

Literaturstudie Verschleissmechanismen Riffel, Schlupfwellen und Radpolygone

Bericht



Projekt PROSE: CH01-03431
Selbstlernende Schienenkopfkonditionierung

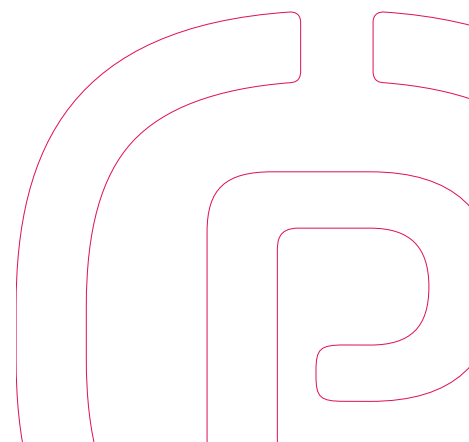
BERNMOBIL - Städtische Verkehrsbetriebe Bern

Erstellt	Geprüft	Freigegeben	
Bernhard Kurzeck	Felix Saur	Yves Kohler	
Dokumentnummer	Version	Status	Ausgabedatum
PO000005313	1.0	Released	24.03.2025

PROSE AG
Zürcherstrasse 39
8400 Winterthur
Schweiz

www.prose.one

+41 52 262 74 00
info@prose.one



Verteiler

Firma/Abteilung/Name	Anmerkungen
BERNMOBIL	

Version	Prepared	Checked	Released	Date
Ver 1.0	Bernhard Kurzeck	Felix Saur	Yves Kohler	24.03.2025

Änderungsverzeichnis

Version	Beschreibung

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), oder eines ihrer Tochterunternehmen Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist ohne Unterschrift gültig.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	4
2	Definitionen	4
2.1	Riffel / rail corrugation	5
2.2	Schlupfwellen / rail corrugation	5
2.3	Radpolygone	6
2.4	P1- und P2-Resonanz	6
2.5	Schwarzbelag	7
3	Entstehungsmechanismen	8
3.1	Einführung (basierend auf [1])	8
3.2	Mechanische Aspekte	9
3.3	Schlupfwellen	10
3.3.1	Vollbahn.....	10
3.3.2	Nahverkehrssysteme	11
3.4	Riffel	13
3.5	Radpolygone	15
4	Zusammenfassung	20
4.1	Allgemein	20
4.2	Diskussion der Einflüsse	21
4.3	Einfluss Schmierung (Schienenkopfkonditionierung)	21
5	Antworten auf die eingangs aufgeworfenen Fragen	23
5.1	Gibt es einen Zusammenhang zwischen Polygonbildung und z.B. Riffelbildung?	23
5.2	Hat der Schwarzbelag einen Einfluss auf die Riffel- und Polygonbildung?	23
5.3	Welche Auswirkungen haben Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung?	23
5.4	Zusammenhang Phänomene Infrastruktur- und Fahrzeugseitig?	23
5.5	Wodurch entstehen Riffel in der Geraden bzw. im Bogen?	23
5.6	Wodurch entsteht Polygonbildung am Rad	24
5.7	Was sind typische Wellenlängen bzw. Frequenzbereiche?	24
5.8	Akustische Auswirkungen (Dröhnen, Kurvenkreischen, ...)	24
5.9	Welchen Einfluss hat eine Reibungsselbsterregung	24
5.10	Welchen Einfluss hat die Profilpaarung Rad Schiene, welche Auswirkung hat ein Zweikontaktpunkt	24
6	Einordnung im Kontext der selbstlernenden Schienenkopfkonditionierung	25
6.1	Schwarzbelag	25
6.2	Berücksichtigung beider Schmiersysteme (SKK und SKS)	25
7	Referenzen	26

1 Ausgangslage

Diese Literaturrecherche hat das Ziel, das Literaturwissen zu den Entstehungsmechanismen der Riffel- bzw. Schlupfwellenbildung auf Infrastrukturseite und Polygonbildung auf Fahrzeugseite zu sammeln. Den Anlass für dieses Dokument bildet das Projekt «Selbstlernende Schienenkopfkonditionierung» bei BERNMOBIL, den städtischen Verkehrsbetrieben der Stadt Bern, bei dem immer wieder Fragen zur Ursache der Riffel- und Polygonbildung aufgeworfen wurden.

Das Ziel ist das Herausarbeiten der verschiedenen, eventuell widersprüchlichen Hypothesen in der Literatur zur Riffel- und Polygonbildung. Dabei sind u.a. folgende Fragestellungen von großem Interesse:

- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Polygonbildung und z.B. Riffelbildung?
- Hat der Schwarzbelag einen Einfluss auf die Riffel- und Polygonbildung?
- Welche Auswirkungen haben Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung?
- Zusammenhang Phänomene Infrastruktur- und Fahrzeugseitig?
- Wodurch entstehen Riffel
 - in der Geraden?
 - im Bogen?
- Wodurch entsteht Polygonbildung am Rad?
- Was sind typische Wellenlängen bzw. Frequenzbereiche?
- Akustische Auswirkungen (Dröhnen, Kurvenkreischen, ...)
- Welchen Einfluss hat eine Reibungselbsterregung?
- Welchen Einfluss hat die Profilpaarung Rad Schiene und welche Auswirkung hat ein Zweikontaktpunkt?

Nach der allgemeinen Zusammenfassung der Erkenntnisse in Kapitel 4 wird in Kapitel 0 noch einmal auf speziell auf diese Fragen eingegangen.

2 Definitionen

Im deutschen Sprachgebrauch wird bei in Längsrichtung periodischen Verschleissmustern auf der Schienenoberfläche zwischen Riffeln und Schlupfwellen unterschieden. Dabei bezeichnen Riffel Verschleissmuster im geraden Gleis, während im Gleisbogen dieses Verschleissmuster als Schlupfwellen bezeichnet wird. Im englischen Sprachgebrauch wird mit dem Begriff «rail corrugation» nicht zwischen Riffel auf der Geraden und Schlupfwellen in Bögen unterschieden.



