

Dem idealen Radprofil auf der Spur

Voraussetzung ist eine umfangreiche Analyse der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie

Dr.-Ing. Tobias Herrmann, Dipl.-Phys. Max Metzger, M.A.; Berlin

Es ist für viele Nahverkehrsunternehmen ein bekanntes Phänomen: ein über Jahrzehnte entwickeltes und eingefahrenes Nahverkehrssystem ist vollumfänglich bekannt. Die Kosten und Zeitpunkte der Instandhaltung von Fahrzeugen und Infrastruktur haben sich eingepegelt und es kann anhand der Betriebserfahrung vorhergesagt werden, wann mit welchen Verschleißschäden gerechnet werden muss oder nach welcher Laufleistung beziehungsweise Standzeit die Rad- und Schienenprofile reprofiliert werden müssen.

Trotz aller Routine kommt jedoch kein Nahverkehrsbetrieb auf Dauer ohne den Neuerwerb aus. Hierbei sind Schienen und Fahrzeuge gleichermaßen durch Überalterung oder Netzerweiterung betroffen und oftmals beginnt an dieser Stelle das Dilemma. Denn das bisher eingespielte System kann durch eine Parameterveränderung spürbar beeinflusst werden. Im idealen Fall betrifft dies lediglich die Neubeschaffung. Das heißt, der Verschleiß an den Fahrzeugen oder den Schienen ist höher als erwartet, beeinflusst jedoch den übrigen Bestand nicht in negativer Art.

Im Worst-Case dagegen bewirken die neuen Verschleißerscheinungen gleichzeitig eine allgemeine Verschlechterung des bisherigen eingespielten Systems. Hierbei kann es sich im Speziellen ebenfalls um einen allgemein höheren Verschleiß an Rad und Schiene der Bestandsflotte oder der

nicht neu beschafften Schienenabschnitte handeln, im schlimmsten Fall aber um eine gravierende Veränderung der Kontaktpunktgeometrie mit negativen Folgen für den Fahrkomfort oder für die Fahrsicherheit. Für den Fahrgast bedingt dies eine erhebliche Reduzierung des Fahrkomforts, für den Nahverkehrsbetrieb im schlimmsten Fall ein erhöhtes Entgleisungsrisiko beziehungsweise eine notwendige Reduktion der Fahrgeschwindigkeit und dem folgend eine Betriebseinschränkung.

Theoretischer Hintergrund und kurzer Exkurs zum Stand der Technik

Für die Auswertung und Analyse der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie ergibt sich zunächst kein großer Unterschied zwischen Vollbahnen und anderen Nahverkehrssystemen (Tram, U-Bahn et cetera), zwischen Personenverkehr oder sogar Güterverkehr oder zwischen Radsätzen, welche nur gebremst werden und jenen, welche zusätzlich Traktionskräfte übertragen. Diese Unterscheidungen sind erst bei der anschließenden Deutung der Ergebnisse und für die Entwicklung neuer Profile von Interesse. Grundsätzlich lässt sich jedoch der Verschleiß an Rädern von Schienenfahrzeugen in die zwei allgemeinen Verschleißarten Spurkranzverschleiß und Laufflächenverschleiß unterteilen (Abb. 1). Im Laufflächenverschleiß ist vor allem der Hohlauf von zunehmendem Interesse, dessen Grenzwert zum Beispiel nach

DIN EN 15313:2016 [1] mit 2 mm festgelegt ist. Es existiert grundsätzlich eine deutlich größere Anzahl an Verschleißformen, welche ebenfalls in [1] festgehalten sind.

Diese werden jedoch im Rahmen dieses Aufsatzes nicht berücksichtigt, da einige der genannten Verschleißformen nicht zum behandelten Thema passen oder den Bereich der Materialwissenschaften betreffen und nicht anhand von geometrischen Veränderungen beeinflusst werden können. Gleichzeitig ist die Form des Verschleißes relevant für das Instandhaltungsmanagement, da bei starkem Spurkranzverschleiß deutlich mehr Material beim Reprofilieren abgetragen werden muss – die Verschleißreserve ist schneller aufgebraucht – als bei einem starken Laufflächenverschleiß.

Unabhängig vom Verkehrssystem (Nahverkehr, Regionalverkehr, Fernverkehr, Güterverkehr, Straßenbahn oder U-Bahn) ist die Anforderung an die Profilgeometrie stets die Gleiche: Sicherstellung der Fahrsicherheit bei hohem Fahrkomfort, gefolgt von einer langen Profiltreue und geringem Verschleiß. Nach diesen Gemeinsamkeiten folgen jedoch bereits die Unterschiede. Während im Fernverkehr aufgrund der hohen Geschwindigkeiten speziell im Hochgeschwindigkeitsverkehr vorwiegend auf Strecken mit wenigen Bögen oder in Bögen mit sehr großen Radien gefahren wird, überwiegen im Straßenbahnverkehr Trassierungen mit Bögen bis hinunter auf 15 m Bogenradius. Diese Systemunterschiede wirken sich in den Verschleißbildern aus. Das Straßenbahnverkehrsunternehmen hat Verschleißerscheinungen vor allem in der Spurkranzdicke und an den Schienenkopf(fahr)flanken, während die Radprofile im Fernverkehr vom Laufflächenverschleiß, insbesondere dem Hohlauf, dominiert werden. Der Vollständigkeit wegen wird an dieser Stelle ebenfalls erwähnt, dass im Güterverkehr die dominierende Radver-

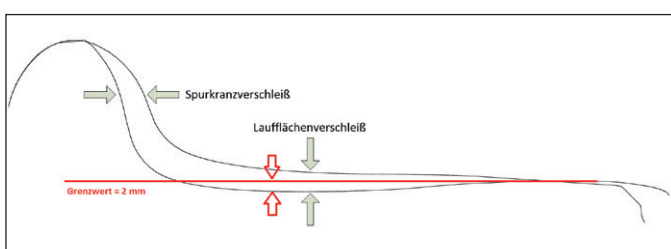


Abb. 1: Vergleich Spurkranzverschleiß und Laufflächenverschleiß, nach [2].

schleißform maßgeblich von den gefahrenen Routen abhängt [3].

