ETR – EISENBAHNTECHNISCHE RUNDSCHAU · Heft 10|2015

# ETR

EISENBAHNTECHNISCHE RUNDSCHAU

IMPULSGEBER FÜR DAS SYSTEM BAHN

10|2015

www.eurailpress.de/etr

Oktober 2015 | 64. Jahrgang | Euro 27,- | D 2722

EXTRA

**ETR Swiss**

Fachwissen aus der Schweiz zu Technik, Betrieb und Wissenschaft

EXTRA

## THEMEN

Risikomanagement
Bahninvestitionsland Polen
Schienenbefestigungssysteme
Brandschutz

## RUBRIKEN

Monitor: Nachrichten, Fakten, Trends
Marktplatz: Produkte & Dienstleistungen
Kompakt: Hochautomatisiertes Fahren
Veranstaltungen & Termine

## MEINUNGEN

Dr.-Ing. Andreas Kossak, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht, TU Berlin

# Steifigkeitsoptimierung in Übergangsbereichen

Übergangsbereiche stellen selbst in modernen Bahnnetzen häufig eine Problemstelle dar. Der abrupte Wechsel zwischen zwei Oberbaukonstruktionen zeigt sich als Unstetigkeit in den Gleisparametern, wie Einsenkung und Bettung. Dies führt bei Überfahrt durch lokal erhöhte dynamische Krafteinwirkung zum beschleunigten Verschleiß des Oberbaus. Hochwertige elastische Elemente, die mit Hilfe moderner Rechenmethoden optimal aufeinander abgestimmt werden, verbessern die Gleislagequalität und sorgen für eine höhere Streckenverfügbarkeit.
Der folgende Artikel gibt einen Überblick über die typischen Herausforderungen in Übergangsbereichen. Es werden die Möglichkeiten der Finiten Elemente Methode in Kombination mit in Laborversuchen gewonnenen Materialdaten gezeigt und Problemlösungen mittels definierter Elastizität anhand internationaler Projekte vorgestellt.

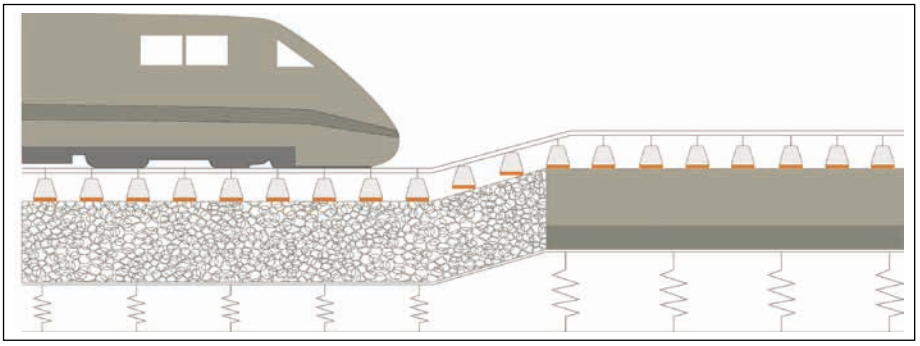
**Dipl.-Ing. Martin Quirchmair**
Systementwicklung
Getzner Werkstoffe GmbH
martin.quirchmair@getzner.com

**Dr. Harald Loy**
Leitung Systementwicklung
Getzner Werkstoffe GmbH
harald.loy@getzner.com

E „Eine Kette ist immer nur so stark wie ihr schwächstes Glied". Dieses Sprichwort gilt auch im Eisenbahnnetz, da der Zeitpunkt, an dem Instandhaltungsarbeiten im Gleis notwendig werden, durch den Zustand des sensibelsten Bereichs der Strecke bestimmt wird. Übergänge stellen meist diese sensiblen Bereiche dar. Sie sind überall dort vorhanden, wo die kontinuierliche Lagerung des Ober- und Unterbaus unterbrochen ist und sich die Steifigkeit des Fahrweges ändert (Bild 2).