Abbildung 2-1 Rail corrugation aus [27]

2.1 Riffel / rail corrugation

Der UIC-Kodex 712 «Schienenfehler» [2] beschreibt Riffel unter der Kategorie von Schienenkopfverschleiss als fast regelmässige Aufeinanderfolge glänzender Wellenberge und dunkler Wellentäler auf der Lauffläche mit Wellenlängen im Allgemeinen zwischen 30 mm und 80 mm.

Grohmann [4] beschreibt Riffel als quasi-periodische Fahrflächenunebenheiten mit Wellenlängen von etwa 2 bis 10 cm in geraden Gleisen und Gleisbögen grösserer Radien als Schäden durch Werkstoffumwandlung, und nennt als Riffeltiefe Werte von 0.01 mm bis 0.4 mm. Die hellglänzenden Wellenberge bestehen aus verfestigten Oberflächenschichten und die dunklen Wellentäler weisen Korrosionserscheinungen und verformte Oberflächenschichten auf.

Das Handbuch [8] unterscheidet zwei Haupttypen von Riffel, die kurzwelligen mit einer Wellenlänge von ca. 30 mm bis 90 mm und die langwelligen mit einer Wellenlänge über 300 mm. Als Rillentiefe wird für die kurzwelligen Riffel 0.2 mm bis 0.3 mm und für die langwelligen 0.1 mm bis über 2.0 mm genannt, wobei die Tiefe der langwelligen Riffel variieren kann.



Abbildung 2-2 Short pitch corrugations on the running surface (aus [8])

Nach [8] entstehen Riffel mit kurzer Wellenlänge in der Regel bei leichteren Nennachlasten (< 20 Tonnen) im Personenverkehr. Die Riffel mit großer Wellenlänge entstehen dagegen in der Regel bei höherer Nennachlast (> 20 Tonnen) im gemischten Güterverkehr oder im Ganzzugverkehr.

2.2 Schlupfwellen / rail corrugation

Schlupfwellen werden vom UIC-Kodex 712 «Schienenfehler» unter der Kategorie von Schienenkopfverschleiss als wellige Unebenheiten in der Lauffläche beschrieben, die im Vergleich

zum idealen gradlinigen Profil mehr oder weniger ausgeprägt und unregelmässig sind und mit der Wellenlänge im Allgemeinen zwischen 80 mm und 300 mm schwanken. Schlupfwellen treten vorzugsweise auf den Bogeninnenschienen auf und zwischen Wellenbergen und Wellentälern wird kein Unterschied im Aussehen festgestellt. [2]

Nach Grohmann [4] weisen Schlupfwellen, auch kurze Wellen genannt, Tiefen von etwa 0.1 mm bis 1 mm auf und treten üblicherweise in Gleisbogenradien kleiner 800 m auf. Im Gegensatz zu den Riffeln treten bei Schlupfwellen typischerweise keine umgewandelten «weissen Schichten» auf, metallografischen Untersuchungen zeigen starke plastische Deformation und flache Oberflächenrisse eines «üblichen» Verschleissvorgangs aufgrund der Relativbewegung zwischen innerem und äusserem Rad in der Kurve.

2.3 Radpolygone

IWNICKI et al. [5] definiert ein polygonales Rad als ein Rad mit einer regelmäßigen (periodischen) Variation des Radius. Die Ordnung der polygonalen Unregelmäßigkeit ist die Anzahl der Wölbungen oder positiven Abweichungen vom durchschnittlichen Radius, die bei einer vollständigen Umdrehung des Rades auftreten. Die Wellenlänge der üblicherweise beobachteten Unrundheit variiert von einem Radumfang (1. Ordnung oder ein exzentrisches Rad) bis hinunter zu etwa 10 cm (28. Ordnung). Mit Polygonisierung wird der Prozess, der zu polygonalen Rädern führt, bezeichnet.

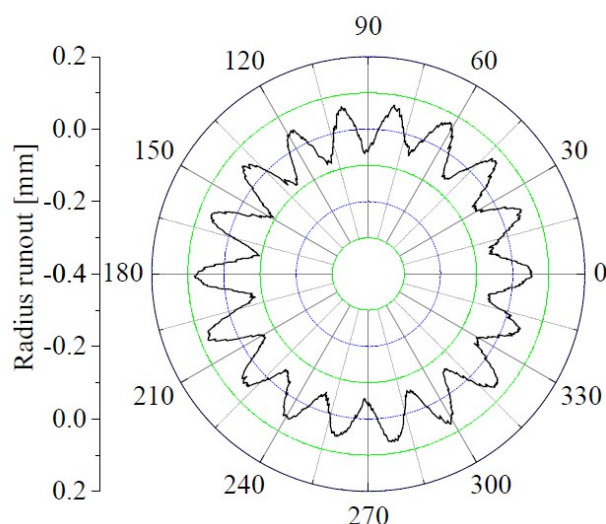


Abbildung 2-3 Beispiel für ein Polygon 18. Ordnung, erwähnt und gezeigt in [24], ursprünglich aus [25]

Zusätzlich können dem Rad Rauheit überlagert sein, die als eine zufällige, oberflächliche Unregelmäßigkeit auf der Radlaufläche mit relativ kleiner Amplitude und kurzer Wellenlänge definiert sind.

2.4 P1- und P2-Resonanz

Bei den Entstehungsmechanismen von Riffeln und Polygonen spielt häufig die sogenannte P2-Resonanz eine wesentliche Rolle. Nach IWNICKI et al. [5] geht die Bezeichnung auf Jenkins et al. aus 1974 zurück. Die P1-Resonanz wird durch die Resonanz der ungefederten Radsatzmasse und der effektiven Gleismasse auf die Kontaktfedersteifigkeit bestimmt und liegt typischerweise bei etwa 700-1000 Hz. Bei einem konventionellen Schotteroberbau tritt die P2-Resonanz, bei der die ungefederte Masse des Fahrzeugs und die äquivalente Gleismasse in Phase auf die äquivalente Steifigkeit des Gleises schwingen, typischerweise bei 50-100 Hz auf.