Aus den Systemunterschieden ergeben sich für die Radprofiloptimierung unterschiedliche Schwerpunkte der Betrachtung. So muss für Verkehrssysteme mit überwiegendem Spurkranzverschleiß überprüft werden, ob es möglich ist, die rückstellenden Kräfte zu erhöhen, während für Systeme mit überwiegendem Laufflächenverschleiß eine Möglichkeit zur möglichst langen Laufflächenprofiltreue gefunden werden muss. Bei allen Lösungen gilt der Grundsatz, dass mit dem neuen Profil die Fahrsicherheit nicht gefährdet sein darf. Das heißt, dass eine Reduzierung der Grenzgesehwwindigkeit nicht auftritt. Gleichzeitig muss jedoch ebenfalls darauf geachtet werden, dass keine Resonanz zwischen der Drehgestell- und der Wagenkastenbewegung entsteht [4], wobei vor allem die Profiioptimierung einen Einfluss auf die Drehgestellbewegung hat (sofern keine fahrzeugseitigen Parameter verändert werden). An dieser Stelle zeigt sich bereits, dass die Suche nach dem idealen Radprofil (beziehungsweise dem Schienenprofil) oftmals nur eine systemabhängige Einzellösung hervorbringt, welche sich nicht direkt auf andere Verkehrssysteme oder sogar andere Betreiber im gleichen Verkehrssystem übertragen lässt.

Wird ein Blick in die Geschichte der Eisenbahn geworfen, zum Beispiel in [5], wird schnell deutlich, dass die Radprofiloptimierung seit jeher ein Themengebiet der Eisenbahningenieure ist. Auch die Ursachen für diese Untersuchungen sind bis heute stets die gleichen: Fahrsicherheit, Fahrkomfort und Verschleißreduzierung. Vor allem in Bezug auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort hat sich im Laufe der Zeit ein fachspezifischer Quasilinearisierungsparameter zur Beschreibung des Rad-Schiene-Kontakts etabliert, die äquivalente Konizität (4 in Abb. 2).

Basierend auf dem von Stephenson erstmals entdeckten und von Klingel analytisch beschriebenen Wellenlauf [5,6], gibt die äquivalente Konizität an, welche Konizität ein theoretischer konusförmiger Radsatz besitzen würde, welcher die identische Wellenlauflänge wie der reale nichtkonusförmige Radsatz bei einer bestimmten Querauslenkung vorweist. An dieser Stelle wird als kurze Zwischenbemerkung erwähnt, dass für Fahrzeuge ohne Radsatz oftmals angestrebt wird, über die Fahrmotorsteuerung einen synthetischen Wellenlauf zu erzeugen. In diesem Fall sind die theoretischen Grundlagen im Prinzip identisch. Der Parameter äquivalente Konizität hat sich trotz seiner lediglich Quasilinearisierung und aller dazugehörigen Nachteile als ein Parameter zur Festsetzung von Grenzwerten für den Vollbahnbereich durchgesetzt. Überlicherweise wird der Grenzwert bei 3 mm angegeben und darf bestimmte geschwindigkeitsabhängige Kennwerte nicht übersteigen [7,8].

Im Bereich der BoStrab sind derartige Grenzwerte nicht vorhanden, da sie aufgrund der niedrigen Fahrgesehwwindigkeit häufig nicht notwendig sind. Anhand dieser Ausführungen zeigt sich bereits, dass die äquivalente Konizität vor allem als ein Parameter zur Beschreibung des Fahrverhaltens genutzt wird. Dies kann damit begründet werden, dass bei aktuellen Fahrzeugen keine relevanten Nichtlinearitäten

ANZEIGE

P&T CONNECTED



Condition Monitoring
und Big Data für
Bahnba-Maschinen

ptconnected.com



Zum Autor

Dr.-Ing. Tobias Herrmann (33) ist seit 2017 Mitarbeiter am IFB Institut für Bahntechnik GmbH in Berlin. Er hat Verkehrswesen (Fahrzeugtechnik) an der TU Berlin studiert und war von 2011 bis 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Schienenfahrzeuge der TU Berlin, wo er 2017 zum Dr.-Ing. promoviert wurde.



Zum Autor

Dipl.-Phys. Max Metzger, M.A. (33) ist seit 2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bahntechnik GmbH und am Fachgebiet Gender MINT an der Fakultät für Maschinenbau und Bioverfahrenstechnik der Hochschule Hannover. Seit 2016 promoviert er an der TU Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ an der Professur für „Technik spurgeführter Fahrzeuge“. Metzger hat Physik und Philosophie an der Universität Potsdam studiert.

im Fahrwerk vorliegen und das Fahrverhalten bei gleichen Fahrwerksparametern maßgeblich durch die Rad-Schiene-Kontakt-Geometrie beeinflusst wird [9]. Weitere wichtige Parameter zur Beschreibung des Rad-Schiene-Kontakts sind zum einen die Kontaktpunktverteilung (1), die Rollradiendifferenzfunktion (2) und die Kontaktwinkeldifferenzfunktion (3). In der

Abbildung 2 werden die zuvor erwähnten Parameter in einem vom IFB entwickelten Analysetool dargestellt.

Verfahren zur Ermittlung von Radprofilen

Allgemein existieren verschiedene am Institut für Bahntechnik GmbH (IFB) in der

Vergangenheits bereits angewandte Methoden zur Optimierung von Rad- oder Schienenprofilen. So kann dies anhand von Zielkennwerten für die äquivalente Konizität, den Kontaktwinkel oder den Verlauf der Rollradiendifferenzfunktion erfolgen. Weitere Möglichkeiten sind die Ableitung von einer gemittelten Profilform anhand eines Datensatzes mit mehreren verschlissenen Radprofilen, die Anpassung des Radprofils an die Gestalt der Schienenprofile oder genetische Verfahren unter Zuhilfenahme von Simulationsrechnungen. Alle Verfahren müssen jedoch stets das gleiche zeitaufwendige Prinzip im Hintergrund durchlaufen, Versuch und Irrtum.

Sollte ein Verkehrsunternehmen nicht die finanziellen Mittel für aufwendige Simulationsrechnungen zur Optimierung von Radprofilen an Schienenfahrzeugen besitzen, besteht immer noch die Möglichkeit, über verschiedene Analyseparameter, welche nachfolgend erläutert werden, ein optimiertes Rad- oder Schienenprofil zu entwickeln und über den Betriebseinsatz zu erproben.

