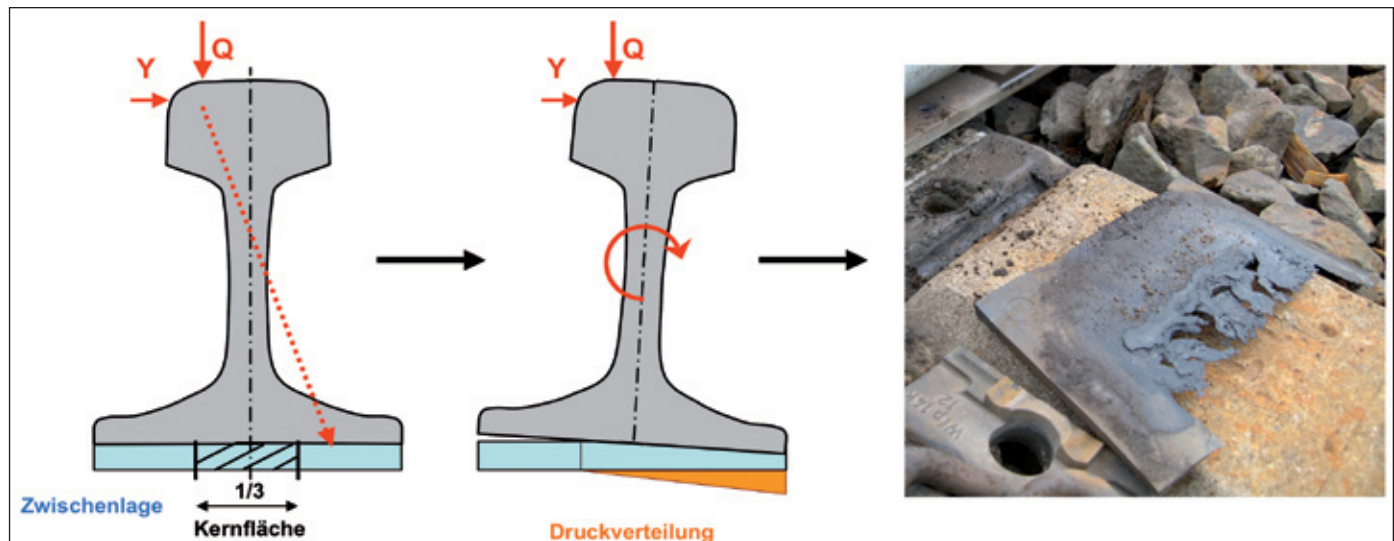


Abb. 1: Hohe Randpressungen bei Zwischenlagen in Gleisbögen

Florian Auer

Bedingt durch die österreichische Topografie weist das Netz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) einen hohen Anteil an Bogengleisen auf. Viele Strecken wurden mit einem Regelbogenradius zwischen 250 und 300 m trassiert.

Die durch den Bogenlauf verursachten zusätzlichen Lateralkräfte und Biegemomente führen in Gleisbögen zu überproportionaler Beanspruchung der Gleiskomponenten und bedingen verschiedene Verschleißerscheinungen, die in geraden Gleisen nicht auftreten.

Die bogenäußeren Schienen in Bögen mit einem Radius $R < 600$ m erfahren einen erhöhten Seitenverschleiß, die bogeninneren Schienen zeigen häufig eine verstärkte Neigung zur Schlupfwellenbildung. Die dynamischen Verformungen des Gleisrosts infolge der Schlupfwellenbildung führen zu vermehrtem Schwellenrisswachstum, auch der Schotter wird teilweise überbeansprucht. Schlupfwellenbehaftete Bogengleise sind auch bis zu 15 dB lauter. Durch die lateralen Bogenlaufkräfte verursacht, kommt es auch zu einem erhöhten Verschleiß der seitlichen Schienenfußführungselemente. Infolge des Schienenkippens erfahren die Schienenzwischenlagen an den Rändern eine höhere Pressung, wodurch die Zwischenlagen in Bögen verfrüht einseitig verschleifen.

In den vergangenen Jahren ist eine generelle Tendenz zu erkennen, Gleise elastischer zu dimensionieren. Die Beanspruchung der unter der Schiene liegenden Gleiskomponenten wird über eine bessere Lastverteilung durch vermehrte, jedoch gleichmäßige Beanspruchung des Trägers Schiene reduziert. Verschiedene Gründe, u. a. die Zunahme an Rollkontaktermüdungsproblemen sowie die Reduktion der Schlupfwellenbildung, bedingen in Bögen den Einsatz der kopfgehärteten Stahlsorte R 350 HT.

In diesem Artikel wird speziell der Einfluss von elastischen Gleiskomponenten auf die Hemmung der Schlupfwellenbildung in engen Gleisbögen untersucht.

Konstruktionsänderungen

Bogengleise werden bei den Österreichischen Bundesbahnen bis zu einem unteren Grenzradius von $R = 250$ m lückenlos verschweißt (gilt für Betonschwellen). Aufgrund von Life-Cycle-Cost-Betrachtungen (Thema Nachhaltigkeit) wird seit ca. 30 Jahren der Einsatz der Betonschwellen im Hauptnetz und damit auch in engen Gleisbögen forciert. Leider konnten die Standzeiten von verschiedenen Komponenten, insbesondere der Schienenbefestigung, anfangs nicht mit den Ziel-Nutzungsdauern der Betonschwellen von 40 Jahren und mehr mithalten. Die Gleisbauingenieure mussten im Laufe der Zeit mehrfach Konstruktionsänderungen an den Befestigungselementen durchführen.

Zwar war der Querverschiebewiderstand bei den eingesetzten Betonschwellen stets ausreichend dimensioniert, jedoch wiesen einzelne Befestigungselemente teilweise einen deutlich erhöhten Verschleiß und damit zu kurze Standzeiten auf. Möglicherweise hat man sich zu früh von der robusten und bewährten Rippenplattenkonstruktion getrennt. Die Nachfolgebefestigungen und die Hermann-Meier-Befestigung, die spätere Direkt- bzw. W-Befestigung, bringen zwar mehrere – vor allem preisliche – Vorteile mit sich, für den Einsatz im engen Gleisbogen waren sie zu Beginn jedoch noch nicht dauerhaft ausgelegt (siehe [1] und [2]).

Ein Aspekt kommt besonders zum Tragen: Die lateralen Führungskräfte der Räder bewirken im Gleisrost eine zweiteilige Zusatzbeanspruchung. Die Resultierende, aus der vertikalen Radkraft Q und der horizontalen Führungskraft Y , kommt in Bögen oftmals neben der Kernfläche der Zwischenlage zu liegen (Abb. 1). Das System aus Spannklemmen und Zwischenlagen muss demnach neben der Aufnahme der Lateralkräfte in der Schienenfußebene auch für das elastische Kippen der Schiene samt Abheben des zur Gleismitte zeigenden Schienenfußteiles ausgelegt sein. Speziell steife Zwischenlagen erfahren in Bögen dadurch hohe Randpressungen und verschleifen frühzeitig. Bei hoher Verkehrsdichte müssen die bei den ÖBB vormals als Standard verwendeten Zwischenlagen