2.5 Schwarzbelag

Da keine Quellen zu Schwarzbelag gefunden wurden, werden an dieser Stelle die Beobachtungen in Bern beschrieben.

Beim Schwarzbelag handelt es sich um eine schwarze Ablagerung auf der Schiene. Im Gegensatz zu der in der Regel silbern glänzenden Oberfläche des Schienenkopfs hat die Ablagerung nach der unten stehenden Abbildung ein schwarz mattes Erscheinungsbild.



Abbildung 2-4 Schwarzbelag

Beobachtungen in Bern zeigen, dass der Schwarzbelag nach stationären Schmieranlagen auftritt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um überschüssiges Schmiermittel der stationären Anlagen handelt. Aufgrund der Beschaffenheit der Ablagerung, die teilweise als gummiartig und eher griffig gegenüber der blanken, regulären Schienenoberfläche bezeichnet werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass es sich um ein Schmiermittel (genauer gesagt Konditioniermittel) mit Festkörperanteil handelt, welches insbesondere zur Schienenkopfkonditionierung eingesetzt wird. Aufgrund der haftenden Eigenschaften vermischt sich das Konditioniermittel mit sonstigen Ablagerungen auf der Strecke wie beispielsweise Sand, Laub, Gummiablagerungen und sonstigem Schmutz und wird durch die hohe Achslast der überrollenden Stahlräder auf die Schiene gepresst.

Bei genauerer Betrachtung wurde festgestellt, dass eine verstärkte Schwarzbelagbildung insbesondere dort stattfindet, wo bei stationären Anlagen direkt der Schienenkopf konditioniert wird bzw. das Konditioniermittel durch eine Bohrung eher mittig auf dem Schienenkopf und nicht nur an der Schienenflanke aufgebracht wird. Dies ist insbesondere auf der Kurveninnenschiene der Fall. Aktuelle Messungen und Beobachtungen im März 2025 auf Linie 9 (Breitenrain) lassen erkennen, dass eine Schwarzbelagbildung auch ohne stationäre Anlagen möglich ist. In diesem Kontext wird die Überschmierung durch eine gesteuerte, GPS-gelenkte, fahrzeugseitige Schienenkopfkonditionierung verursacht. Dabei kann eine Korrelation zwischen den definierten GPS-Schmierpunkten und dem Schwarzbelag festgestellt werden. Aufgrund der beidseitigen (an linkem und rechtem Rad) mobilen Schienenkopfkonditionierung ist ein beidseitiger Schwarzbelag (auf linker und rechter Schiene) erkennbar, wohingegen bei stationären aufgrund der Konditionierung mit einer mittigen Bohrung auf dem Schienenkopf in der bogeninneren Schiene eher Schwarzbelag an der kurveninneren Schiene beobachtet werden kann.

Die weiter oben beschriebene gummiartige Eigenschaft des Schwarzbelags kann zu einem Kraftschlussverhalten zwischen Rad und Schiene führen, welches sich vom jenem mit blanker, geputzter Schienenoberfläche unterscheidet. Inwiefern sich dies auf die Entstehung von polygonen Rädern auswirkt, bleibt unklar und müsste weiter untersucht werden. Ein Zusammenhang zwischen Riffel- bzw. Schlupfwellenbildung und Schwarzbelag konnte, zumindest in Bern, nicht festgestellt werden, da die Orte von Schwarzbelag und Riffel (in Geraden) deutlich getrennt voneinander liegen. Dem Autor sind in Bern keine Schlupfwellen (in Kurven) bekannt, die wiederum mit Schwarzbelag in Verbindung stehen könnten.

3 Entstehungsmechanismen

3.1 Einführung (basierend auf [1])

Verschleissprobleme in Form eines in Längsrichtung periodischen Verschleisses werden in der Regel von Schwingungen im mittleren Frequenzbereich verursacht und äussern sich langfristig als Verschleissmuster auf der Rad- oder Schienenoberfläche, den so genannten Riffeln, Schlupfwellen oder Radpolygone ([9] S.50). Diese Schadensbilder können sowohl in der Geraden als auch im Gleisbogen auftreten.

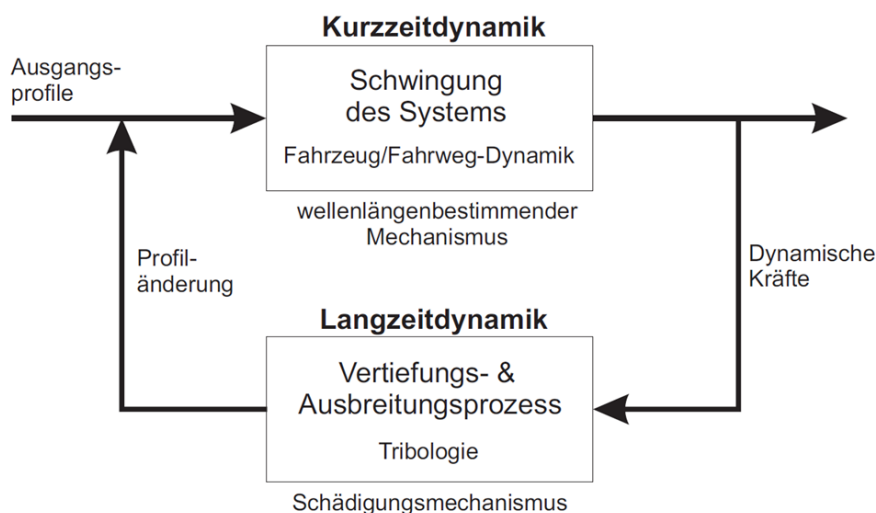


Abbildung 3-1 Riffelentstehungsprozess (für [1] aus verschiedenen Quellen zusammengefasst)