Zunächst muss entschieden werden, welche Verschleißform reduziert werden soll: Spurkranz- oder Laufflächenverschleiß. Sollte vor allem Spurkranzverschleiß vor-

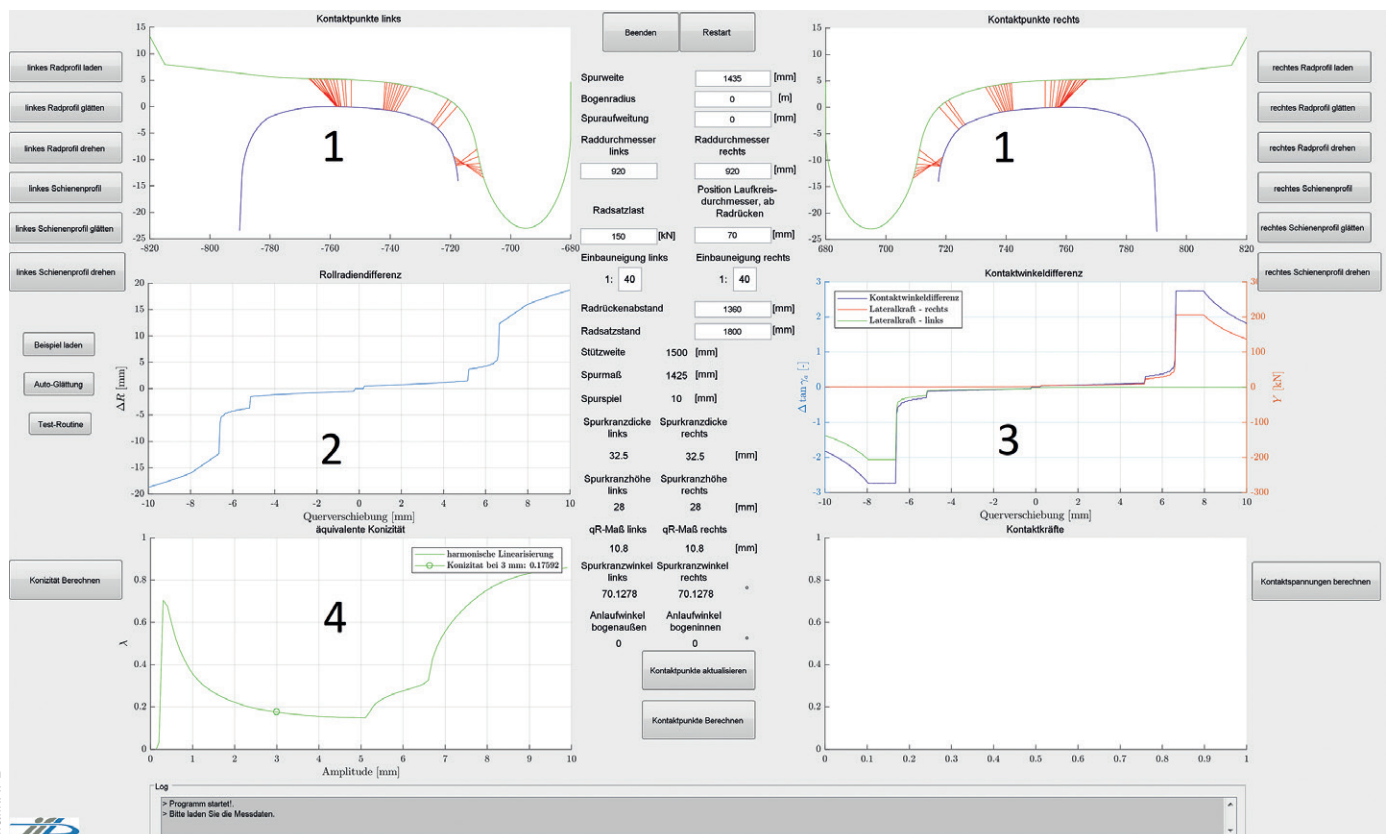


Abb. 2: Darstellung der wesentlichen Parameter zur Bewertung der Kontaktgeometrie.

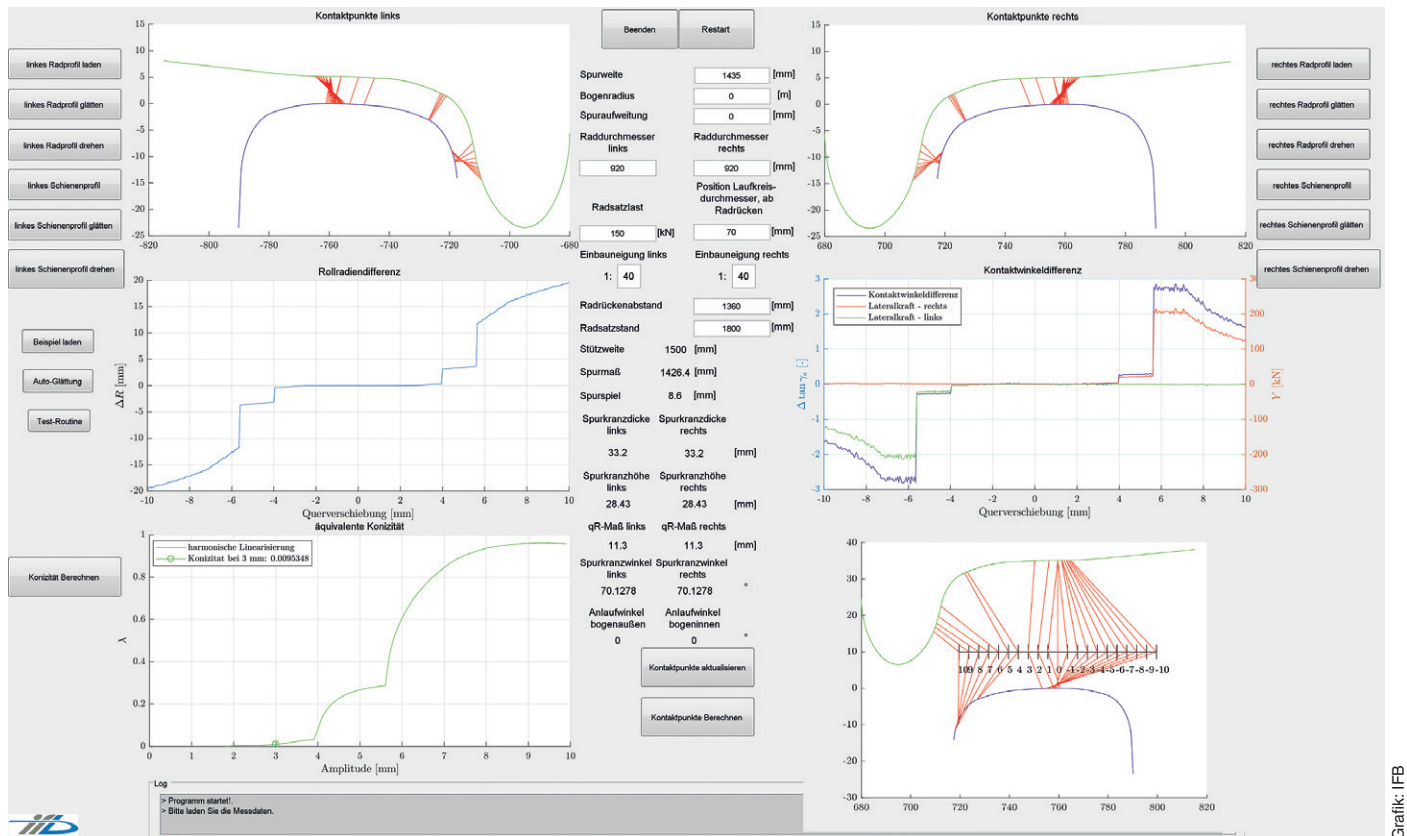


Abb. 3: Darstellung der Kontaktgeometrie der Ausgangsprofile.

liegen, so hängt dieser unter anderem vom Radsatzstand, der Steifigkeit der Radsatzlängsführung, den Bogenradien und der Rollradiendifferenzfunktion ab. Bei Gleisbogenradien unterhalb von 100 m wird eine Änderung der Rollradiendifferenzfunktion vermutlich keine oder lediglich geringe Effekte bringen, für Verkehrssysteme dieser Art eignen sich eher Spurkranzschmieranlagen oder Schienenkopfkonditionierungsanlagen.