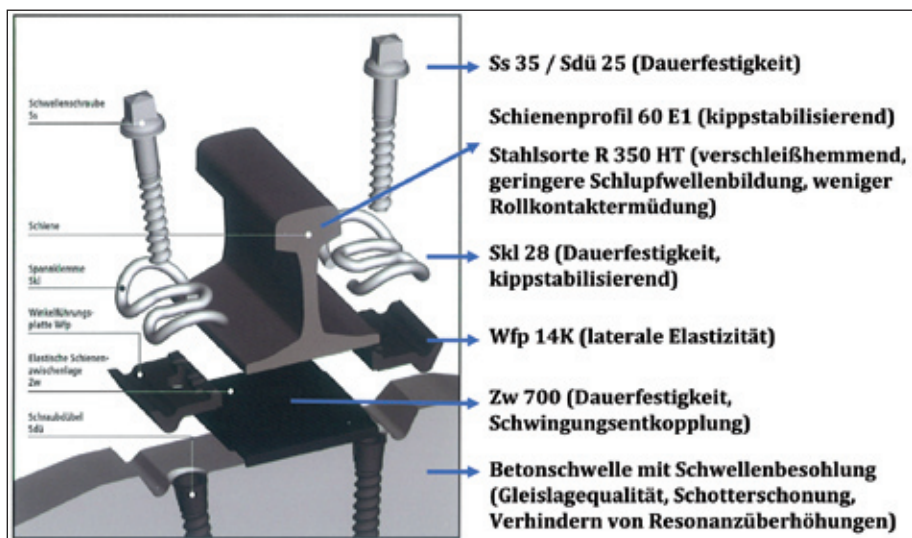


Abb. 2: Optimale Bogenleiskonfiguration, Standard bei ÖBB seit 2007 Quelle: Vossloh Fastenings System, adaptiert

aus einem Gummi-Kunststoff-Compound in Bögen mit $R \approx 300$ m nach nur etwa fünf Jahren getauscht werden. Erfolgt der Tausch der Zwischenlagen zu spät, stellen sich rasch nachhaltig negative Verschleißerscheinungen wie Einarbeitungen und Zerstörungen im Befestigungssystem und in den Schienenauflagerbereichen ein. Neben den Anpassungen an den Zwischenlagen mussten noch weitere Adaptierungen vorgenommen werden:

- Moderne Winkelführungsplatten sind aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellt. Diese weisen eine horizontale Elastizität von ca. 50 kN/mm auf, dadurch werden die Führungskräfte der Räder mit einer Verformung der seitlichen Schienenfußführung gefedert an die Betonschwellen übertragen. Im Gegensatz zu den alten Stahlwinkelführungsplatten, deren verformungsfreie Kraftübertragung im Laufe der Zeit zu Abplatzungen an den Betonschwellen führten.
- Die bis 2005 verwendete Schraube-Dübel-Paarung Ss25 – Sdü21 musste in ihrer geometrischen Ausbildung (das alte Spitzgewinde verursachte Spannungsspitzen) und dem verwendeten Material (HDPE neigt in den Gleisbögen zum Kriechen) verändert werden. Die ÖBB waren selbst an der Entwicklung der neuen Schraube-Dübel-Paarung Ss35 – Sdü25 beteiligt. Diese wird nun in Betonschwellengleisen generell als Standard eingesetzt.
- Relativ spät wurde bei den ÖBB das Schienenprofil 54 E2 („schmale“ Schiene mit 161 mm Schienenhöhe bei „nur“ 125 mm Schienenfußbreite) gegen das Profil 60 E1 ersetzt. Die zu geringe Schienenfußbreite von 125 mm hat sich in Bögen als nachteilig erwiesen, da sie zu größeren Zwischenlagen- und erhöhten Dübelbeanspruchungen führt. Zwar

konnten mit dem Schienenprofil 54 E2 die Logistikkosten – die vorher eingesetzte Standardschiene 49 E1 besaß ebenfalls eine Schienenfußbreite von 125 mm – gesenkt werden, dies jedoch um den Preis einer höheren Schienenbefestigungsbeanspruchung. Als langfristig nicht optimal kann heute die Entscheidung beurteilt werden, im bogenreichen ÖBB-Netz beim Einsatz des 54-kg-Schienenprofils nicht auf das geometrisch ausgewogene Profil 54 E1 mit einer Fußbreite von 140 mm zurückgegriffen zu haben.

- Anfang der 1990er-Jahre wurden im Netz der ÖBB Versuche mit kopfgehärteten Schienen (damalige Bezeichnung HSH-Güte, heute R 350 HT) durchgeführt. Nachdem neben der Verschleißreduktion (Faktor 3 in engen Bögen im Vergleich zur damals noch als „verschleißfest“ bezeichneten Stahlsorte R 260) auch die Dauerfestigkeit des eingesetzten Schweißverfahrens belegt werden konnte, wurde der Einsatz der Güte R 350 HT für den Einsatzbereich enge Gleisbögen ($R < 350$ m) im Jahre 2001 vorgeschrieben. Die kopfgehärteten Schienen bieten auch einen größeren Verschleißwiderstand gegen die Bildung von Schlupfwellen.

Die verschleiß- und wie später beschriebenen auch schlupfwellenoptimierte Bogenleiskonfiguration wird im Netz der ÖBB nun als Standard in engen Gleisbögen ($R < 600$ m) verwendet (Abb. 2).

Schlupfwellenthese Stephanides

Eine gute Gelegenheit, die Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung beim Befahren eines Versuchsbogens experimentell zu studieren, waren Versuchsfahrten, die anlässlich des gemeinsamen DB AG/ÖBB/SBB-Programms „Laufstabilität Güterwagen“ im

Juli 2001 im Brixental durchgeführt wurden. In Abstimmung mit ÖBB/SBB und dem Institut für Eisenbahnwesen der Universität Innsbruck wurde ein – in Fachkreisen hinsichtlich Schlupfwellen bekannter – Bogen im Brixental ausgewählt, weil in seinem Bogenverlauf eine Stahlbrücke mit schlupfwellenfreiem Gleis liegt.

Stephanides hat die Ergebnisse der Versuchsfahrten in seinem Abschlussbericht [3] zusammengefasst. Nach seiner These sind Schlupfwellen selbsterregte Schwingungen im System Rad/Schiene, welche durch Schwebungseffekte infolge von Frequenznachbarschaften entstehen. Schlupfwellen weisen damit eine höherfrequente Teil- oder Grundschwingung (ca. 150 bis 180 Hz) und eine einhüllende Schwingung mit einer Wellenlänge, die ein Vielfaches des Schwellenabstands beträgt, auf.

Demzufolge kommt es zur Schlupfwellenbildung, wenn bestimmte Eigenschwingungen der Radsätze (Harmonische der Biege- und Torsionseigenschwingungen) in gewissen Frequenzbereichen auf Resonanzüberhöhungen im Gleis treffen. Einzelne Räder von unbeladenen Güterwagen beginnen auf der bogeninneren Schienoberfläche hochdynamisch abzuheben und zyklisch wieder aufzusetzen. Das Schlupfwellenmuster beginnt sich auszubilden, wenn der Verschleißwiderstand an der Schienenoberfläche kleiner als die dynamische Beanspruchung ist. Die fahrzeugeitigen Schwingungsmechanismen alleine sind jedoch nicht imstande die dynamische Schienenverschleißerscheinung Schlupfwellen zu verursachen. Ansonsten dürften schlupfwellenfreie Abschnitte wie jener auf der untersuchten Stahlbrücke nicht mehr auftreten.

Gleisseitige Eigenschwingungen bzw. Resonanzüberhöhungen treten in verschiedenen Frequenzbereichen auf. Der für die Schlupfwellenbildung ausschlaggebende Modus liegt in etwa bei 150 Hz (meist liegt er mit den bei den ÖBB verwendeten Komponenten zwischen 150 Hz und 180 Hz). In diesem Frequenzbereich schwingen Schiene und Schwelle gleichphasig [4] (Abb. 3). Im Abschlussbericht „Schlupfwellenmessungen Brixental“ wird auf folgenden Aspekt mehrfach hingewiesen. Eine wichtige Rolle bei der Entstehung der Schlupfwellen spielen Hohllagen unter den Schwellen. Der erste gleichphasige Schwingungsmodus zwischen Schiene und Schwelle (ca. 150 Hz bis 180 Hz) prägt sich bei vorhandenen Hohllagen dann noch größer aus und ist damit Auslöser für verstärkte Gleisrostverformungen, dies fördert die vorhin genannten Schwebungseffekte. Ein typisches Schlupfwellenmuster zeigt Abb. 4.