Bei der Analyse der Prozesse, die zu periodischem Verschleiß führen, bietet es sich an, zwischen Kurzzeit- und Langzeitdynamik zu unterscheiden (Abbildung 3-1). Die Kurzzeitdynamik beinhaltet den Schwingprozess eines Fahrzeuges bei Überfahrt, dessen Schwingfrequenz f zusammen mit der Fahrgeschwindigkeit v die Wellenlänge λ des Verschleißmusters bestimmt. Infolge von Schwingungen in den Kontaktkräften und Schlüpfen entsteht ungleichförmiger Verschleiß über den zurückgelegten Weg. Dabei entscheidet vor allem die Phasenlage der Schwingung zur vorhandenen Vorschädigung darüber, ob sich der Materialabtrag im Rahmen der Langzeitdynamik zu einem periodischen Verschleißmuster mit fester Wellenlänge überlagern kann oder auslöscht. Eine der Randbedingung im Kontext der Langzeitdynamik ist auch die Kontinuität der Betriebsparameter (gleichbleibendes Fahrzeug und Geschwindigkeit). Die Langzeitdynamik betrachtet die tribologischen Aspekte und die sich ergebende Wachstumsgeschwindigkeit, die sowohl das vertikale Wachstum als auch die Ausbreitung in Längsrichtung umfasst. Häufig breiten sich Riffel ausgehend von einer Störstelle wie z.B. einem Schweißstoß mit der Zeit über mehrere Meter auf dem Gleis in Fahrtrichtung aus [10].

Weltweit existiert eine kaum überschaubare Anzahl von Veröffentlichungen zur Riffelthematik und damit auch zu deren Kurzzeitdynamik (im Jahr 2002 nach [11] ca. 1500 Arbeiten). Deshalb erfolgt eine Einschränkung auf die Arbeiten aus der jüngeren Zeit. Einen guten Überblick über Arbeiten bis 1993 geben Grassie und Kalousek in [10]. Die Autoren unterscheiden sechs Riffeltypen vorrangig nach Erscheinungsbild (Wellenlänge und Form) und versuchen ihnen Ursache, Wirkmechanismus sowie Abhilfemaßnahmen zuzuordnen. Von den sechs definierten Typen sind drei ausschließlich in engeren Gleisbögen (Bogenradius 400 m und kleiner) anzutreffen.

Aktuelle Abhilfemaßnahmen betreffen überwiegend die Symptombekämpfung. Als Abhilfemaßnahmen haben sich bewährt

- Durch Schmieren (Konditionierung) der Schienenkopffläche (vorrangig bogeninnere Schiene) kann das Wachstum reduziert oder sogar das Entstehen vermieden werden.

- Schienenschleifen beseitigt die Riffel bzw. Schlupfwellen. Da das Riffelwachstum häufig exponentiell verläuft und mit zunehmenden Amplituden auch die Belastung dynamische Belastung der Gleis- und Fahrwerkkomponenten zunimmt, hat sich frühzeitiges Beseitigen als vorteilhaft erwiesen.
- Verwendung von härteren Schienenstählen bewirkt langsames Wachstum.

Diese Maßnahmen greifen aber nicht am Ursprung an und beseitigen die Ursachen. Wünschenswert ist daher eine systemspezifische Untersuchung, die Möglichkeiten zur Unterbindung der Entstehung der ungewünschten Verschleissbildung (Riffel, Schlupfwellen, Polygone) durch Verstimmungen des Systems offenbart.

3.2 Mechanische Aspekte

Die Phänomene Riffel, Schlupfwellen und Radpolygone basieren auf einem Materialabtrag (Verschleiß) an der Oberfläche von Rad und Schiene, dessen Stärke in Längsrichtung variiert und so zu den typischen, wellenförmigen Mustern führt.

Der Verschleiß entsteht durch die im Rad/Schiene-Kontakt geleistete Reibarbeit. Den Zusammenhang zwischen Reibarbeit und Materialabtrag an den beteiligten Oberflächen beschreibt u.a. die Reibarbeitshypothese [12]. Diese unterscheidet mit mildem und heftigem Verschleiß unterschiedlich starke Verschleißregime. Innerhalb eines Verschleißregimes wird der Materialabtrag proportional zur Reibarbeit angenommen. Zwischen mildem und heftigem Verschleiß variiert der Materialabtrag je nach Quelle um den Faktor 2,5 bis 10. Als Kriterium für den Wechsel zwischen mildem und heftigem Verschleiß wird die auf die Fläche bezogene, spezifische Reibleistung herangezogen. Dabei wird angenommen, dass ab einer spezifischen Reibleistung von 4 W/mm durch die Reibarbeit die gehärtete Randschicht an Rad und Schiene beschädigt wird und der Materialabtrag sprunghaft ansteigt. Fahren Straßenbahnen mit konventionellen Drehgestellen durch Bögen mit kleinen Radien, ist davon auszugehen, dass in den Rad/Schiene-Kontaktpunkten die Reibleistung so groß ist, dass die Grenze zum heftigen Verschleiß überschritten wird. Ebenso können beim Anfahren oder Bremsen unter hohem Schlupf für heftigen Verschleiß ausreichende Reibleistungen erreicht werden.

Die für das wellenförmige Muster erforderliche Schwingung der Reibarbeit entsteht durch die der Fahrt des Fahrzeugs überlagerten Schwingungen - in der Regel gemeinsam - von Radsatz und Schiene. Dabei können unterschiedliche Schwingungseigenformen beteiligt sein. Die Anregung erfolgt sowohl als Selbsterregung durch Reibung als auch durch Einzelstörungen oder bereits vorhandene periodische Fehler. Besonders häufig sind an den auftreten Schwingungen

- Biege- und Torsionseigenschwingungen der Radsätze,
- vertikale Eigenschwingungen des Gleises – entweder als phasengleiche Schwingung des gesamten Gleiskörpers oder als Schwingung der Schienen gegen die Schwellen,
- Eigenschwingungen der Schienen in ihren Lagerungspunkten (Pin-Pin-Mode) sowie
- Querschwingen der Schienen oder nur deren Köpfe

beteiligt sein. Aufgrund der unterschiedlichsten Ausführung von Radsätzen und Gleis variieren die jeweiligen Eigenfrequenzen zwischen einzelnen Fahrzeugen und Gleisbauformen (Schottergleis, feste Fahrbahn oder straßenbündiges Straßenbahngleis) so stark, dass zusammen mit variierender Fahrgeschwindigkeit prinzipiell jede Wellenlänge möglich ist.