Sind die Gleisbogenradien jedoch oberhalb von 100–150 m und es dominiert ein Spurkranzverschleiß den Instandhaltungsaufwand, so kann versucht werden, über eine höhere Rollradiendifferenzfunktion den Anlaufwinkel des führenden Radsatzes zu verringern oder einen Spurkranzanlauf komplett zu vermeiden und damit den Verschleiß zu reduzieren. Grundlage hierfür stellt die bekannte Bogengleichung

$$\Delta r = 2e_0 \cdot \frac{r_0}{R_m}$$

mit Δr als Rollradiendifferenz, $2e_0$ als Stützweite, r_0 als Laufkreisradius und R_m als Bogenradius dar [10]. Diese Formel gibt an, welche Rollradiendifferenz notwendig ist, damit ein freier Radsatz sich im Bogen radial einstellen kann und die-

sen schlupffrei durchrollt. Obwohl diese radiale Einstellbarkeit der Radsätze durch eine steife Längsfesselung der Radsätze im Drehgestell reduziert bis verhindert wird, können die aus dem Kontaktpunkt auf den Radsatz und das Drehgestell wirkenden rückstellenden Kräfte (in Abhängigkeit der Rollradiendifferenz und des Kontaktwinkels) den Anlaufwinkel und damit den Verschleiß reduzieren. Gleichzeitig bewirkt eine Rollradiendifferenz bei der Fahrt in der Geraden eine Selbstzentrierung der Radsätze und der Drehgestellmittenbewegung. Im Umkehrschluss bedeutet dieser Zusammenhang, dass eine Rollradiendifferenz stets vorhanden sein soll, da es andernfalls bei der Fahrt in der Geraden zu einem Spurkranzanlauf kommen kann, mit der Gefahr, dass der Radsatz sich nicht zurückstellt und permanent anläuft. Weiterhin werden ohne eine Rollradiendifferenz keine Bogenfahrt bedingten Richtkräfte ohne Spurkranzanlauf aufgebaut, und der Verschleiß an Rad und Schiene erhöht sich.

Geht es jedoch vorwiegend um die Profilo-optimierung der Lauffläche, müssen andere Parameter berücksichtigt werden. Die grundsätzlichen Ziele hierbei sind im Allgemeinen der Wunsch nach einer niedrigen äquivalenten Konizität beziehungs-

weise einer Konizität, welche die Grenzwerte nicht überschreitet und eine möglichst lange Formstabilität des Radprofils. An dieser Stelle muss jedoch darauf geachtet werden, dass eine äquivalente Konizität in der Lauffläche von 0 gleichzeitig nicht vorhandene Rückstellkräfte bedeutet und damit den Verlust der stets gewünschten Selbstzentrierung eines Radsatzes. Dieser ist wichtig für einen gleichmäßigen Verschleiß entlang der Profillauffläche und die Vermeidung von Spurkranzanlauf bei der Fahrt in der Geraden. Ebenso kann durch eine zu geringe äquivalente Konizität eine Resonanz zwischen der Drehgestellbewegung und der Eigenfrequenz der Querbewegung des Wagenkastens auftreten. Dies gilt es aus Komfortgründen ebenfalls zu vermeiden [4].

Für die Entwicklung eines neuen Profils ist die Analyse der äquivalenten Konizität ein probates Mittel, um die Fahrstabilität abzuschätzen. Hierbei wird vor allem der Kennwert bei 3 mm Queramplitude in Betracht gezogen, da es als allgemein bekannt gilt, dass ein Radsatz im regulären Betrieb eine Wellenlaufbewegung mit einer Queramplitude von 3 mm durchführt [11]. Die Festlegung der äquivalenten Konizität als alleinigen Parameter zur Beschreibung

Gratik: IFB

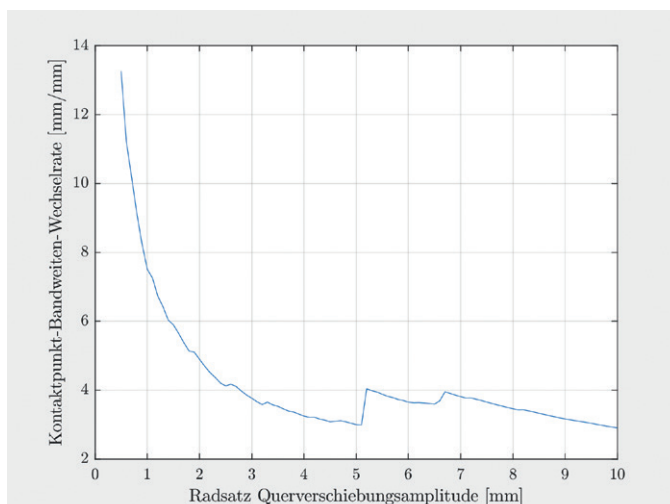
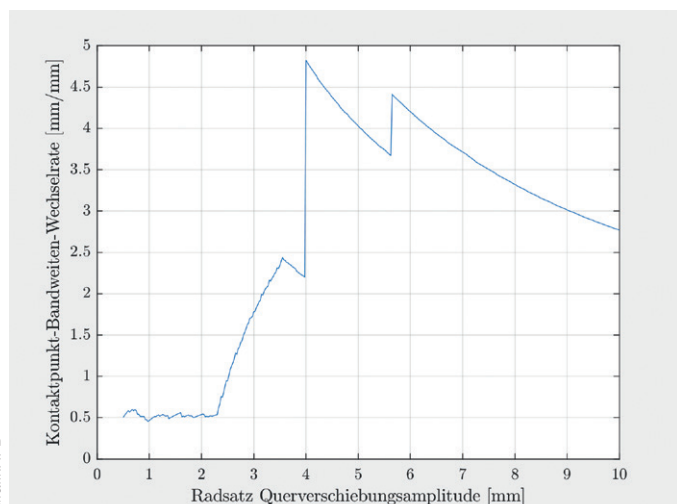


Abb. 4: Darstellung des V_w -Faktors für die Ausgangsprofile beim Verkehrsbetrieb (links) und der S1002 60E1 Paarung (rechts).

der Fahrzeugdynamik ist bereits mehrfach von True [12,13] kritisiert worden. Dennoch hält sich dieser Parameter weiterhin als vereinfachtes Mittel zur Beschreibung des Rad-Schiene-Kontakts hinsichtlich der Fahrzeugdynamik. Um dennoch eine höhere Detailtiefe in die Auswertung der Rad-Schiene-Geometrie zu bekommen, sind von Polach in [14] mehrere zusätzliche Parameter zusammengetragen und vorgestellt worden.