Da sich die Hohllagen unter den Betonschwellen zeitlich verändern können, ist es

möglich, dass die Schlupfwellenberge auch mit der Zeit in Längsrichtung wandern. Ab einer Schlupfwellenamplitude von ca. 0,2 mm (Spitze-Spitze-Wert) bleiben sie jedoch stabil und wachsen zusammen. Die einhüllende Schwingung (mit einer Wellenlänge in Vielfachen des Schwellenabstands) ist als solche nicht mehr erkennbar.

Fazit: Die These von Stephanides beschreibt die Vorgänge bei der Schlupfwellenbildung gut, da sie die Schwingungen der Radsätze mit Gleisrost-Schwingungen kombiniert betrachtet und so eine ganzheitliche Beschreibung ermöglicht. Die Schlupfwellenbildung entsteht der These zufolge durch Schwebungseffekte infolge von Frequenznachbarschaften von Radsätzen und dem Gleisrost. Einen besonderen Einfluss haben Hohllagen unter den Schwellen, da sie Schwebungen weiter verstärken. Die Schlupfwellenbildung kann gehemmt werden, wenn die zwei Teileinflüsse Resonanzüberhöhung im Gleis zwischen 150 Hz und 180 Hz (Systemsteifigkeitsanpassung) und Hohllagenbildung (Lagerungsqualität der Betonschwellen) geschickt verändert bzw. eliminiert werden. Dies passiert wie später angeführt durch Anpassung der Zwischenlagensteifigkeit und den Einbau von Schwellenbesohlungen.

Einfluss der Zwischenlagensteifigkeit

Ein idealer Schlupfwellen-Versuchsabschnitt steht den ÖBB in einem Gleisabschnitt bei Scheifling an der Grenze zwischen Steiermark und Kärnten zur Verfügung. Der zweigleisige Abschnitt zwischen Scheifling und Mariahof weist auf einer Länge von ca. 7 km bei annähernd gleichen Untergrundverhältnissen eine Vielzahl an Gleisbögen mit einem Radius $R \approx 280$ m und einer Längsneigung von ca. 15‰ auf. Es wurden bei der Gleisneulage unbesohlte Betonschwellen der Type L2 mit steifen Kunststoffzwischenlagen eingebaut.

Gleis 1 (hauptsächlich bergab befahren) wurde 1999 erneuert. Nach sieben Jahren mussten in den Gleisbögen die Zwischenlagen aufgrund ihres Verschleißes getauscht werden. Beim Zwischenlagentausch im Oktober 2006 wurden dann 22 verschiedene Zwischenlagen von fünf unterschiedlichen Herstellern auf Abschnittslängen von jeweils mindestens 90 m eingebaut (Abb. 5).

Den Herstellern wurde die geometrische Form der Zwischenlagen vorgegeben, bei der Wahl der Steifigkeiten wurde jedoch ein gewisser Spielraum eingeräumt. Die statische Steifigkeit der Zwischenlagen variiert im Versuchsabschnitt von 55 kN/mm bis 241 kN/mm (Sekante zwischen 18 kN und 68 kN), die dynamische Steifigkeit

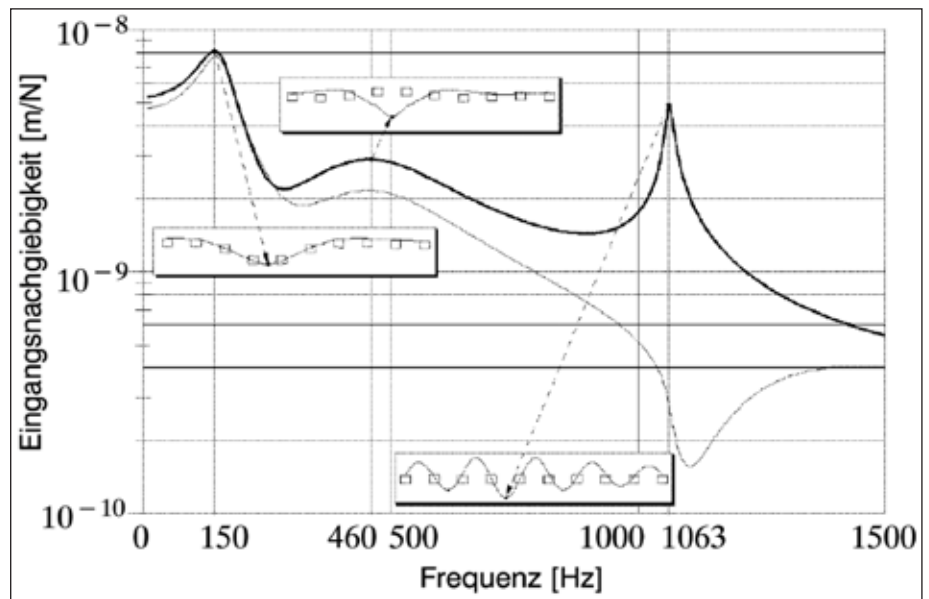


Abb. 3: Vertikaler Frequenzgang des Gleises [4]

Quelle: [4]