Da Schienen und Räder aus ähnlichem Stahl bestehen, ist davon auszugehen, dass der Materialabtrag in gleichem Maß an Rad und Schiene stattfindet. Insofern können die gleichen Schwingungen von Radsatz und Schiene als Kurzzeitdynamik sowohl periodische Schienenfehler wie Riffel oder Schlupfwellen als auch periodische Radfehler wie Polygone erzeugen. Entscheidend

ist, ob sich in der Langzeitdynamik der periodische Verschleiß aus den einzelnen Überrollungen konstruktiv mit bereits vorhandenen Verschleißmustern überlagert oder diese eher glättet. Bei Riffeln muss der periodische Verschleiß phasenrichtig zur periodischen Anregung stattfinden. Bei Polygonen muss das ganzzahlige Vielfache der Wellenlängen des Materialabtrages zum Radumfang passen.

Damit sich die Muster ausbilden können, muss über längere Zeit die gleiche Situation aus Sicht des Rades (für Polygone) aus Sicht der Schiene (für Riffel/Schlupfwellen) ohne kontraproduktive Störung (andere Frequenz in der Kurzzeitdynamik) vorliegen.

3.3 Schlupfwellen

REDAKTIONELLER HINWEIS:

Ursprünglich war geplant, die Literaturbeispiele in einer abschließenden Tabelle zusammen zu fassen und dabei Schädigung und Anwendung den genannten Ursachen/Einflüssen zuzuordnen. Die Literaturbeispiele sind dazu in runden Klammern durchnummeriert, gedacht war auch die Nummern der Referenzen konsistent zu ordnen. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Recherche, schien dieser Weg nicht sinnvoll, aber die Ziffern in runden Klammern wurden erstmal beibehalten. Die Referenzen sind aktuell in der Reihenfolge der Einbindung nummeriert, was für einen internen Bericht als akzeptabel angesehen wird.

3.3.1 Vollbahn

(1) AUER [7] beschreibt die Entstehung von Schlupfwellen mit der Schlupfwellenthese von Stephanides. Diese basiert auf experimentellen Untersuchungen **bei Versuchsfahrten mit Güterwagen der DB AG, ÖBB und SBB im Juli 2001 im Brixental, auf dem Netz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB)**, auf einem hinsichtlich Schlupfwellen bekannten Bogen (Schotterbett, Betonschwellen), welcher in seinem Verlauf eine Stahlbrücke mit schlupfwellenfreiem Gleis aufwies. Nach Stephanides These entstehen Schlupfwellen durch **Schwebungseffekte infolge von Frequenznachbarschaften von Radsätzen** (Harmonische der Biege- und Torsionseigenschwingungen) **und dem Gleisrost** unter dem zusätzlichen Einfluss von Schwellenhohllagen. Durch hochdynamisches, zyklisches Abheben und Aufsetzen einzelner Räder (unbeladene Güterwagen) auf der bogeninneren Schienenoberfläche beginnt sich das Schlupfwellenmuster auszubilden, sofern der Verschleisswiderstand der Schiene kleiner als die dynamische Beanspruchung ist. Die gleisseitige, für die Schlupfwellenbildung ausschlaggebende Eigenschwingung liegt im Bereich von 150 bis 180 Hz (gleichphasige Schwingung von Schiene und Schwelle). Der erste gleichphasige Schwingungsmodus zwischen Schiene und Schwelle wird durch vorhandene Hohllagen unter Schwellen verstärkt. Durch den Schwebungseffekt bilden sich die Schlupfwellen mit einer höherfrequenten Teilschwingung (150 bis 180 Hz) und einer einhüllenden Schwingung mit einer Wellenlänge eines Vielfachen des Schwellenabstandes aus. Bei zeitlicher Veränderung der Hohllagen können die Schlupfwellenberge in Längsrichtung der Schiene wandern. Es wurde beobachtet, dass diese ab einer Schlupfwellenamplitude von ca. 0.2 mm (Spitze-Spitze) jedoch stabil bleiben und zusammenwachsen, so dass die einhüllende Schwingung als solches nicht mehr erkennbar ist.

Nach Auer tritt die Schlupfwellenbildung verstärkt für folgende Einflussfaktoren auf:

- Betongleise mit steifen Zwischenlagen (keine Entkopplung der Schwingungen an Rädern und dem Gleisrost)
- Höher dämpfende Zwischenlagermaterialien¹ (begünstigen Wachstum der Schlupfwellen)

¹ Hinweis zur Einordnung: Hier besteht ein Zielkonflikt zwischen Akustik (hohe Dämpfung in der Zwischenlage verringert Lärmabstrahlung der Schiene) und Verhinderung von Schlupfwellenbildung (geringe dynamische Versteifung der Zwischenlage von Vorteil).

- Weniger verschleissresistente Schienenstahlsorten (z.B. R 260)
- Verschleisszustand der Zwischenlage und verringerte Niederhalte­kraft der Spannklemmen
- Unbesohlte Streckenabschnitte aufgrund der systematischen Häufung von Hohllagen unter den Schwellen (der Typ der Besohlung hingegen hat einen geringen Einfluss auf die Schlupfwellenbildung)

Ein nach Auer verschleiss- und schlupfwellenoptimiertes Bogengleis, im Netz der ÖBB als Standard in engen Gleisbögen $R < 600$ m angewendet, berücksichtigt folgende Eigenschaften (nachgewiesen über Oberbaumesssignale Schlupfwellenamplitude und Achslagerbeschleunigungen für Gleisbögen mit Radien zwischen 250 m und 400 m, in grösseren Bogenradien-Bereichen treten üblicherweise keine Schlupfwellen auf):