**BILD 1:** SNCF Réseau untersucht Übergangsprobleme von Fester Fahrbahn auf Schotteroberbau auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke LGV Est (Foto: Regis Chessum)

**BILD 2:** Änderungen der Gleisparameter am Übergang erzeugen Unstetigkeiten im Fahrweg



Klassische Übergänge sind Anschlüsse einer Festen Fahrbahn an einen Schotteroberbau oder offenen Strecken an Kunstbauwerke wie Brücken, Tunnel oder Durchlässe. Es können aber auch bei gleichartigen Systemen Unstetigkeiten auftreten. Sind beispielsweise in einem Wohngebiet erhöhte Anforderungen an den Emissionsschutz gestellt, kann in diesem Bereich ein Schotteroberbau mit weicher, schwingungsisolierender Unterschottermatte errichtet werden, wohingegen auf offener Strecke kein Schwingungsschutz erforderlich ist. Zwischen den Streckenabschnitten mit bzw. ohne Unterschottermatte entsteht ein Übergang, dem eine erhöhte Aufmerksamkeit bei der Auslegung entgegengebracht werden sollte.

Moderne numerische Rechenmethoden erlauben eine Betrachtung des Übergangs als Ganzes, wohingegen analytische Ansätze, wie der kontinuierlich gelagerte Balken nach Zimmermann, nur jeden Sektor einzeln abbilden können. Kritische Anschlussstellen

mit sich sprunghaft ändernden Oberbauparametern können somit genau analysiert und durch den gezielten Einsatz elastischer Elemente optimiert werden. Durch Messungen im Gleis werden die Berechnungsmodelle verifiziert und unterliegen einer kontinuierlichen Weiterentwicklung.

## 1. DER ÜBERGANG ALS PROBLEMSTELLE

Aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten und den damit verbundenen Einsenkungsdifferenzen führt die abrupte Änderung der Gleisparameter beim Wechsel von einer Oberbauform zur anderen zu erhöhten dynamischen Beanspruchungen. Das überfahrende Schienenfahrzeug muss bildlich gesprochen eine Stufe überwinden, die je nach Höhe zu schlagartig anwachsenden Rad-/Schiene-Kräften führen kann (Bild 3).

Beim Übergang von Schotteroberbau auf Feste Fahrbahn sind Setzungen im Schotter durch Schotterumlagerungen und Verschleiß nicht zu vermeiden. Es ist deshalb erforderlich das Gleis in regelmäßigen Abständen durch Stopfen durchzuarbeiten, um das Aufreiten bzw. eine Hohllagenbildung unterhalb der Schwellen zu verhindern. Nur so kann eine hohe Gleislagequalität sichergestellt werden. Das Instandhaltungsintervall ist hierbei abhängig von der Geschwindigkeit und der auftretenden dynamischen Belastung [1].

Die Feste Fahrbahn zeigt aufgrund ihrer massiven Konstruktion in der Regel keine Setzungen, was dazu führt, dass sich der Fahrspiegel des Schotteroberbaus gegenüber der Festen Fahrbahn absenkt. Die entstehende Höhendifferenz kombiniert mit einem lokalen Steifigkeitssprung erhöht die dynamischen Belastungen des Oberbaus überproportional stark. Dies kann zu einer Überbeanspruchung im Bereich der Schienenstützpunkte führen.

Die im Übergangsbereich gehäuft auftretenden Verschleißerscheinungen verschärfen die Problemstelle über die Zeit. Weiße Stellen durch starken Schotterabrieb, Setzungen durch hohe spezifische Pressungen und Riffelbildungen an der Schienenoberfläche (Bild 4) sind häufig auftretende Probleme. Partielle Hohllagen unter den Schwellen können zu Überlastungen führen mit Folgeschäden wie Spannklemmen-, Bolzen- und Schwellenrissen bis hin zu Brüchen der jeweiligen Komponenten.

Die auf der Schienenoberfläche mögliche Riffelbildung im Übergangsbereich ist als Phänomen stark unterschiedlicher Oberbaueigenfrequenzen zu sehen. Sie resultieren aus unterschiedlichen Anregungsmechanismen, stets verursacht durch hohe dynamische Kräfte [2].

**BILD 3:** Auftretende Schäden am Übergang von Schotteroberbau auf eine Feste Fahrbahn

## 2. ERHÖHTE INSTANDHALTUNGSKOSTEN

Das Interesse eines Infrastrukturbetreibers liegt in der maximalen Verfügbarkeit seines Streckennetzes. Entsprechend der Devise „Zeit ist Geld" bedeuten Streckensperren aufgrund von Instandhaltungsarbeiten Gewinneinbußen, die stets auf ein Minimum reduziert werden sollten. Übergänge stellen nur einen Bruchteil des Gleisnetzes dar, verursachen jedoch einen überproportional hohen Instandhaltungsaufwand.