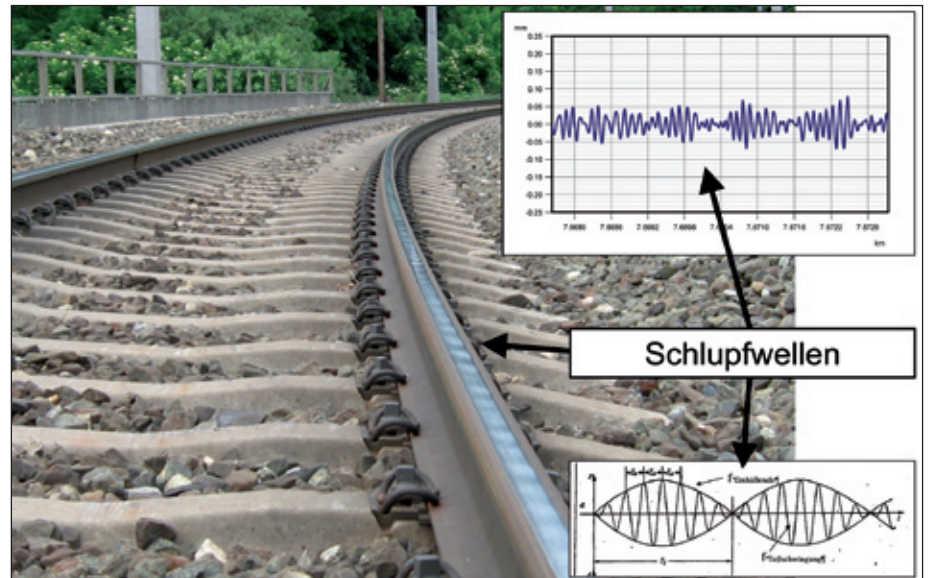


Abb. 4: Typisches Schlupfwellenmuster

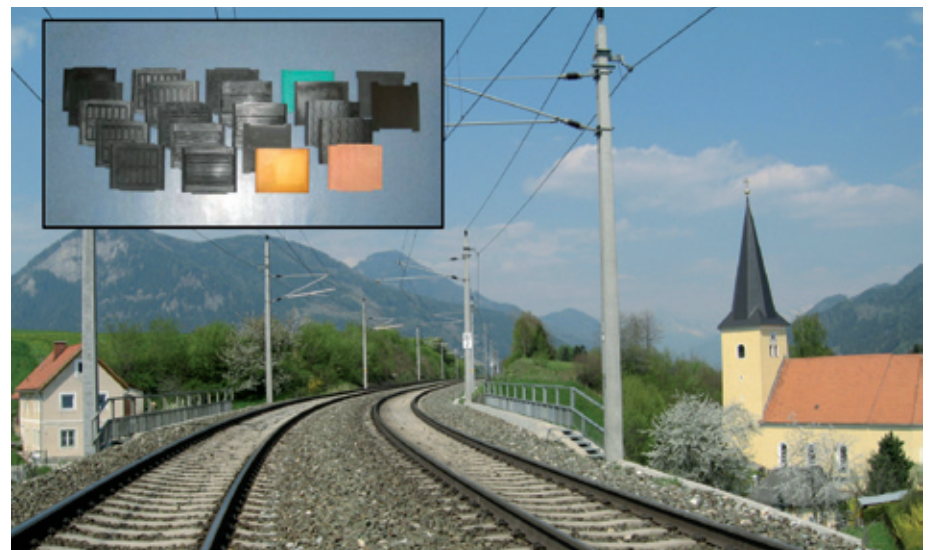


Abb. 5: Versuchsabschnitt für Zwischenlagen bei Scheifling (Steiermark): 22 Versuchsabschnitte zu je 90 lfm

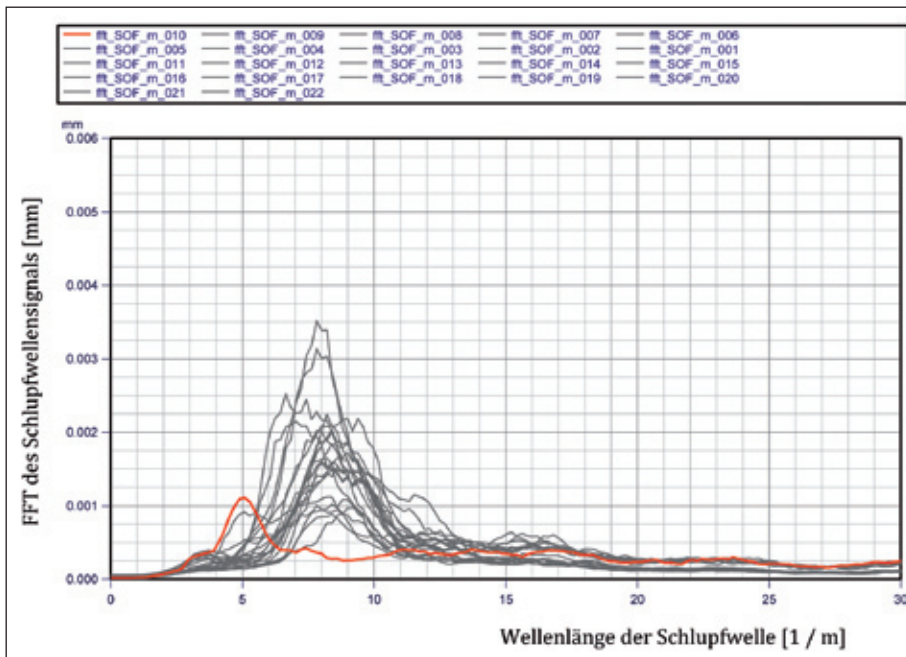


Abb. 6: FFT-Analyse der Schlupfwellenamplitude im Versuchsabschnitt A10

der Zwischenlagen variiert von 79 kN/mm bis 300 kN/mm (Auswertebereich 18 kN bis 68 kN; 5 Hz). Ausgenommen davon ist die Referenzzwischenlage mit einer statischen Steifigkeit von ca. 500 kN/mm. Mit diesem umfangreichen Versuchsaufbau ist es möglich, den Einfluss der Zwischenlagensteifigkeit auf die Schlupfwellenbildung im Betriebsgleis zu bestimmen. Dem Zwischenlagenversuchseinbau im Oktober 2006 folgte ein intensives, begleitendes, messtechnisches Programm. Insbesondere wurden der Verschleiß der Zwischenlagen und die Schlupfwellenbildung detailliert untersucht. An einigen Stellen wurden punktuelle Messungen (Schwellen- und Schienenenverformungen, Lateralbewegungen der Schiene und Schwelle bei Überfahrt, Beschleunigungsmessungen

an Schienen und Schwellen, Schlupfwellenamplituden-Messungen, decay-rate-Bestimmungen etc.) durchgeführt, welche bei der Beantwortung detaillierter Fragestellungen hilfreich waren. Die wichtigsten Messsignale kommen vom Oberbaumesswagen EM 250. Im Durchschnitt befährt der Oberbaumesswagen den Versuchsabschnitt dreimal pro Jahr. Das Messsignal Schienenneigung ermöglicht Rückschlüsse auf den Verschleiß der Zwischenlagen [5]. Die Signale Schlupfwellentiefe (die Schienenkopfmittle wird mittels Dreipunkt-Laser abgetastet und die so bestimmte Pfeilhöhe in die reale Oberflächenwelligkeit umgerechnet) und Achslagerbeschleunigung erlauben, das Wachstum der Schlupfwellen zu detektieren und den Einfluss der Zwischenlagensteifigkeit zu bestimmen.

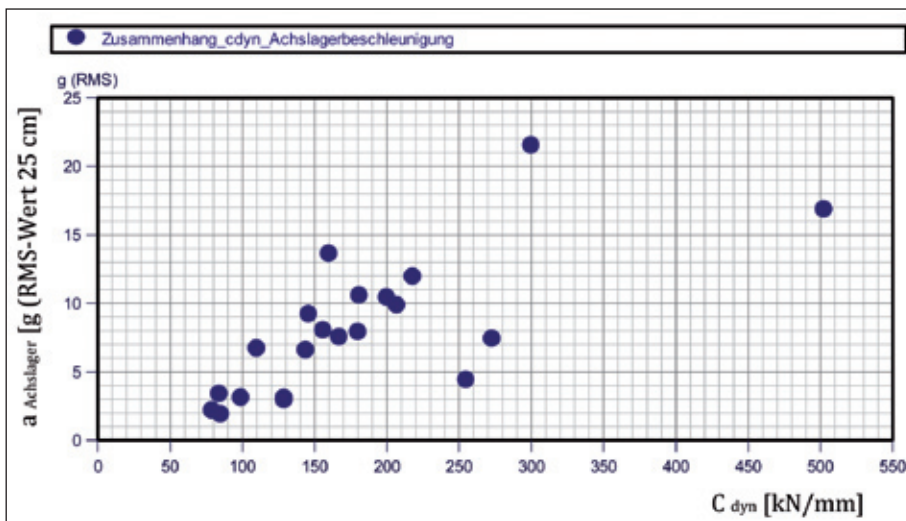


Abb. 7: Zusammenhang dynamische Steifigkeit der Zwischenlagen und Achslagerbeschleunigung

Fast-Fourier-Analysen (FFT) des Schlupfwellensignals geben bereits eine erste Auskunft über das Schlupfwellenwachstum der einzelnen Versuchsabschnitte. Abb. 6 zeigt die Detailauswertung des Unterabschnittes A 10, grau gezeichnet sind die Vergleichsabschnitte. Man erkennt, dass sich sowohl die Amplitude des einhüllenden Spektrums als auch die Schlupfwellenfrequenz deutlich von den anderen unterscheiden. Die kleinere Einhüllendenamplitude deutet auf kleinere Schlupfwellenamplituden und die Frequenzverringerng auf größere Schlupfwellen-Wellenlängen hin. Abschnitt A 10 besitzt besonders weiche Zwischenlagen mit einer dynamischen Steifigkeit von 85 kN/mm. Weiche Zwischenlagen führen damit auch nachweislich zu einer Änderung der Systemeigenfrequenz und verursachen eine geringere Schlupfwellenbildung.