- Verwendung von Schwellenbesohlungen
- Ausreichende Dimensionierung der Schienenbefestigungselemente
- Einsatz von Zwischenlagen mit einer dynamischen Steifigkeit von $C_{dyn} < 150$ kN/mm zur Entkopplung der Schwingungen von Schwellen und Radsätzen (weiche Zwischenlagen führen in geringem Ausmass zu einer Frequenzverschiebung des Gleisrostes, die charakteristische Wellenlänge wird um ca. 20 Hz (von 180 Hz auf 160 Hz) verringert)
- Zwischenlagen mit einer statischen Steifigkeit C_{stat} von ca. 60 kN/mm (Auswertebereich zwischen 16 und 68 kN) und einer dynamischen Steifigkeit von C_{dyn} von ca. 85 kN/mm werden als besonders schlupfwellenhemmend angesehen
- Verwendung der Schienen-Stahlsorte R 350 HAT (verschleissresistent)
- Einbau des Schienenprofils 60 E1 (ausreichende Schienenfussbreite)

3.3.2 Nahverkehrssysteme

(2) TASSILLY und VINCENT [13][14] haben die Schlupfwellenbildung bei der Pariser Metro RATP sowohl messtechnisch als auch in der Simulation untersucht. Sie zeigen in ihrem Modell zwei mögliche Wirkmechanismen für die Schlupfwellenbildung.

- I. Am vorlaufenden Radsatz treten bevorzugt Schlupfwellen im Frequenzbereich um die erste Biegeeigenmode des Radsatzes auf, die vom Querschlupf angeregt wird.
- II. Am nachlaufenden Radsatz, bei dem in engen Bögen der Längsschlupf dominiert, treten bevorzugt Schlupfwellen im Frequenzbereich um die Torsionseigenmode des Radsatzes auf, die vom Längsschlupf angeregt wird.

Über ein Berechnungsmodell erhalten TASSILLY und VINCENT eine Verschleissrate im Frequenzbereich, die aussagt, ob und wie stark in einem Frequenzbereich vorhandene periodische Fehler verstärkt oder geglättet werden.

TASSILLY und VINCENT geben keine Aussage, ob beide Anregungstypen in einem Bogen gleichzeitig auftreten können. Für einen 100 m Bogen werden Berechnungsergebnisse für beide Radsätze eines Drehgestells aufgeführt. In dem Beispiel ist die dominierende Schwingung am vorlaufenden Radsatz 75 Hz, während am nachlaufenden Radsatz bei 60 Hz die Schwingung mit der größten Neigung zu Schlupfwellen auftritt, bei der wiederum der vorlaufende Radsatz glättend wirkt. Insgesamt ist die maximale Wachstumsrate am nachlaufenden Rad (bei 60 Hz) etwa 4 bis 5-mal so groß wie am vorlaufenden Radsatz (bei 75 Hz).

(3) GÓMEZ ET AL. berichten in [27][28] von Schlupfwellen mit 66.6 mm Länge bei der Metro Bilbao auf der Innenschiene in einem Bogen mit einem Radius von rund 180 m. Die Schlupfwellen sind im

Wesentlichen darauf zurückzuführen sind, dass beim Bau der Metro mit Fester Fahrbahn zur Kosteneinsparung der Stützpunktabstand der Schienenbefestigung von 60 cm auf 100 cm vergrößert wurde, was aus Sicht der Festigkeit der Schienen bei einer UIC54 Schiene und einer maximalen Achslast von 10.5 t problemlos möglich war. Durch den vergrößerten Stützpunktabstand ist aber die erste laterale Biegeeigenfrequenz der Schienen, bei der ein Bauch der Schwingung jeweils genau zwischen 2 Befestigungspunkten liegt (Pin-Pin-Mode), von über 300 Hz bei 60 cm Stützpunktabstand auf etwa 220 Hz bei 100 cm Stützpunktabstand gesunken, wodurch das System deutlich schwingfreudiger und schlupfwellenbildend wurde.

- (4) In [1] und [15] zeigt KURZECK für ein Stadtbahnfahrzeug aus Stuttgart, dass bei Bogenfahrt im Wagenkasten hörbare und störende Schwingungen in einem Frequenzbereich um 80 Hz auch für Schlupfwellen verantwortlich sind. Ursache für die Schwingung und die Schlupfwellenbildung ist eine kombinierte, reiberregte Schwingung von Radsatzbiegung und P2-Resonanz. Die Schwingungen treten in Bögen mit Radien unter 150 m auf. Die stärksten Schwingungen treten am bogeninneren, vorlaufenden Rad. Die vertikalen Schwingungen können bei trockner Witterung so stark werden, dass das die Kontaktkraft an dem Rad in jeder Periode kurzzeitig auf null absinkt und das Rad minimal von der Schiene abhebt.

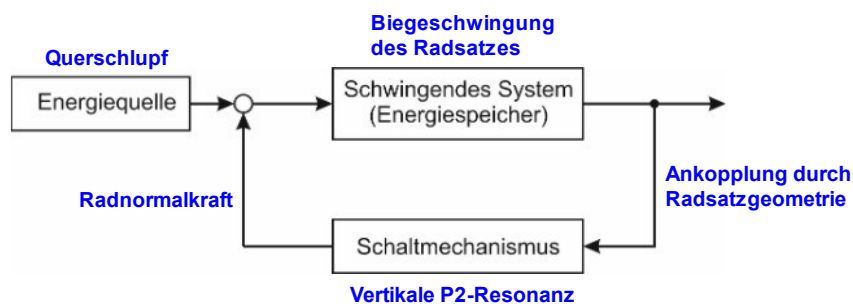


Abbildung 3-2 Blockdiagramm eines selbsterregten Schwingensystems (in schwarz, nach [16], S. 89)

Die Komponenten des Mechanismus lassen sich gut den Blöcken eines typischen selbsterregten Schwingensystems zuordnen (Abbildung 3-2): Die Energiequelle bildet die Querschlupfkraft am bogeninneren Rad. Der Querschlupf ist in den Bögen so groß, dass der Kraftschlussbeiwert im Sättigungsbereich liegt und maximal ist. Das Schwingende System ist die erste Biegeeigenmode des Radsatzes, die durch die im Rad/Schiene-Kontakt angreifende Querschlupfkraft angeregt wird. Über die Geometrie des Radsatzes (Außenlagerung) wird auch Schwingenergie in die vertikale Richtung umgeleitet und die P2-Resonanz angeregt. In diesem Fall ist die P2-Resonanz so angekoppelt, dass sie als Schaltmechanismus phasenrichtig die Energiezufuhr durch den Querschlupf taktet. Die reiberregte Schwingung braucht keine Anfangsanregung durch Schienenfehler. Der periodische Verschleiß aus der Überfahrt von baugleichen und mit ähnlicher Geschwindigkeit verkehrender Fahrzeuge überlagert sich zu ausgeprägten Schlupfwellen.