Amerikanische Bahnbetreiber geben im Jahr rund 200 Mio. USD für die Instandhaltung von Übergangsbereichen aus, während in Europa etwa 85 Mio. EUR aufgewendet werden müssen. Am Beispiel der Niederlande zeigt sich, dass in Übergangsbereichen der zwei- bis vierfache Instandhaltungsaufwand im Vergleich zur normalen Strecke notwendig ist [3].

Höhere Investitionskosten durch den Einsatz bestmöglicher elastischer Oberbaukomponenten, in Verbindung mit einer technisch optimierten Lösung, amortisieren sich somit innerhalb kurzer Zeit durch Erhaltung der Streckenverfügbarkeit.

## 3. ANFORDERUNGEN AN ÜBERGÄNGE

Für eine effiziente Lösung müssen die Anforderungen genau bekannt sein, wobei »

**BILD 4:** Verschleißerscheinungen im Übergangsbereich: Schotterabrieb mit weißen Stellen (links), Gleissetzungen im Schotter (Mitte) und Riffelbildung (rechts)

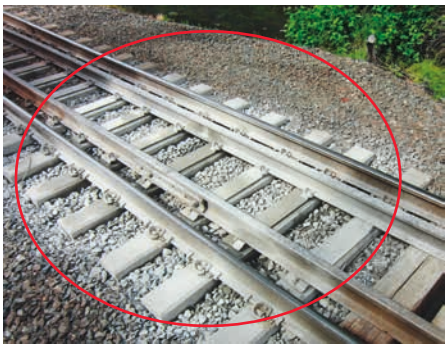


**BILD 5:** Beischienen am Übergang (links), Schotterverklebung zur Schotterstabilisierung (rechts)

die wichtigsten Parameter Achslast und Geschwindigkeit darstellen.

Eine Übergangsoptimierung sollte im Wesentlichen folgende Hauptziele verfolgen:

> Minderung der dynamischen Einflüsse bei örtlicher Änderung der Gleissteifigkeit
> Angleichung vorhandener Steifigkeitssprünge im Gleis durch Abstufung
> Reduktion von Setzungen speziell beim Übergang zu fixen Zwangspunkten
> Anpassung der Länge des Übergangsbereichs hinsichtlich Kosten und Nutzen

Meist ist der klassische Schotteroberbau zu steif ausgebildet und muss an weichere Bereiche, z. B. an eine Feste Fahrbahn mit hochelastischen Stützpunkten, angegliedert werden.

Doch welche Einsenkungs- bzw. Steifigkeitsunterschiede sind im Bereich des Übergangs zulässig? Und über welche Distanz soll sich ein solcher Übergang erstecken? Zu diesen Fragestellungen haben sich über die Jahre international diverse Dimensionierungsrichtlinien etabliert. Es kann beispielsweise empfohlen werden den Steifigkeitssprung so zu gestalten, dass die berechnete Einsenkungsdifferenz zwischen den einzelnen Sektoren nicht mehr als 0,2 mm bis 0,5 mm beträgt.

Bezüglich der konstruktiven Länge gilt das übergeordnete Ziel, den Übergang so lang wie nötig (Nutzen) und so kurz wie möglich (Kosten) zu gestalten. Hier wird oftmals eine ingenieurmäßige Daumenregel angewendet: Je nach Quelle ist die 0,5 sec, 0,7 sec oder 1,0 sec-Regel üblich. Die Entwicklungslänge ist über die Überfahrtszeit festgelegt und somit von der Geschwindigkeit abhängig. Kurze Bauwerke und hohe Geschwindigkeiten würden so jedoch sehr lange und teure Übergänge erfordern. Hier gilt es Kompromisse zu finden. Die absolute Mindestlänge, die dem Drehgestellabstand entspricht, sollte aber auch bei geringen Geschwindigkeiten entsprechend den Empfehlungen nicht unterschritten werden [4].

## 4. KONSTRUKTIVE LÖSUNGSANSÄTZE

Die Tatsache, dass Übergangsbereiche empfindliche Abschnitte im Gleis darstellen, ist nicht neu. Aus diesem Grund gibt es bereits mehrere konstruktive Lösungsansätze, um solche Problemstellen zu entschärfen. Viele Lösungen bringen neben ihren Vorteilen jedoch auch Nachteile mit sich, etwa beim Wartungskomfort oder bei den Kosten.