Die vom IFB für die Profilloptimierung genutzten zusätzlichen Parameter werden nachfolgend kurz zusammengefasst wiedergegeben. Sie entsprechen dem derzeitigen Stand der Technik und unterliegen einer ständigen Verbesserung und Erweiterung im Rahmen des vom IFB entwickelten Analysetools. Der erste zusätzliche Parameter zur Entwicklung eines formstabilen Radprofils bezieht sich auf die Steigung der äquivalenten Konizität um den Bereich bei 3 mm Queramplitude. Polach hatte in seinen Untersuchungen herausgefunden, dass neben dem Kennwert der äquivalenten Konizität gleichzeitig die Steigung der äquivalenten Konizität bestimmt, ob eine unterkritische oder überkritische Hopf-Verzweigung vorliegt und hierüber die Grenzgeschwindigkeit bestimmt wird.

Für den Entwicklungsprozess eines neuen Profils bedeutet dies, dass ein zusätzlich eingeführter Parameter mit der Bezeichnung Nichtlinearitätsparameter [14]

$$NP = \frac{\lambda_4 \cdot \lambda_2}{2}$$

zur Beschreibung der Steigung der äquivalenten Konizität berücksichtigt werden muss. Hierbei ist λ_4 der Kennwert der äqui-

valenten Konizität bei 4 mm Queramplitude und λ_2 der Kennwert bei 2 mm Queramplitude.

Der zweite zu berücksichtigende Zusatzparameter für eine hohe Formstabilität analysiert das Verhältnis des Abstands der Kontaktpunkte zur doppelten Queramplitude. Die in [15,14] eingeführte Kontaktpunkt-Bandweiten-Wechselrate (nachfolgend V_w -Faktor genannt) ist wie folgt definiert:

$$V_w = \frac{L_w}{2 \cdot y} \text{ mit } L_w = P_y - P_{-y}$$

L_w stellt hierbei die Kontaktpunkt-Bandweite dar und ist die Differenz der Laufkoordinaten des Kontaktpunktes bei gegebener Querverschiebung y .

Sofern detailliertere Untersuchungen mit einem größeren Fokus auf vorhergehende Simulationsrechnungen gewünscht sind, empfiehlt sich die Auswertung dreier weiterer Parameter. Diese sind die Kontaktpunktbewegung, die Kontaktpunktkonzentration und der Kontaktpunktkonzentrationsindex [14]. Da das IFB als Entwicklungsprozess aktuell einen praxisbezogenen Ansatz ohne die Nutzung von Simulationsrechnungen verfolgt, werden diese drei weiteren Parameter nicht näher erläutert. Eine Anwendung für zukünftige Aufgabenstellungen wird jedoch nicht ausgeschlossen.

Verschleiß lässt sich grundsätzlich nicht verhindern. Es ist jedoch möglich, die Verschleißrate unter Beachtung bestimmter Randbedingungen und sich einstellender verschleißbedingter Kontakteigenschaften zu reduzieren. So ist in [14] gezeigt worden, dass unabhängig vom Ausgangsprofil

sich stets die identischen verschleißinduzierten Parametereigenschaften feststellen lassen. Diese sind eine mit zunehmender Laufleistung steigende äquivalente Konizität und ein sinkender Nichtlinearitätsparameter. Ab einer bestimmten Laufleistung stabilisieren sich jedoch diese Parameter und bleiben nahezu konstant. Ab diesem Zeitpunkt hatten die Radprofile eine hohe Formstabilität aufgewiesen und für die Zusatzparameter konnte durch Polach abgeleitet werden, dass für eine hohe Formstabilität des Radprofils ein geringfügig negativer NP-Wert, sowie eine hohe Kontaktpunkt-Bandweiten-Wechselrate von Vorteil sind. An dieser Stelle ergibt sich jedoch ein Interessenskonflikt, da ein negativer NP-Wert zu einer unterkritischen Hopf-Verzweigung führt und dies die Grenzgeschwindigkeit reduzieren kann.

Zum Abschluss dieses Abschnitts sei erwähnt, dass sich diese Erkenntnisse vor allem auf den Verschleiß auf der Lauffläche beziehen, und bei häufigen Fahrten durch Gleisbögen mit kleinen Radien sich komplett andere Verschleißbilder ergeben können. Eine Verschleißanalyse hierfür ist lediglich in einer aufwändigen Kombination von Mehrkörpersimulation mit FE-Rechnung möglich, da die bisherigen Verschleißmodelle für Bogenfahrten im Straßenbahnbereich nicht mehr zutreffen. In [16] ist diesbezüglich eine interessante Methode zur Auswertung vorgeschlagen worden.

Auswertung eines Praxisbeispiels

In der Abbildung 3 werden die Ergebnisse einer Rad-Schiene-Untersuchung eines klei-



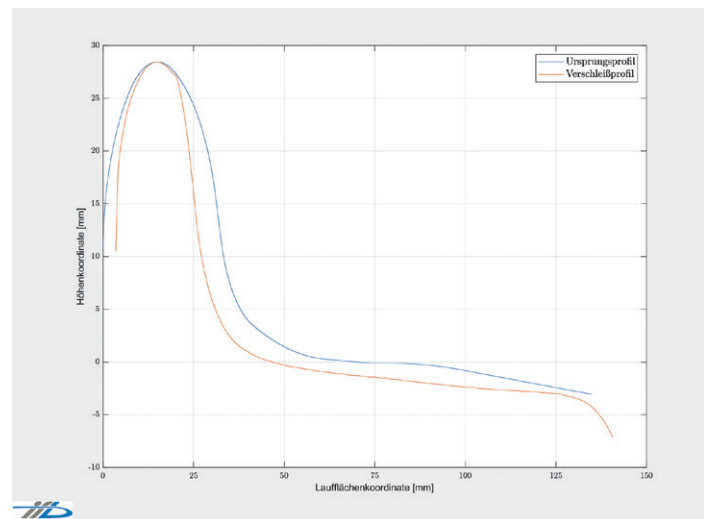
Fotos: IFB

Abb. 5: Verschleißbild der Schiene in der Geraden (links), Übergangsbogen Bogeneinfahrt (rechts).

nen Verkehrsbetriebes mit eigener Gleisanlage dargestellt.