Abbildung 3-3 zeigt das Ergebnis aus der Simulation. Bei der vorliegenden Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h verursacht die Schwingung mit 80 Hz eine Wellenlänge von 160 mm. Diese zeigt sich deutlich auf der bogenäußeren Schiene, was durch Messungen bestätigt wird. Durch das Abheben des Rades auf der bogeninneren Schiene bilden sich dort Wellen mit kürzerer Wellenlänge ($\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ von 160 mm). Das Auftreten kürzere Wellenlängen wird durch Messungen bestätigt, allerdings nicht exakt die jeweiligen Wellenlängen, was aber auch an dem geringen Umfang der Messwerte liegen kann.

Die dominierende Schwingfrequenz variiert in verschiedenen Bögen im Netz in Stuttgart zwischen 70 und 95 Hz, was vermutlich auf unterschiedliche Gleissteifigkeiten und damit unterschiedliche Eigenfrequenzen der P2-Resonanzen zurückzuführen ist. Folgende Gegenmaßnahmen lassen sich aus der Untersuchung ableiten:

- Unterbindung der Energiezufuhr durch Minderung des Kraftschlussbeiwerts auf der bogeninneren Schiene durch Fahrflächenkonditionierung. Die Schwingungen treten bevorzugt bei trockenem Wetter auf. Wird dieser abgesenkt, z.B. auch durch benässen der Schiene, verschwinden die Schwingungen.
- Auflösen der Kopplung zwischen P2 Resonanz und Biegeeigenfrequenz des Radsatzes durch Verstimmung des Systems (weicherer Gleis, steiferer Radsatz)

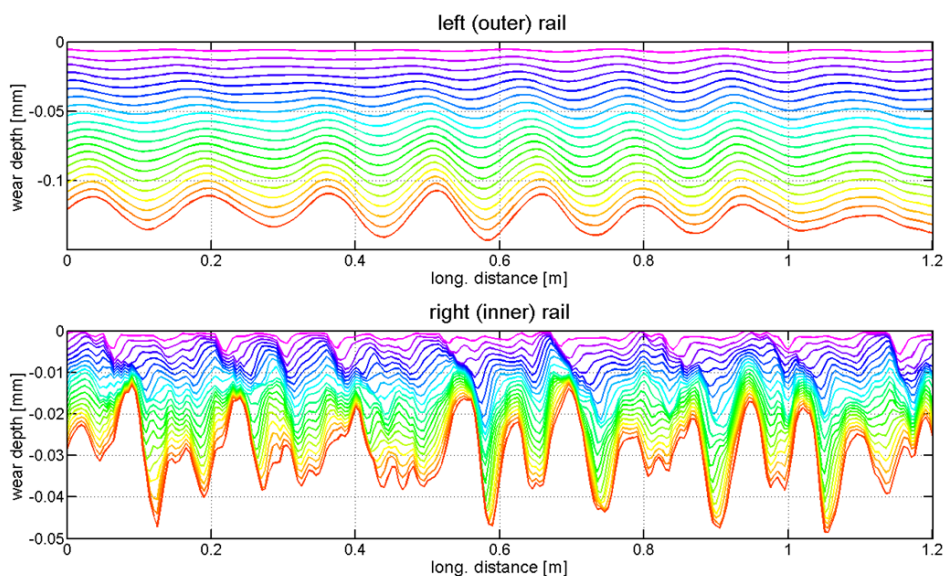


Abbildung 3-3: Simulierte Schlupfwellenbildung bei 40 km/h

3.4 Riffel

- (5) Das Handbuch [8] nennt als Ursache für die kurzwelligen Riffel der unterschiedliche Verschleiss, welcher durch wiederholtes Gleiten des Rades in Längsrichtung auf der Schiene durch Beschleunigen, Bremsen oder seitliche Bewegung über die Schiene entsteht. Die Längsschwingungen können durch die Anregung der Torsionsresonanz des Radsatzes entstehen und durch Stick-Slip-Effekte verstärkt werden, welche aufgrund der Rollradiendifferenz eines Radsatzes in engen Bögen auftreten können.



Abbildung 3-4 Rail plastic flow associated with long pitch corrugations (aus [8])

Für die langwelligen Riffel wird plastisches Fließen des Schienenmaterials (Abbildung 3-4) aufgrund übermässiger Rad-Schiene-Kontaktspannungen und kombinierter vertikaler Resonanz der ungefederten Radsatzmasse und des Gleises genannt. Langwellige Riffel können im Bogen auf der bogeninneren, der bogenäusseren oder auf beiden Schienen beobachtet werden. Als kritische

Faktoren für die Riffelbildung werden Aspekte aufgeführt, welche zu höheren dynamischen Belastungen und damit zu Kontaktspannungen und plastischem Fließen des Schienenmaterials führen:

- Höhere nominale Radlast
- Höhere Fahrgeschwindigkeit
- Grössere vertikale Versätze an Schienenstössen
- Höhere Gleissteifigkeit (Betonschwellen, steifere Zwischenlagen)
- Höhere Steifigkeiten der Federung im Fahrwerk, die zu höheren dynamischen Lasten führt
- Kleinere Raddurchmesser
- Höhere Reibung, grösserer Schlupf im Rad-Schiene Kontakt
- Weicheres Schienenmaterial, wodurch die Gefahr von plastischem Fließen steigt.
- Schlechte Kombination von Rad- und Schienenprofil (enger Kontaktbereich)
- Beschleunigte Wiederentstehung von Riffeln bei unvollständiger Entfernung beim Schleifen

(6) Verschiedene Quellen (Tabelle 3-1) beschreiben für verschiedene Bahnsysteme Riffelbildung in der Geraden und in Bögen mit großen Radien mit einer Wellenlänge, die bei der typischen Fahrgeschwindigkeit mit der vertikalen P2-Resonanz korreliert, was die Spannweite möglicher P2-Resonanzen verdeutlicht.