Im Allgemeinen wird das Ziel angestrebt, einen lokal zu großen Steifigkeitsgradienten über eine größere Entwicklungslänge hinweg zu minimieren. Der Steifigkeitssprung kann kontinuierlich bzw. in kleinen Stufen erfolgen, um dynamische Belastungen auf den Oberbau gering zu halten. Die Lösung liefert hierbei eine Aufteilung des Übergangs in einzelne Sektoren.

Bei Übergängen auf Hochgeschwindigkeitsstrecken sind beispielsweise sechs Sektoren und mehr zu finden. Diese Lösungen stellen High-End-Varianten dar, wobei alle technisch und wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Typische Teile dieser Lösungen sind meist Beischienen, Schotterverklebungen (Bild 5), oder Schleppplatten. Aufgrund jahrelanger Erfahrung wurden die Konstruktionen stets verbessert, um den notwendigen Ansprüchen hinreichend zu genügen. Nichtsdestoweniger sind diese Lösungen für Regelstrecken (nicht HGV) zu teuer und können deshalb aus wirtschaftlicher Sicht beim Großteil der Übergangsbereiche nicht verwendet werden. Bei vielen Anwendungen kommen deshalb einfachere und günstigere Lösungen zum Einsatz. Die einzelnen Teillösungen werden jedoch auch hier verwendet, mit all ihren Vor- und Nachteilen.

Eine gute Alternative oder Ergänzung zu diesen Teillösungen ist der definierte Einsatz von elastischen Oberbaukomponenten auf PUR-Basis (Polyurethan). Durch die besonderen Eigenschaften des Materials kann die Steifigkeit des Oberbaus gezielt gesteuert werden (elastische Eigenschaften) und der Schotter wird durch die ideale Abstimmung nachhaltig geschont (plastische Eigenschaften).

## 5. OPTIMIERUNG DURCH DEFINIERTE ELASTIZITÄT

Um verschiedene Oberbauformen aneinander anzuschließen, ist es wichtig die Gleisparameter der einzelnen Bereiche zu kennen. Durch den Einsatz von hochwertigen Elastomeren können undefinierte Steifigkeiten eliminiert und durch definierte ersetzt werden. Die Einsenkungen in den einzelnen Sektoren des Übergangs werden dadurch gezielt angepasst.

Die Steifigkeitsanpassung kann je nach Oberbau durch Zwischenlagen, Zwischenplatten, Schwellenbesohlungen, Unterschottermatten, Masse-Feder-Systeme oder Schwellenschuheinlageplatten erfolgen (Bild 6).

Insbesondere hochwertige Produkte aus PUR (Polyurethan), wie Sylomer® und Sylodyn®, können hier ihre Stärken ausspielen. Im Gegensatz zu Materialien auf Kautschukbasis kommen keine Weichmacher zum Einsatz, die während der Lebensdauer herausdiffundieren können. Die Steifigkeit bleibt somit über den Verwendungszeitraum hinweg im Wesentlichen gleich und definiert.

Der Werkstoff PUR zeigt eine große Va-

riabilität in seinen Eigenschaften, die je nach Anforderung in die gewünschten Richtungen gelenkt werden kann. Auf das Produkt abgestimmt werden die Materialien Sylomer® und Sylodyn® mit sehr guten elastischen oder mit hohen plastischen Eigenschaften zur Verfügung gestellt. Bei der Verwendung für Zwischenlagen und Zwischenplatten ist beispielsweise das Verhältnis von dynamischer zu statischer Steifigkeit ausschlaggebend, Plastizität ist hier gänzlich unerwünscht. Im Gegensatz hierzu sind bei der Verwendung von Schwellenbesohlungen zur Schotterschonung vorzugsweise plastische Verformungen erwünscht, da diese die Kontaktfläche zwischen Schwelle und Schotter erhöhen und somit die Kontaktpressung deutlich mindern. Durch die Verzahnung der Schottersteine in der Besohlung werden zudem Schotterfließen und Setzungen reduziert, die Stabilität des Eisenbahnoberbaus wird verbessert.