Der Stellenwert des Oberbaumesssignals (RMS-Wert über 25 cm) Achslagerbeschleunigung hat in den letzten Jahren insgesamt zugenommen. Neben der Beurteilung der Qualität der Schienenschweißungen und der Weichenherzen wird auch die Schlupfwellenausprägung mehr und mehr von diesem Signal und nicht mehr wie früher nur vom Signal Schlupfwellentiefe definiert. Abb. 7 zeigt den Zusammenhang zwischen Achslagerbeschleunigung und dynamischer Steifigkeit der Zwischenlagen bei den 22 Versuchsabschnitten. Auch hier erkennt man: Eine Verringerung der Zwischenlagensteifigkeit (gilt für den Bereich $85 \text{ kN/mm} < C_{\text{dyn}} < 300 \text{ kN/mm}$) führt zu geringeren Schlupfwellenamplituden, hier ausgedrückt als Achslagerbeschleunigung des Oberbaumesswagens.

Eine physikalische Erklärung für die stärkere Schlupfwellenbildung bei Anwendung von steifen Zwischenlagen liefert Abb. 8. Es ist hier der Zusammenhang Verhältnis dynamische Steifigkeit der Zwischenlagen zu Achslagerbeschleunigung über der dynamischen Steifigkeit der Zwischenlagen aufgetragen. Ein größerer Wert $C_{\text{dyn}}/a_{\text{Achslager}}$ deutet auf eine größere Entkopplung von Schwellen- und Radsatzschwingung hin. Auch wenn dem konkreten Wert des Verhältnisses eine geringere Bedeutung zukommt, erkennt man deutlich folgenden Zusammenhang: Will man Schwingungen von den Schwellen (dies gilt in besonderem Ausmaß für hohl liegende und damit freischwingende Schwellen) und den Radsätzen entkoppeln, benötigt man Zwischenlagen mit einer dynamischen Steifigkeit von $C_{\text{dyn}} < 150 \text{ kN/mm}$. Die Schlupfwellenbildung und die Auswirkung von Flachstellen wird damit verringert.

Die Ergebnisse des Zwischenlagenversuchseinbaus bei Scheifling sind:

- Weiche Zwischenlagen führen in geringem Ausmaß zu einer Frequenzverschiebung des Gleisrosts. Die charakteristische



Der neue Schienen-Schweißroboter

Mit der neuen Technologie zur Abbrennstumpfschweißung APT 1500 R von Plasser & Theurer, wird erstmalig ein voll automatischer Schweißvorgang ohne manuelle Interaktion durchgeführt. Durch die Möglichkeit integrierte, automatische Schlusschweißungen durchzuführen entfällt die Verwendung eines separaten Schienenziehgerätes. Weitere Vorteile des neuen Schienen-Schweißroboters sind: Automatische Höhen- und Fahrkantenzentrierung mit Messung und Dokumentation, Pulsorschweißen für verkürzte Schweißzeiten und Abbrandlängen bei hoher Qualität sowie automatische Auswertung und Aufzeichnung der Schweißung.

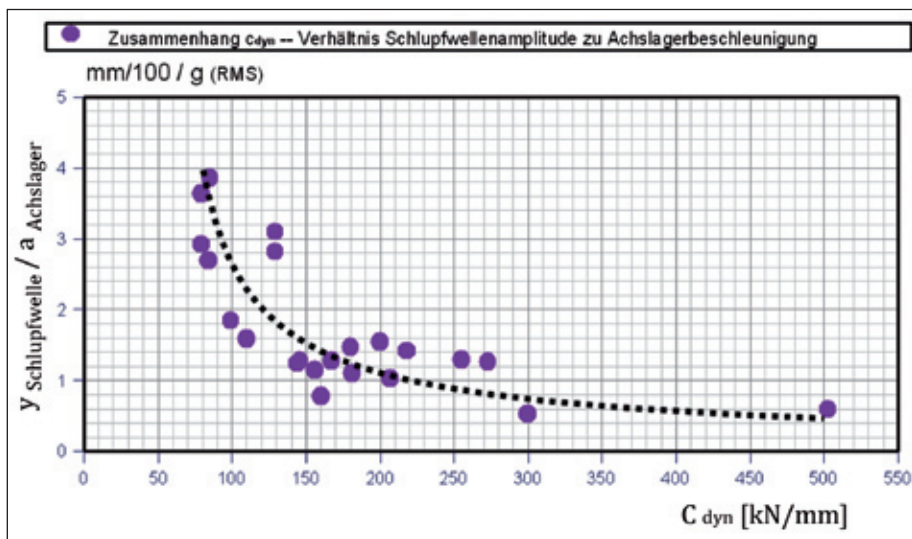


Abb. 8: Zusammenhang Verhältnis dynamische Steifigkeit der Zwischenlagen zu Achslagerbeschleunigung und dynamische Steifigkeit der Zwischenlagen

Wellenlänge wird bei Anwendung von weichen Zwischenlagen um ca. 20 Hz (180 Hz \rightarrow 160 Hz) verringert.

- Weichere Zwischenlagen führen zu einer Verzögerung der Schlupfwellenbildung. Es bilden sich nach gleicher Verkehrsbelastung kleinere Schlupfwellenamplituden aus als im Referenzabschnitt mit steifen Zwischenlagen.
- Gleise, die mit Zwischenlagen einer kleineren dynamischen Versteifung ausgestattet sind, verhalten sich bezüglich Schlupfwellenbildung günstiger. Höher dämpfende Zwischenlagenmaterialien begünstigen das Wachstum der Schlupfwellen.
- Zwischenlagen mit einer statischen Steifigkeit $C_{stat} \approx 60$ kN/mm (Auswertebereich zwischen 16 und 68 kN) und einer dynamischen Steifigkeit von $C_{dyn} \approx 85$ kN/mm sind als besonders schlupfwellenhemmend anzusehen.
- Zu einer gänzlichen Schlupfwellenvermeidung führen die weichen Zwischenlagen alleine jedoch nicht (weitere Einflüsse haben Stahlorte und Schwellenbesohlung).
- Die größeren Schienenkopfauslenkungen werden vom Befestigungssystem W 14 ohne einen überlinearen Verschleißanstieg an den Winkelführungsplatten übertragen.
- Die Verschleißuntersuchungen geben ein freundliches Bild für die weichen Zwischenlagen wider. Weichere Zwischenlagen weisen tendenziell auch längere Standzeiten auf.

Die optimierten Zwischenlagen weisen auch für gerade Gleise einen großen Vorteil auf. Eine gewisse Gleis-Elastizität ist vonnöten, damit die dynamische Beanspruchung von Flachstellen auf die Schienen abgefedert werden kann. Weiche Zwischenlagen

mit einer dynamischen Steifigkeit $C_{dyn} < 150$ kN/mm senken die Schienenbruchgefahr deutlich. Es dient die elastische Zwischenlage nicht nur zur Schonung der Schiene, sondern auch zur Schonung der Betonschwelle und des Schotterbettes. Bei den ÖBB werden deshalb bei Umtausch- und Neulagenarbeiten nur mehr Zwischenlagen der Type Zw 700 mit den oben genannten Eigenschaften ($C_{dyn} = 85$ kN/mm) eingesetzt.

Einfluss von Schwellenhohllagen

Seit dem Einbau der ersten Schwellenbesohlungen im Netz der ÖBB im Jahr 1997 (Grundsatzversuche seit 1989) wird das Lageverhalten der auf einer Kunststoffschicht (der Schwellenbesohlung) liegenden Betonschwellen intensiv erforscht und den Ergebnissen der unbesohnten Vergleichsabschnitte gegenübergestellt. Die intensiven Messkampagnen zeigen teilweise überraschende Ergebnisse. Insbesondere ist eine fast systematische Häufung von Hohllagen unter den Betonschwellen in unbesohnten Abschnitten feststellbar. Eine der wichtigsten Eigenschaften besohlter Betonschwellen ist hingegen die gleichmäßigere Lagerung im Schotterbett (hat gleichmäßige Einsenkung zur Folge) und damit einhergehend die fast vollständige Unterdrückung dieser Hohllagen.