Die Kontaktpunktverteilung für das linke und rechte Rad zeigt sofort, dass eine sehr enge Kontaktpunktkonzentration auf der Laufläche des Rades und der Schienenlaufläche vorliegt, gefolgt von einem Kontaktsprung in die Spurkranzkehle und anschließend an die Spurkranzflanke. Die Berechnung der Rollradiendifferenzfunktion zeigt, dass zwischen -4 mm bis 4 mm Querverschiebung keine Rollradiendifferenz vorliegt und gleichzeitig die rückstellenden Kräfte (welche für den Radsatz zentrierend wirken) in diesem Bereich ebenfalls nicht vorhanden sind. Gleichzei-

Abb. 6: Vergleich Ausgangsprofil und gemessenes Verschleißprofil



Grafik: IFB

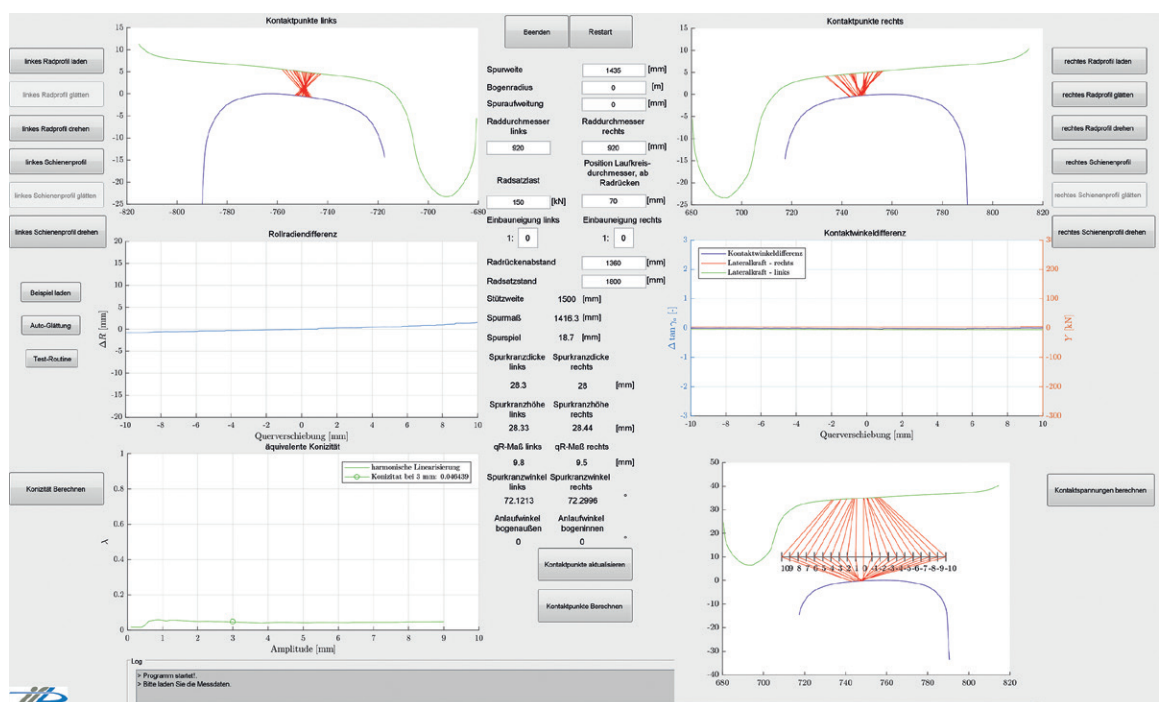


Abb. 7: Darstellung der Kontaktgeometrie für gemessene Rad- und Schienenprofile.

Grafik: IFB

Gratik: IFB

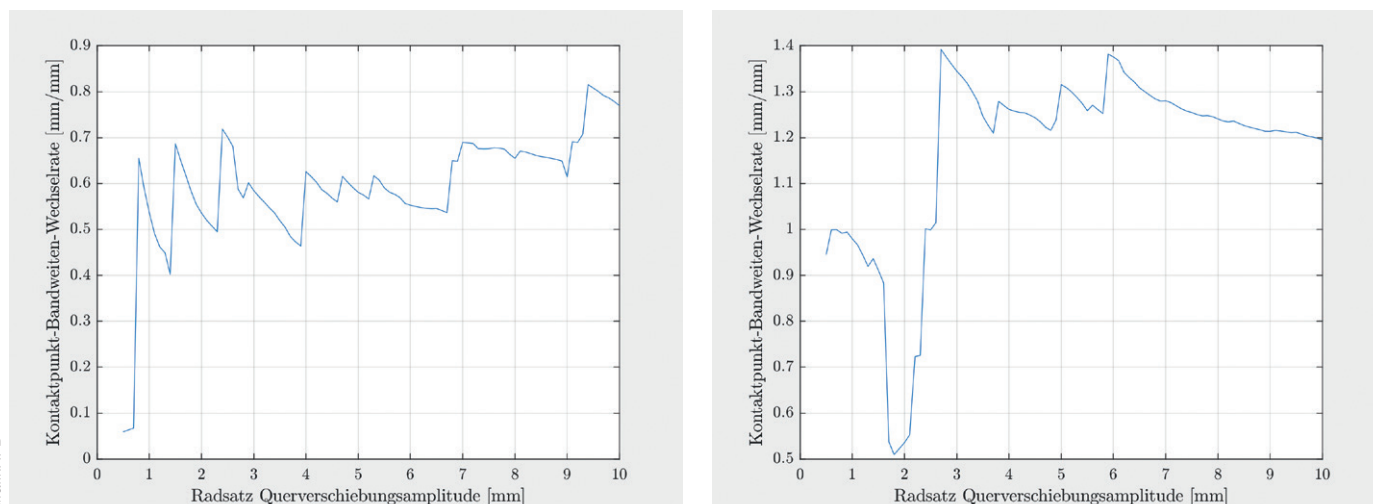


Abb. 8: Darstellung des V_w -Faktors für das linke Radprofil (links) und das rechte Radprofil (rechts) bei gemessenen Rad- und Schienenprofilen.

tig beträgt die laterale Verschiebung, ab der rückstellende Kräfte wirken können, bis es zu einem Kontakt an der Spurkranzflanke kommt, lediglich 1,5 mm (von 4 mm bis 5,5 mm Queramplitude).