Diese Anpassungsfähigkeit von PUR bietet ein breites Sortiment von Produkten mit fein abgestuften Steifigkeiten, wodurch sich die unterschiedlichen Gleisparameter der einzelnen Sektoren des Übergangs perfekt aneinander angleichen lassen. Ein weiterer Vorteil der abgestimmten Gleiselastizität ist die positive Wirkung auf Setzungen, da durch die Minderung der Schwingungen das Schotterfließen reduziert wird. Der kritische Frequenzbereich, bei dem sich Schottersteine im Schotterbett schneller abnutzen, beginnt bereits bei einer Anregung von etwa 30 Hz, was speziell bei hohen Geschwindigkeiten maßgebend wird [1]. Das Schottergerüst reagiert gerade ab diesem Bereich empfindlich und zeigt als Folge solcher Vibrationen ein verstärkt liquides Verhalten. Jegliche Minderung der Schwingungsamplituden in diesem Frequenzbereich erhöht somit auch die Lebensdauer des Schotteroberbaus.

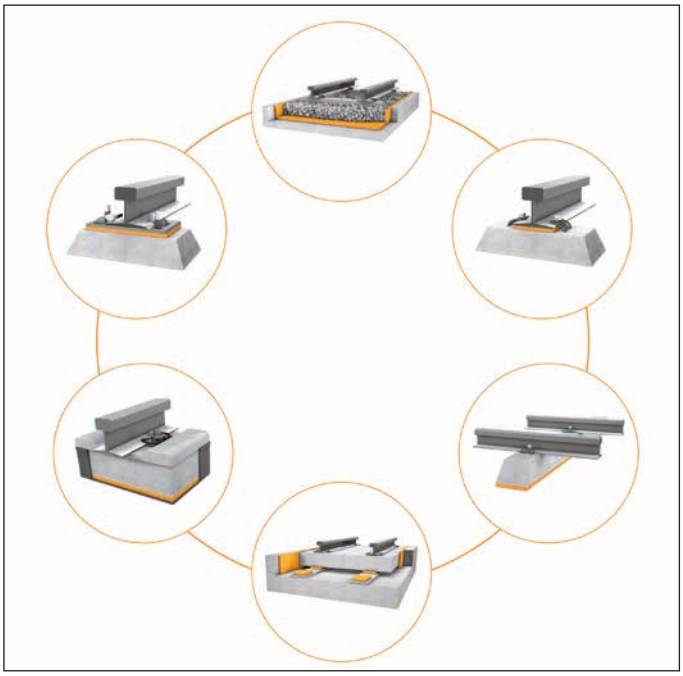


**BILD 6:** Elastische Produkte zur Optimierung des Oberbaus

## 6. BEISPIELE AUS DER PRAXIS

Probleme an Übergängen können durch Aufteilung in mehrere Sektoren auch nachträglich signifikant verringert werden. Die Nachrüstung zusätzlicher elastischer Elemente wie Schwellenbesohlungen, Zwischenlagen oder Zwischenplatten ist ohne Umbau des gesamten Oberbaus möglich, wie das nachfolgende Beispiel einer Brückenkonstruktion des Ferrocarriles Suburbanos Bahnnetzes in Mexico City zeigt.

Hier wurde ein Schotteroberbau an eine Feste Fahrbahn klassisch angeschlossen. Ohne besondere Beachtung des kritischen Übergangs waren in kürzester Zeit die für den Schotterabrieb charakteristischen „weißen Stellen" zu finden. Zusätzlich waren durch hohe dynamische Kräfte die Befestigungsschrauben herausgezogen und die Oberfläche der Festen Fahrbahn wurde durch Betonabplatzungen beschädigt (Bild 7).

Nach eingehender Analyse des Schadensbildes konnte eine Lösung erarbeitet werden. Mittels Berechnung wurden die geeigneten Produkte ausgewählt und aufeinander abgestimmt.

Um durch Beschädigungen entstandene Unebenheiten der Festen Fahrbahn zu kompensieren, wurden Ausgleichsplatten aus speziellem plastischem Sylomer® zwischen Stützpunkt und Beton eingebaut. Die direkt unter dem Schienenfuß verlegten Zwischenlagen bestehen aus weichem, elastischem Sylodyn®, wodurch eine gute Lastverteilung und sehr gute dynamische Eigenschaften gewährleistet werden. Im Übergangsbereich wurden 25 Schwellen mit elastoplastischem Sylomer® besohlt. Dadurch wurden die Setzungen deutlich reduziert und ein gleichmäßiger Übergang geschaffen. Der Verschleiß aller Oberbaukomponenten konnte somit deutlich reduziert werden.