Zur Bestimmung der Lagequalität von Betonschwellengleisen stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Mittels Präzisionsnivellement ist es möglich (punktuell), das Absolut-Setzungsverhalten des Gleises zu bestimmen. Die Oberbaumesssignale Längshöhe und Richtung sind relative Messgrößen, sie stehen jedoch für ganze Abschnitte zur Verfügung. Weiterhin können mittels Verformungsmessungen vor Ort die (relativen und absoluten) Ein-

senkungen unter Last bestimmt werden. Präzisionsnivellement und Verformungsmessungen sind ressourcenintensiv, die Messsignale des Oberbaumesswagens stehen digital und einfach bearbeitbar für ganze Streckenabschnitte zur Verfügung. Bereits bei den ersten Versuchseinbauten von besohnten Betonschwellen zeigten die entsprechenden Gleise eine deutliche Abnahme der vertikalen Setzungen und auch ein ruhigeres Längshöhensignal. In der Dissertation von Monaco [6] wurde dann auch das Thema Querverschiebewiderstand bei besohnten Betonschwellen behandelt. Die ÖBB weiteten die Versuche mit besohnten Betonschwellen daraufhin aus.

Zur Erfassung der Auswirkungen von unterschiedlichen Besohlungsmaterialien wurde es notwendig, vielerorts Einsenkungsmessungen durchzuführen. Die ÖBB haben sich entschieden, ein sehr einfaches und kompaktes Messsystem anzuwenden. Abb. 9 zeigt mehrere auf das Schotterbett aufgesetzte Messrahmen inklusive des angebrachten Wegaufnehmers. Durch die rasche Installation ist es möglich an verschiedenen Punkten der Schwelle Messgeber zu installieren und die Einsenkungen zu bestimmen. Die ÖBB tun dies bei den Messungen an mindestens drei Punkten einer Schwelle, an den zwei Schwellenköpfen und in Schwellenmitte. Die gleichzeitige Messung von fünf Schwellen ist möglich.

Zur Beurteilung der Einsenkungsunterschiede wurde es notwendig, ein Ordnungssystem für das Lageverhalten von Schwellen zu entwickeln. Die ÖBB benutzen ein zweidimensionales Einsenkungsdiagramm, welches das Lageverhalten der Betonschwellen im Schotterbett exakt nachzeichnet. Aufgetragen wird für eine Lok-Überfahrt (typischerweise für die Standardlok 1016/1116/1216) auf der Abszisse die Schwelleneinsenkung in der Schwellenmitte und auf der Ordinate die vertikale Einsenkung eines der beiden Schwellenköpfe. Es ist mit dieser Art der Darstellung einfach und rasch möglich, die Durchbiegung der Schwelle, die Ausbildung der Hohllage und die Größe der Abhebewelle zu entnehmen. Abb. 10 zeigt zwei typische Diagramme. Auf der linken Seite ist das Einsenkungsverhalten einer hohl liegenden Betonschwelle aufgetragen, auf der rechten Seite findet sich ein typisches Bild einer besohnten Betonschwelle mit einer sehr gleichmäßigen Vertikaleinsenkung in Schwellenmitte und dem Schwellenkopf.

Schöpp [7] hat in ihrer Diplomarbeit die vorhandenen ÖBB-Einsenkungsdiagramme und -messergebnisse untersucht. Besohlte Betonschwellen zeigen demnach nur in den seltensten Fällen eine (und dann auch nur geringe) Hohllagenbildung. Unbesohlte Betonschwellen weisen dagegen im Lauf der Zeit eine fast systematische Bil-

dung von Hohllagen auf. Vielfach finden sich bei zehn benachbarten Betonschwellen drei Schwellen mit partiellen Hohllagen und vier benachbarte Schwellen, welche gänzlich hohl liegen, also unbelastet nur noch frei an den Schienen hängen. Schöpp hat in ihrer Arbeit auch ein Rechenverfahren zur Ermittlung eines Hohllagenindex entwickelt. Durch Analyse des Leistungsdichtespektrums des Oberbaumesssignals Längshöhe ist es möglich bereits, „vom Messwagen bzw. Schreibtisch aus die Wahrscheinlichkeit von Hohllagen unter den Betonschwellen zu detektieren“. Der positive Einfluss der Schwellenbesohlung auf die Hemmung der Hohllagen konnte so wieder bestätigt werden. Dieser positive Einfluss der Schwellenbesohlung auf die Lagequalität führt auch zu einer Verringerung der Schwellenbeanspruchung. Die Biegemomente in Schwellenmitte nehmen bei besohnten Gleisen um ca. 50% ab. Es ist davon auszugehen, dass die Nutzungsdauer der eingesetzten Betonschwellen durch die Besohlung ebenfalls verlängert werden kann.

Die umfangreichen Messkampagnen im ÖBB-Netz konnten den positiven Einfluss von Besohlungen klar belegen. Die Bildung von Hohllagen wird stark gehemmt bzw. vollständig unterdrückt. Dies gilt für alle bisher eingesetzten Besohlungsmaterialien, also weichere und steifere Typen [8].

Schlupfwellenfreie Gleisbögen

Kombiniert man die vorhin angeführten Konstruktionsanpassungen, welche zur Komponenten-Standzeitverlängerung in Gleisbögen führen, mit den Optimierungen der Systemsteifigkeit und dem Lagerverhalten der Gleise

- ausreichende Dimensionierung der Schienenbefestigungselemente,
- Einsatz von Zwischenlagen mit einer dynamischen Steifigkeit $C_{dyn} = 85 \text{ kN/mm}$,
- Verwendung von Schwellenbesohlungen,
- Einbau des Schienenprofils 60 E1 mit der Stahlsorte R 350 HT,

erhält man ein Bogengleis, welches auch nahezu schlupfwellenfrei ist. Die einzelnen positiven Einflüsse überlagern sich. Die Oberbaumesssignale Schlupfwellenamplitude und Achslagerbeschleunigung belegen den Sachverhalt an den verschiedensten Gleisbögen mit Radien zwischen 250 m und 400 m [9]. In größeren Bogenradien treten Schlupfwellen üblicherweise nicht auf.

Zwar ist nicht auszuschließen, dass Versteifungen in den elastischen Komponenten (v.a. den Zwischenlagen) auf Dauer auch wieder zu einer geringen Schlupfwellenbildung führen werden; im Gegensatz zu den noch vor 20 Jahren angewandten Betonschwellenkonstruktionen wird die



Abb. 9: Messaufbau zur Bestimmung der relativen vertikalen Schwelleneinsenkungen (Hersteller Messequipment PJM)

Bildung der Schlupfwellen damit aber fast vollständig eliminiert. Die modernen Bogengleise sind instandhaltungsärmer und langlebiger. Ein Umstand, der nicht nur eine Verringerung der Lebenskosten mit sich bringt, sondern auch für Anrainer sehr wertvoll ist.

In Bögen mit $250 \text{ m} < R < 600 \text{ m}$ ist folgende Oberbauform bei den ÖBB Standard: Schienenprofil 60 E1 (Stahlsorte R 350 HT) – lückenlos verschweißt – Betonschwelle besohlt (Besohlungstyp hat geringen Einfluss auf die Schlupfwellenbildung) – Schienenbefestigungssystem W 28 (Skl 28, Wfp 14) – Zw 700 ($C_{dyn} = 85 \text{ kN/mm}$) – 600 mm Schwellenabstand.