Diese eher ungewöhnliche Profilpaarung weist hinsichtlich der Laufstabilität wegen der sehr geringen äquivalenten Konizität vermeintlich gute Eigenschaften auf, jedoch ist gleichzeitig aufgrund der nicht vorhandenen rückstellenden Kräfte bis zu einer Amplitude von 4 mm und der sehr engen Kontaktpunktkonzentration auf Rad und Schiene mit einem einseitigen Verschleiß auf der Lauffläche und Spurkranzverschleiß zu rechnen. Das Ergebnis der Berechnung des V_w -Faktors ist in der Abbildung 4 links dargestellt. Es zeigt sich, dass insbesondere im Bereich bis etwa 3,5 mm Queramplitude nicht mit einer hohen Formstabilität zu rechnen ist. Als Vergleich wird in der Abbildung 4 rechts der V_w -Faktor für das Verschleißprofil S1002 auf dem identischen Schienenprofil dargestellt. Für eine hohe Formstabilität vor allem im Bereich der Messkreisebene wäre der rechte Verlauf theoretisch zu bevorzugen.

Als Resultat all dieser Faktoren muss bereits bei der Fahrt in der Geraden sowie bei Bögen mit großen Radien oder in Übergangsbögen mit einem Anlaufen der Radprofile im Bereich der Spurkranzkehle bis hin zur Spurkranzflanke gerechnet werden. Hierbei erhöht insbesondere der Kontakt in der Spurkranzkehle durch den wirkenden Bohrschlupf, welcher gleichzeitig einen Querschlupf erzeugt [11], den Verschleiß an Rad und Schiene zusätzlich [17].

In der Abbildung 5 werden exemplarisch aufgenommene Verschleißbilder der Schiene dargestellt. Es zeigen sich ein erwartetes Verschleißbild mit einem konzentrierten Verschleiß in der Lauffläche sowie Verschleißspuren durch den Kontakt in der Spurkranzkehle an der Schienenkopfabrundung (linkes Bild). Das rechte Bild zeigt den Beginn des Übergangsbogens und an dieser Stelle wird bereits der Verschleiß an der Schienenfahrflanke durch die nicht vorhandenen rückstellenden Kräfte deutlich.

Bezüglich des Radverschleißes ist anhand der Abbildung 3 von einem trassierungsabhängigen Verschleiß auszugehen. Sollte vorwiegend auf geraden Strecken der Betrieb erfolgen, ist auf Grund der konzentrierten Kontaktpunktlagen auf der Lauffläche mit einem Hohl Lauf zu rechnen, welcher eher nach Radaußen hin auftreten sollte. Gleichzeitig können Verschleißerscheinungen in der Spurkranzkehle und an der Spurkranzflanke nicht ausgeschlossen werden. Sollte der Betrieb jedoch vorwiegend auf bogenreichen Strecken erfolgen, ist von einem hohen Spurkranzflankenverschleiß auszugehen.

In der Abbildung 6 wird ein gemessenes Radprofil im verschlissenen Zustand mit dem Ursprungsprofil verglichen. Es zeigt sich ein Verschleiß sowohl an der Spurkranzrückenflanke als auch an der Spurkranzstirnflanke und in der Spurkranzkehle. Ebenso zeigt sich, dass durch die Kontaktpunktkonzentration auf der Lauffläche der Verschleiß zwischen 60 mm und 100 mm (Querkoordinate) das markante Ursprungsprofil abgetragen hat. Zwischen 100 mm und 120 mm deutet sich eine Senke an, aber generell kann gesagt werden, dass

auf Grund der erhöhten Neigung radaußen eine Hohl Laufbildung in diesem Stadium vermieden wird. Gleichzeitig ist aber der Verschleiß am Spurkranz signifikant höher.

Die detaillierte Auswertung zur Kontaktgeometrie in Abbildung 7 zeigt, dass die Spurkranzdicke um bis zu 5,2 mm abgenommen hat und sich eine bemerkenswerte Kontaktpunktverteilung ergibt. Im vorliegenden Betrachtungsabschnitt der Queramplitude von 10 mm zeigt sich, dass weiterhin lediglich eine geringe äquivalente Konizität und nahezu keine rückstellenden Kräfte vorliegen. Die Kontaktpunktverteilung ähnelt der eines rein konischen Profils mit einer geringen Laufflächenneigung.

Zusätzlich werden in der Abbildung 8 die V_w -Faktoren für das linke und das rechte Radprofil bei gemessenen Schienen- und Radprofil angezeigt. Es zeigt sich, dass der Verlauf der Kennwerte zum Teil gesunken ist und nicht den umfangreichen Erfahrungen und Analysen nach [14] entspricht. Dies lässt den Schluss zu, dass sich noch kein formstabiles Radprofil eingestellt hat, gleichzeitig jedoch der Spurkranzverschleiß überwiegt. Das bestätigt zusätzlich die vermutete Entwicklung, dass für die Lebensdauer des Radsatzes sowie des Radprofils der Verschleiß am Spurkranz maßgeblich verantwortlich ist und die limitierende Größe darstellt.

Häufig kann von den jeweiligen Verkehrsbetrieben nicht mehr gesagt werden, warum ein bestimmtes Radprofil vor mehreren Jahren eingeführt worden ist. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass mit der Gestaltung der Lauffläche eine Hohl Laufbildung bis zu dem betrachteten Zeitpunkt verhindert

wird. Das Verschleißprofil des Rades stellt insbesondere im Bereich der Lauffläche ein konisches Profil mit einer sehr geringen Konizität dar. Gleichzeitig besteht jedoch ein sehr hoher Spurkranzverschleiß, welcher für das Instandhaltungsmanagement kritischer als der Laufflächenverschleiß zu bewerten ist.

Ein erster und durchaus sehr simpler Verbesserungsvorschlag für die vorliegende Anwendung ist die Verwendung des in den 1970-er Jahren entwickelten und heute noch verwendeten Verschleißprofils S1002 nach DIN EN 13715 [18]. Inwiefern sich dieses Radprofil im Betrieb bewährt, wird sich jedoch erst anhand des Praxiseinsatzes zeigen. Eine Analyse der Kontaktpunktverteilung (Abb. 2) zeigt jedoch eine deutlich bessere und gleichmäßigere Kontaktpunktverteilung, in Kombination mit einer theoretisch höheren Formstabilität (Abb. 4 rechts). Werden gleichzeitig die Kontaktspannungen im Kontaktpunkt für die Lauffläche nach der Hertz'schen Methode (Vorgehensweise für Rad-Schiene-Paarung nach [19]) berechnet (elliptische Kontaktflächen), so sind diese im vorliegenden Fall für den Punkt der Messkreisebene um das 1,12 fache höher als bei einem S1002-Radprofil auf der identischen Schiene. Dieser Punkt ist dahingehend von Interesse, als dass eine geringe Kontaktspannung stets als günstiger zu betrachten ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorhergegangenen Ausführungen zeigen, dass die Suche nach dem idealen Radprofil eine umfangreiche Analyse der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie erfordert. Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Auswertung ist der Nutzung eines entsprechend nach DIN EN 15302 [20] validierten

Berechnungstools zur Auswertung von gemessenen und synthetisch erstellten Rad- und Schienenprofilen sowie zur Berechnung der jeweiligen Kennwerte wie Kontaktpunktverteilung, Rollradiendifferenzfunktion oder der äquivalenten Konizität.