Allgemein sind bereits beim Neubau präventive Maßnahmen anzustreben. Bei einem Schwerlastbetreiber in Deutschland wurde beispielsweise ein Übergang mit Schleppplatte realisiert. Um die Kontaktfläche zwischen Schotter und Schleppplatte zu vergrößern, wurde zum ersten Mal eine neu entwickelte plastische Unterschottermatte »

**BILD 7:** Beschädigungen an der Festen Fahrbahn mit herausgezogenen Befestigungsschrauben (links), Lösung durch Einbau plastischer Ausgleichsplatten und elastischer Zwischenlagen (rechts)

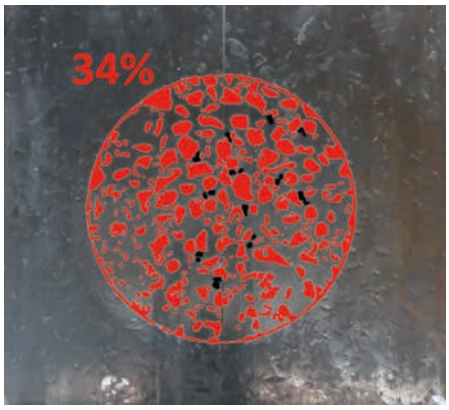



**BILD 8:** Einsenkungsmessungen am Übergang im Schwerlastverkehr (oben), Bestimmung der Kontaktfläche im Labor (unten)

eingesetzt. Die erreichte Kontaktfläche in hauseigenen Laborversuchen liegt bei ca. 34 % (Bild 8), was die Pressungen zwischen Schotter und Schleppplatte um einen Faktor 6 bis 8 reduziert. Der Schotter wird dadurch im Übergangsbereich stabilisiert und geschont.

Zur Verifizierung der Auslegungen wurden im Herbst 2014 Messungen im Gleis durchgeführt, welche im darauffolgenden Sommer 2015 wiederholt wurden. Der Erfahrungsgewinn aus diesen Messungen fließt in weiterer Folge in die Weiterentwicklung des Berechnungsmodells mit ein, wodurch dieses in seiner Prognosequalität gesteigert werden kann.

## 7. NUMERISCHE MODELLIERUNG UNTERSTÜTZT DAS DESIGN

Viele Berechnungsprogramme ermitteln die Biegelinie und somit die Einsenkung der Schiene mit der klassischen Zimmermann-Berechnung, also in Form eines unendlich langen, kontinuierlich gelagerten Balkens. Analytische Modelle auf dieser Basis sind statisch vielfach verifiziert und liefern innerhalb eines gleichartigen Systems mit konstanten Gleisparametern Ergebnisse in ausgesprochen guter Qualität. Bei der Berechnung der kritischen Punkte im Übergangsbereich, nämlich jenen an denen ein Steifigkeitssprung auftritt, stößt das Modell jedoch an seine Grenzen.

Eine Möglichkeit den Übergang zur Gänze zu berechnen bietet hierbei die FEM (Finite Elemente Methode). Die Aufteilung des Modells in endlich viele Elemente und die numerische Berechnung der partiellen Differentialgleichungen sind in der Lage auch am Punkt der Unstetigkeit eine Lösung zu liefern.

Der Aufbau des FEM-Modells besteht aus mehreren elastischen Elementen. Unter der Schwelle können je nach Anwendung unterschiedliche Materialien schichtweise extrudiert werden. Somit kann sowohl die Bettung von Schotter und Unterbau, als auch jene der elastischen Elemente, wie Unterschottermatten und Schwellenbesohlungen, in die Betrachtung einfließen. Da in der Realität die Schwelle unter den Stützpunkten unterstopft wird, wird im Modell der Mittelteil der Schwelle bewusst ausgespart, um eine realitätsnahe Betrachtung zu erreichen (Bild 9).

Zusätzlich werden dem Modell Elemente wie Zwischenplatten und Zwischenlagen individuell hinzugefügt. Dadurch wird der Aufbau des jeweiligen Stützpunkts simuliert.