Erfolgreich wurde in engen Bögen mit Radien $R \approx 200 \text{ m}$ auch die sogenannte High-Duty-Schwelle („HD-Schwelle“; Form einer geteilte Rahmenschwelle) getestet. Mit die-

ser Schwellentyp (erhöhter Querverschiebewiderstand) ist es möglich, Gleisbögen mit Radien $R > 180 \text{ m}$ (möglicherweise sind auch kleinere Radien realisierbar) lückenlos zu verschweißen. Auch ist es möglich, je Schwelle zwei Stützpunktebenen (die Schienenbefestigung ist in diesem Fall eindeutig nicht mehr das „schwächste Glied“) vorzusehen. Ein Versuchsbogen bei St. Pölten zeigt trotz des sehr kleinen Bogenradius von $R = 214 \text{ m}$ und der hohen Verkehrsbelastung (Ost-West-Güterverkehr rollt über diesen Gleisbogen) nach mehr als drei Jahren keine Anzeichen einer Schlupfwellenbildung (Abb. 11).

Das Verhalten des Versuchsbogens wurde ebenfalls intensiv messtechnisch begleitet untersucht. So wurden an verschiedenen Stellen des Gleisrosts und im Speziellen der Schiene Wegaufnehmer an-

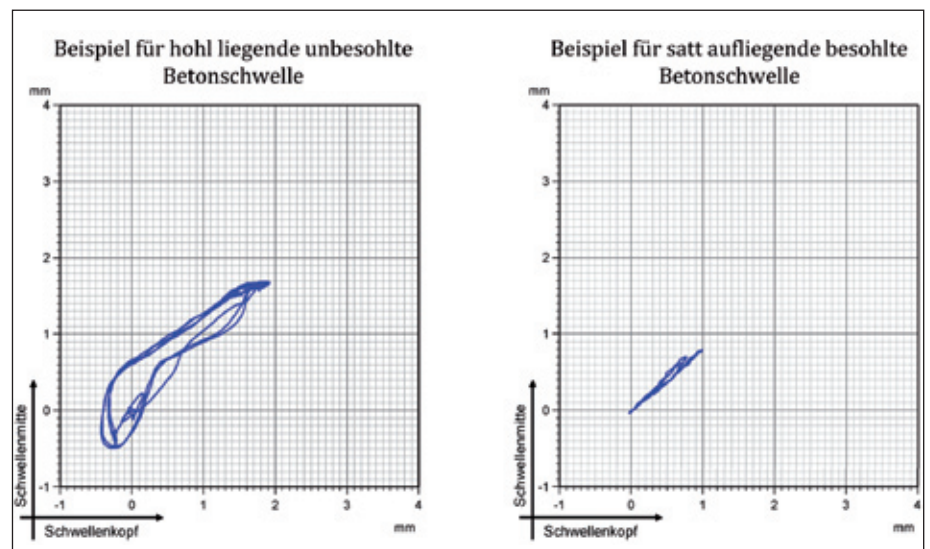


Abb. 10: Beispiele für 2D-Einsenkungsdiagramme



Abb. 11: Gleisbogen mit HD-Schwellen bei Sankt Pölten

gebracht. Abb. 12 zeigt die relative Schienenkopfauslenkung (vertikale und laterale Bewegung des Schienenkopfs) in Relation zum Schienenaufleger. Im oberen Diagramm ist die Situation für die Überfahrt einer Lokomotive der Type 1016/1116/1216 dargestellt. Die vertikale Einsenkung unter den vier Radsätzen sowie die ausgeprägte laterale Auslenkung des ersten und dritten

Radsatzes kann daraus entnommen werden. Den Verformungen sind jedoch keine dynamischen Zusatzschwingungen überlagert. Anders die Situation bei einem unbeladenen Güterwagen in der Abbildung darunter. Offensichtlich kommt es hier (und genau bei diesem Radsatz) zu den beschriebenen Schwebungseffekten. Radsatz und

Gleisrost weisen eine gekoppelte Schwingung auf. Die Dosis ist aber zu klein, als dass sich im konkreten Gleisbogen bislang eine Schlupfwellenbildung eingestellt hätte. Die im Punkt „Schlupfwellenthese Stephanides“ angeführte Schlupfwellenthese wird auch hier bestätigt. Anmerkung: Die geringen Verformungswerte ergeben sich durch die Anwendung der doppelten Schienenbefestigung (in Summe acht Spannklemmen je Schwelle).

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden Maßnahmen zur Hemmung der Schlupfwellenbildung an bogeninneren Schienen von Bogengleisen mit konventionellem Schotteroberbau vorgestellt. Aufbauend auf die Schlupfwellenthese nach Stephanides, nach dem die Schlupfwellenbildung durch Schwebungseffekte infolge von Frequenznachbarschaften von Radsätzen und dem Gleisrost unter dem zusätzlichen Einfluss von Schwellenhohllagen entsteht, konnten folgende Erfahrungen gewonnen werden.

Die Schlupfwellenbildung tritt verstärkt in Betongleisen mit steifen Zwischenlagen auf, da diese im Gegensatz zu den weichen Gummizwischenlagen zu keiner Entkopplung der Schwingungen an Rädern und dem Gleisrost führen. Zur Hemmung von Schlupfwellen empfiehlt sich der Einsatz von Zwischenlagen mit einer dynamischen Steifigkeit $C_{dyn} < 150 \text{ kN/mm}$. Die Schlupfwellenhemmung stellt sich bei unbesohlenen und besonders bei besohlenen Betonschwellen ein.

Messungen im ÖBB-Netz zeigen ein häufiges „Aufreiten“ von Betonschwellen in Schwellenmitte bei gleichzeitig verstärkter Bildung von Hohllagen unter den Schienenauflegern bzw. Schwellenköpfen. Dieses Phänomen tritt vor allem in unbesohlenen Betonschwellengleisen mit steifen Zwischenlagen auf. Die frei liegenden Schwellenköpfe können u. a. mit der Schlupfwellenfrequenz schwingen und verstärken gleichzeitig die Bildung der Schlupfwellen. Partielle Hohllagen unter den Schwellenköpfen erhöhen damit die Schlupfwellenbildung.

Schwellenbesohlungen hemmen die Bildung von partiellen Hohllagen unter den Schwellenköpfen. Neben einer gleichmäßigeren Auflagerung der Schwellen und einem besseren Setzungsverhalten kann durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen damit auch die Schlupfwellenbildung stark gehemmt werden, die Schwebungseffekte zwischen den Radsätzen und dem Gleisrost werden unterdrückt.