Das IFB hat ein derartiges Analysetool entwickelt und setzt es für seine Kunden ein. Mit Unterstützung der vorgestellten zusätzlichen Parameter wurde ein möglicher praxisorientierter Ansatz zur Radprofiloptimierung aufgezeigt, der ohne aufwändige und kostenintensive Simulationsrechnun-

gen auskommt. Ebenso ist es möglich, für bestimmte Streckenabschnitte explizite Schienenprofiloptimierungen in Form von Schleifanweisungen auszuarbeiten. Durch die Optimierungen im Rad-Schiene-Kontakt ist es möglich, ein aus dem Lot geratenes komplexes System aus Fahrzeugen und Infrastruktur bei schienengebundenen Verkehrssystemen wieder „gerade zu rücken“. Hierfür sind jedoch die Kooperation und der Mut von Verkehrsbetrieben nötig, mit der nötigen Ausdauer ein neues Profil über einen längeren Zeitraum nach der Einführung zu überwachen.

Literatur/Anmerkungen

- [1] DIN EN 15313:2016; 09.2016. Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung. abgerufen am: 02.2018
- [2] Herrmann, T.: Methode zur Detektion von hohlgefahrenen Rädern an Güterwagen. Dissertation TU Berlin. Shaker Verlag 2017.
- [3] Kettler, G.: Aktuelle Erfahrungen mit Güterwagenlaufwerken. 41. Moderne Schienenfahrzeuge. Graz 2013.
- [4] Polach, O.; Berg, M.; Iwnicki, S.: Simulation. In: Iwnicki, S. (Hrsg.): Handbook of railway vehicle dynamics. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis 2006
- [5] Wickens, A. H.: A History of Railway Vehicle Dynamics. In: Iwnicki, S. (Hrsg.): Handbook of railway vehicle dynamics. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis 2006
- [6] Klingel, J.: Ueber den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung (1883) 4, S. 113–123.
- [7] [Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 321/2013 der Kommission vom 13. März 2013 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. TSI WAG. abgerufen am: 02.2018
- [8] Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union. TSI LOC&PAS. abgerufen am: 02.2018
- [9] Polach, O.: Einfluss der Nichtlinearitäten des Systems Fahrzeug-Gleis auf die Stabilität. VDI-Berichte Nr. 2022 (2007). S. 35–46
- [10] Dellmann, T.; Haigermoser, A. u. Hecht, M.: Grundlagen der Fahrzeugtechnik. In: Schindler, C. (Hrsg.): Handbuch Schienenfahrzeuge. Entwicklung, Produktion, Instandhaltung. Hamburg: Eurailpress 2014, S. 15–181.
- [11] Knothe, K. u. Stichel, S.: Schienenfahrzeugdynamik. VDI-Buch. Berlin: Springer 2003.
- [12] True, H.: Nichtlineare Schienenfahrzeugdynamik. Neue Grundlagen, Methoden und Ergebnisse. ZEVrail Glasers Annalen 11-12 November – Dezember (2004) 128.
- [13] True, H.: Zur äquivalenten Konizität. ZEVrail Glasers Annalen Tagungsband SFT Graz 2007 (2007) 131, S. 290–298.
- [14] Polach, O.; Nicklisch, D.: Wheel/Rail Contact Geometry Parameters In Regard To Vehicle Behaviour And Their Alteration With Wear. 10th International Conference on Contact Mechanics. CM 2015. Colorado Springs, Colorado, USA
- [15] Gan, F.; Dai, G.: Impact of Rail Cant on the Wheel-Rail Contact Geometry Relationship of Worn Tread. Paper 15, in: Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance Railways 2014, J. Pombo, (Editor), Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland
- [16] Heck, J.: Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik 44. KIT Scientific Publishing. 2016
- [17] Rießberger, K.: Das Zusammenwirken von Rad und Schiene. In: Fendrich, L. u. Fengler, W. (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Das Zusammenwirken von Rad und Schiene. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2013
- [18] DIN EN 13715:2006+A1:2010; 01.2011. Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder – Radprofile, abgerufen am: 02.2018.
- [19] Ayasse, J. B. u. Chollet, H.: Wheel-Rail Contact. In: Iwnicki, S. (Hrsg.): Handbook of railway vehicle dynamics. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis 2006,
- [20] DIN EN 15302:2008+A1:2010; 01.2011. Bahnanwendungen – Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Konizität. abgerufen am: 11.2017

Zusammenfassung/Summary

Dem idealen Radprofil auf der Spur

Die Suche nach dem idealen Radprofil ist oftmals ein aufwändiges und langwieriges Verfahren. Es existieren verschiedene Methoden, mit denen Radprofile, aber auch Schienenprofile optimiert werden können. Das Institut für Bahntechnik GmbH (IFB) hat sich in den letzten Jahren dahingehend spezialisiert, Radprofile und Schienenprofile in einem praxisbezogenen Ansatz unter Verzicht auf kostenintensive Simulationsrechnungen zu optimieren. Diese Vorgehensweise folgte dem Leidensdruck vieler schienengebundener Verkehrsbetriebe, welche oftmals lediglich mit geringem Budget ausgestattet sind, aber dennoch einen erheblichen Optimierungsbedarf beim Rad-Schiene-Kontakt haben. Im Beitrag erläutern die Autoren zunächst den im IFB genutzten Stand der Technik und verdeutlichen diesen anschließend anhand eines Praxisbeispiels. Dies beinhaltet die Gegenüberstellung zweier synthetischer Profilpaarungen und einen Vergleich mit gemessenen Rad- und Schienenprofilen.

Hunting for the ideal wheel profile

The hunting for the ideal wheel profile is often difficult and longsome. There are various methods with which wheel profiles, but also rail profiles can be optimized. The Institute for Railway Technology GmbH (IFB) is in optimizing wheel profiles and rail profiles in a practice-oriented approach for many years. One big advantage of this approach is the disuse of the cost-intensive simulation calculations. This approach followed the suffering of many railway transport companies, which are often equipped with a small budget, but still have a significant need for optimization in the wheel-rail contact. In the following article, the authors first explain the state of the art used in the IFB and then illustrate it using a simple practical example. This includes as an example the comparison of two synthetic profile pairings and a comparison with measured wheel and rail profiles.