Für alle im Modell verwendeten elastischen Elemente werden empirische Werkstoffdaten, welche aus Messungen im Labor stammen, hinterlegt. Auf diese Weise werden die nichtlinearen Materialeigenschaften bestmöglich berücksichtigt. Des Weiteren können spezielle Zusatzkonstruktionen wie Beischienen oder Schleppplatten modelliert werden.

Die statischen und dynamischen Berechnungen liefern neben der Schieneneinsenkung noch andere wertvolle Daten, wie etwa Schienenfußspannungen, Schwellendurchbiegungen oder Stützpunktkräfte.

Die in Bild 9 dargestellte Berechnung zeigt wie die Einsenkungen der unterschiedlichen Fahrbahnabschnitte nach der Optimierung gleichmäßig ineinander übergehen. Die Reduktion der Belastung am Übergabepunkt ist in den Stützpunktkräften deutlich zu sehen. Erwartungsgemäß treten an den Enden der einzelnen Sektoren zusätzliche Kraftspitzen auf, jedoch sind diese deutlich kleiner als jene der nicht optimierten Situation.

Die Belastung des Oberbaus im Übergangsbereich ist somit direkt abhängig von der Qualität der Auslegung. Durch das gezielte Bestücken des Modells mit den Materialdaten der spezifischen Produkte, können verschiedene elastische Lagerungen miteinander verglichen und die beste Lösung eruiert werden. Die Beanspruchung des Oberbaus im Übergangsbereich wird so möglichst gering gehalten.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Übergänge zwischen verschiedenen Oberbaukonstruktionen stellen Bahnbetreiber vor besonders große Herausforderungen. Sich abrupt ändernde Bettungssteifigkeiten erhöhen den Verschleiß an den Oberbaukomponenten und erfordern in weiterer Folge einen erhöhten Instandhaltungsaufwand.

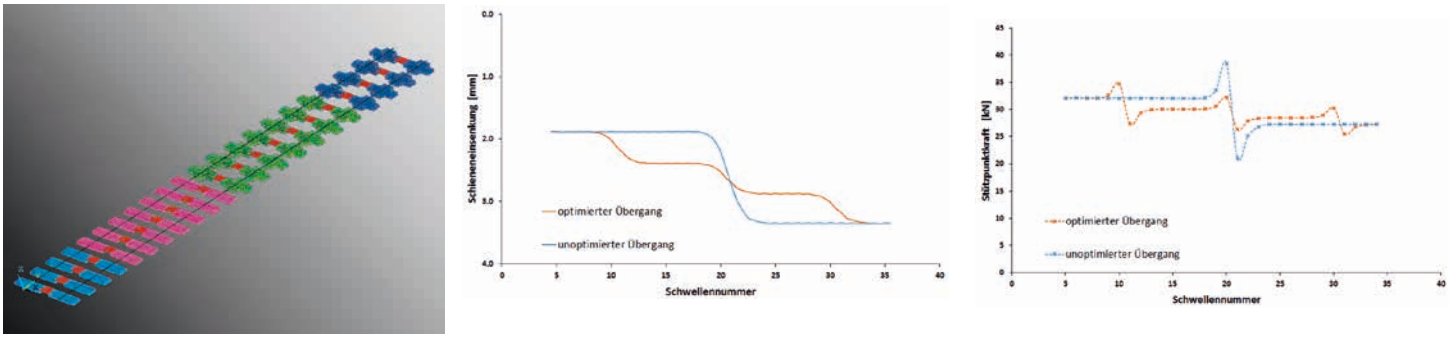



**BILD 9:** FEM-Modell (links), berechnete max. Schieneneinsenkung (Mitte), berechnete max. Stützpunktkraft (rechts)

Elastische Elemente im Fahrweg können die Verschleißraten deutlich minimieren. Hierfür haben sich Polyurethanprodukte aus Sylomer® und Sylodyn® bewährt. Moderne Simulationsmethoden helfen bei der ganzheitlichen Auslegung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen elastischen Ebenen. Durch einen steifigkeits- und setzungsoptimierten Übergangsbereich kann die Gleislagequalität länger erhalten werden und die Verfügbarkeit des Bahnnetzes wird erhöht.