Die Stahlsorte R 350 HT ist (kontakt-)/verschleißresistenter als die Stahlsorte R 260. Gleise mit R 260-Schienen zeigen

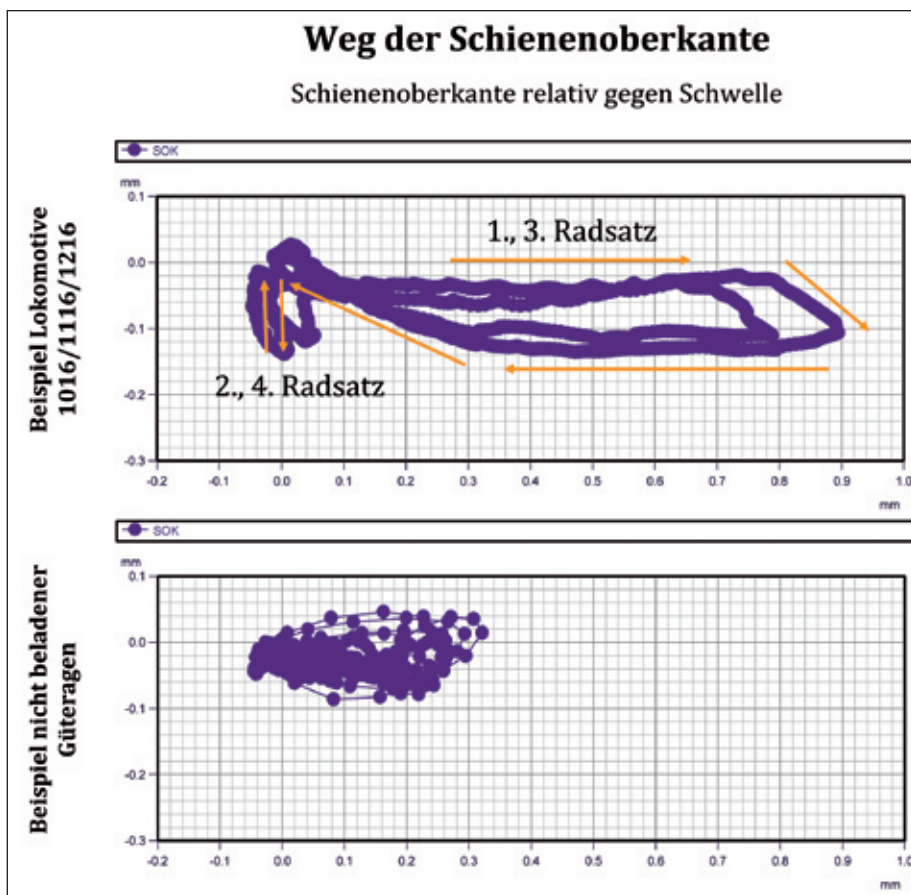


Abb. 12: Beispiele für Relativbewegungen des Schienenkopfs im Gleisbogen mit HD-Schwellen
Bilder ohne Quellenangabe entstammen der Dissertation von Florian Auer.

daher auch eine raschere Schlupfwellenbildung.

Der Verschleißzustand der Zwischenlage und die Niederhalte­kraft der Spannklemme – welche durch Materialermüdung, durch ein Dübelkriechen und ein falsches Anziehdrehmoment verringert werden kann – haben ebenfalls einen schlupfwellenverstärkenden Einfluss. Durch den Einsatz einer ausreichend dimensionierten Schienenbefestigung von weichen Zwischenlagen, besohlenen Betonschwellen und einem Schienenprofil 60 E1 mit der Stahlsorte R 350 HT hat die ÖBB bislang ein Optimum an Verschleißarmut und Langlebigkeit erreicht. Die positiven Einflüsse überlagern sich und geben in Summe ein nahezu schlupfwellenfreies Gleis:

- Schienenprofil 60 E1 (Stahlsorte R 350 HT),
- lückenlos verschweißt,
- Betonschwelle besohlt,
- Schienenbefestigungssystem W 28,



Dipl.-Ing. Dr. techn. Florian Auer

Teamleiter Life-Cycle-Management
ÖBB-Infrastruktur AG, Wien
florian.auer@oebb.at

- Zw 700 ($C_{dyn} = 85 \text{ kN/mm}$),
- 600 mm Schwellenabstand.

Im vorliegenden Artikel wurde gezeigt, dass es in engen Gleisbögen möglich ist, die Bildung von Schlupfwellen auch bei hoher Verkehrsbelastung über Jahre hinaus fast vollständig zu unterdrücken. Die ÖBB setzen diese wartungsarme und leisere Bogengleiskonfiguration seit 2007 standardmäßig im Hauptnetz ein.

LITERATUR

- [1] Meier, H.: Zur Schienenbefestigung auf der Betonschwelle, in: Verkehr und Technik, Sonderdruck 1963
- [2] Auer, F.: Der Einfluss von elastischen Komponenten auf das Verschleißverhalten von Bogengleisen, in: ZEVrail – Sonderdruck zur Schienenfahrzeugtagung in Graz, 2010
- [3] Stephanides, J.: Abschlussbericht Schlupfwellenmessungen Brixental, unveröffentlicht, 2001
- [4] Meinke, P.; Blenkle, C.: Bogenlauf und Schlupfwellen bei den Standardprofilen UIC 60 und S1002, in: IAT-Bericht 034/1, o.J.
- [5] Auer, F.: Optimierter Zwischenlagenwechsel bei den ÖBB, in: ZEVrail, 10/2005
- [6] Monaco, V.: Untersuchungen zu Schwellenbesohlungen im Oberbau, in: Dissertation an der TU Graz, 2004
- [7] Schöpp, A.: Gleislagequalität – Hohllagen bei Betonschwellengleisen, in: Diplomarbeit an der Uni Innsbruck 2011
- [8] Auer, F.; Schilder, R.: Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB, in: ZEVrail 133 (2009) 5, S. 180 – 193
- [9] Auer, F.: Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen. Dissertation an der TU Graz, 2010

Summary

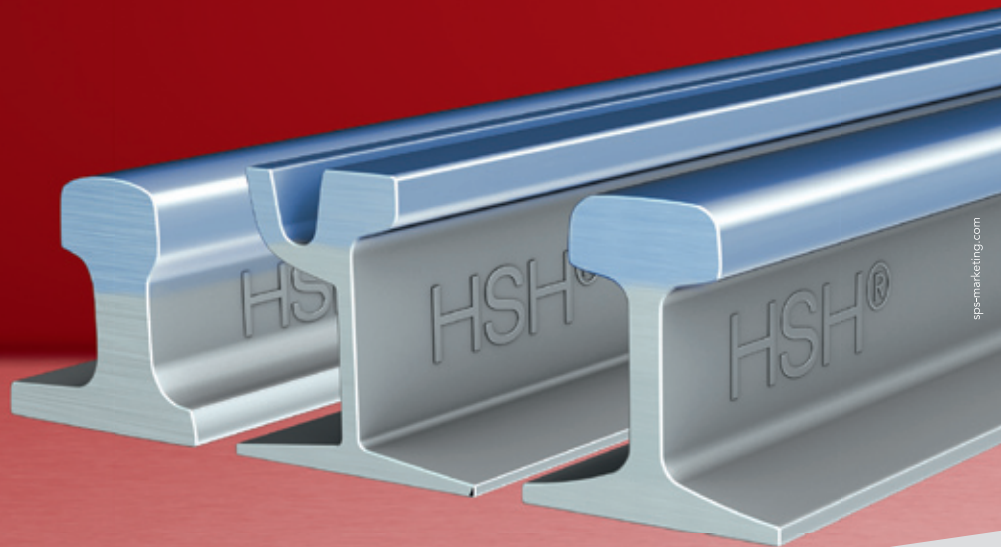
Reducing the formation of long-wave corrugation

Intensive studies carried out in the ÖBB network show the advantage of elastic components and the rail grade R 350 HT with regard to the wear behaviour on tracks in tight curves. Firstly, the new components have a far longer service life and secondly, an optimised dimensioning of the track system can almost completely hinder the formation of long-wave corrugation in track curves with a radius $R < 400 \text{ m}$. In curved tracks with an advanced state of corrugation, the service life of the track components will be greatly reduced – this applies to the ballast bed in particular – and also these tracks are up to 15 dB louder than uncorrugated tracks. Under sleeper pads help to reduce the formation of sleeper voids, elastic rail fastenings lead to decoupling of the occasionally freely oscillating sleepers and the wheelset, and the rail grade R 350 HT indicate a general reduction of wear. If these elements are combined together correctly when dimensioning the curved tracks and if the system behaviour of the track is optimised as a whole, it is possible to eliminate the formation of long-wave corrugations almost completely



Wärmebehandelte Premiumschienen von voestalpine:

Intelligent Kosten sparen.



HSH® Höhere Leistung – geringere Kosten