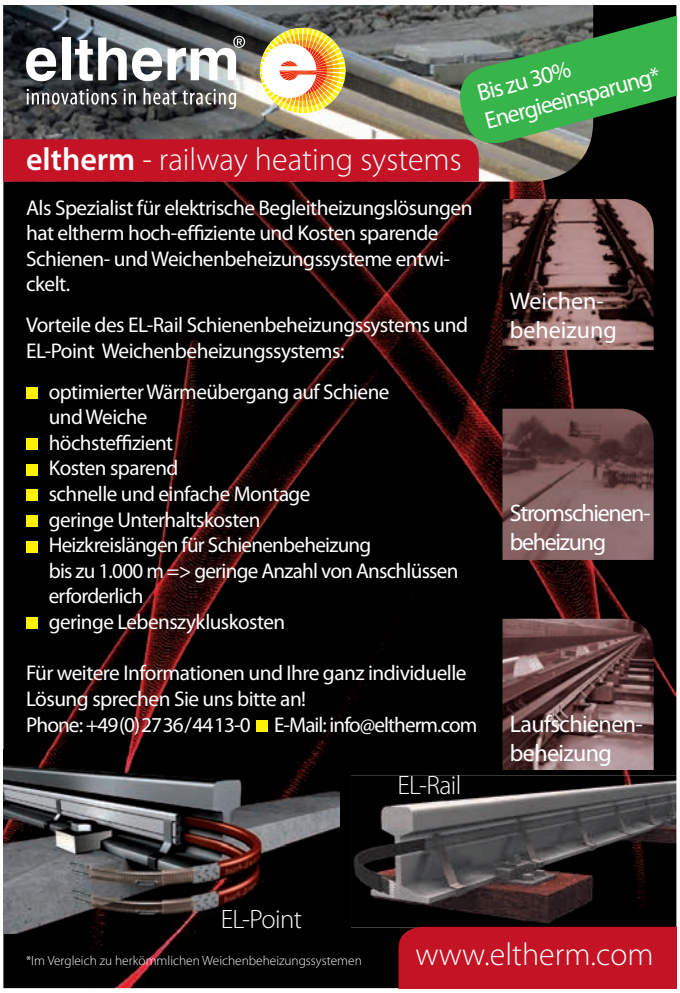
Zur Optimierung eines Übergangs wird dieser in mehrere Sektoren untergliedert und der Steifigkeitsgradient über eine größere Entwicklungslänge hinweg minimiert. Wie ausgeführte Projektbeispiele darlegen, ist damit ein zielgerichteter Einsatz von Zwischenlagen, Zwischenplatten oder Schwellenbesohlungen möglich. Bestehende Konfliktpunkte können dabei auch nachträglich entschärft werden, ohne den gesamten Oberbau neu errichten zu müssen. Durchgeführte Laboruntersuchungen und In-situ-Messungen liefern wertvolle Erkenntnisse, wodurch die Prognosemodelle in ihrer Präzision steigen.

Durch das international gesammelte Know-how kann Infrastrukturbetreibern zukünftig bei Problemen in Übergangsbereichen schnell und bedarfsgerecht geholfen werden. F

### Literatur

[1] Freudenstein, S.; Geisler, K.; Mölter, T.; Mißler, M.; Stolz, C.: Feste Fahrbahnen in Betonbauweise, Betonkalender, Sonderdruck, Ernst&Sohn, 2015.
[2] Grassie, S. L.: Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments, Review Paper, Germany, 2009.
[3] Zuada Coelho, B. E.: Dynamics of railway transition zones in soft soils, Dissertation, Delft University of Technology, 2011.
[4] Schneider, P.: Einsatz von Schwellenbesohlungen in Übergangsbereichen, Vortrag 2. Schwarzenberger Bahn-Gespräche, 2011.

## SUMMARY

### Stiffness optimisation in transitional zones

Interfaces between different forms of permanent way are often problematical even in modern railway networks. The abrupt change from one type of track superstructure to another is reflected in discontinuities in the track parameters, such as subsidence and bedding. The increased dynamic forces due to passing trains cause the superstructure to wear faster. Top-grade elastic elements, which are optimally matched with one another using modern computation methods, improve the quality of the track geometry and ensure that railway lines are available longer.
The authors present an overview of the typical challenges at transitions in the permanent way. They show the possibilities of using the finite element method in combination with material data obtained through laboratory tests, present solutions based on defined elasticity and provide illustrations from projects in various countries.