Tabelle 3-1: Weiterführende Literaturquellen zu Riffelbildung in der Geraden und Bögen mit großen Radien in Zusammenhang mit der P2-Resonanz

Eigenfrequenz der P2-Resonanz in Hz	Bahnsystem	Quelle
30 - 50	Allg. für Schottergleis	[29]
30	Heavy Haul	[10]
40	U-Bahn / Schweden	[30]
50	Metro / Frankreich	[13]
55	Schnellverkehr / Schweden	[31]
120	Lokomotive / Schweden	[32]
bis 150	Allg. für feste Fahrbahn	[29]

(7) Ebenso geben verschiedene Quellen (Tabelle 3-2) für verschiedene Bahnsysteme Riffelbildung in der Geraden und in Bögen mit großen Radien mit einer Wellenlänge, die bei der typischen Fahrgeschwindigkeit mit der Schwellen-Antiresonanz korreliert, was die Spannweite möglicher Schwellen-Antiresonanzen verdeutlicht.

Tabelle 3-2: Weiterführende Literaturquellen zu Riffelbildung in der Geraden und Bögen mit großen Radien in Zusammenhang mit der Schwellen-Antiresonanz

Eigenfrequenz der P2-Resonanz in Hz	Bahnsystem	Quelle
165	U-Bahn / Schweden	[30]
250	Vollbahn 20 m/s	[34]
250	Lokomotive / Schweden	[33]
275	Regionalverkehr / Frankreich	[13]

(8) CROFT ET AL. [26] untersuchen numerisch den Einfluss von Schienendämpfern auf das Wachstum von Schienenriffeln mit einer dominanten Wellenlänge zwischen 30 und 80 mm auf Vollbahngleisen in

Deutschland, für die Messwerte vorliegen. Für Gleise ohne Schienendämpfer wird eine Riffelbildung bei der Wellenlänge vorhergesagt, die der Pin-Pin-Frequenz entspricht. Mit Schienendämpfern wird die Riffelbildung reduziert und auf eine größere Wellenlänge verlagert, wo ihre Bedeutung abnimmt.

3.5 Radpolygone

- (9) LINDER [3] führt Messwerte aus dem UNRA (Arbeitsgruppe unrunde Räder) aus Messfahrten im Jahr 1992 in der Schweiz (Gotthard mit vielen 300 m Bögen) mit eigenen MKS-Simulationen zur Bildung unrunder Räder zusammen. Dabei zeigt er den Zusammenhang zwischen Eigenmoden des Radsatzes und der Polygonbildung auf dem Rad. Die Polygon-Entstehung in Spurkranznähe und auf der Radlauffläche führt er auf die Biegungen der Radsatzwelle bei Bogenfahrt zurück. Die gemessenen Polygone aus Bogenfahrt stimmen häufig mit Schlupfwellen auf dem Gleis überein. Unklar ist, wie weit die Gleisdynamik in den Modellen berücksichtigt wurden, die P2 Resonanz findet keine Erwähnung.

Als Ursache von nicht-periodischen Radunrundheiten führt er Härteunterschiede über den Umfang aus der Radproduktion auf. Als Ursache für periodische Muster sieht er häufig auch Ungenauigkeiten beim Drehvorgang. Den höchsten Verschleißwiderstand weisen perlitisch-ferritisches Gefüge mit fein lamellarem Zementit auf. Bei dem Gefüge besteht zudem auch eine geringere Gefahr von Ausbröckelungen als bei Anlassgefüge.

- (10) SIEGLITZ hat in der Diplomarbeit die Polygonbildung von Straßenbahnradern in Potsdam untersucht und in der Literaturübersicht verschiedene Quellen zu den Ursachen von Radpolygonen zusammengefasst. Darin wird als eine der Ursachen für periodische Unrundheiten eine Schlupf-Schwankungen durch Radsatz-Eigenschwingungen sowie Normalkraft-Schwankungen durch Schienen-Schwankungen aufgeführt. Nicht periodische Unrundheiten (singuläre Abplattungen oder Buckel) entstehen laut häufig durch herstellungsbedingte Materialinhomogenitäten. Das Material besitzt dann unterschiedliche Härten und verschleißt demzufolge im Betrieb unterschiedlich schnell. Eine Flachstelle gilt ebenfalls als nicht periodische Unrundheit. Polygone treten in der Schweiz vorrangig bei Fahrzeugen auf, die Strecken mit engen Bögen befahren. Die Entstehung von Riffeln ist demnach noch nicht vollständig erforscht. Einige Riffeltypen entstünden aber durch Resonanzschwingungen von Radsatz und Schiene sowie durch bei Bremsvorgängen generiertes Ruckgleiten (Slip-Stick-Effekt). Es wird nicht zwischen der Entstehung von Schienen- und Radriffeln unterschieden, was ähnliche Entstehungsmechanismen vermuten lässt.

- (11) Nach WEIDMANN et al. [6] haben kleinere Räder (im Güterverkehr) eine stärkere Neigung zur Riffelbildung auf der Lauffläche (interpretiert als Polygonbildung) aufgrund der häufigeren Radüberrollung. Als Gegenmassnahme wird eine häufigere akustische Kontrolle der Räder und ggf. eine häufigere Reprofilierung vorgeschlagen.

- (12) IWNIKI et al. haben im Sommer 2023 in einem Übersichtspaper [5] den aktuellen Stand der Literatur zu unrunder Rädern und Radpolygonen zusammengefasst. Darin betrachten sie das veröffentlichte Wissen aufgeteilt nach Fahrzeugtypen Lokomotiven, Stadt- und Straßenbahnen sowie Hochgeschwindigkeitszügen. Nachfolgend werden nur die genannten Fälle aufgeführt, bei denen Aussagen zum Entstehungsmechanismus gemacht wurden. Nachfolgende Textpassagen sind überwiegend übersetzt und etwas gekürzt aus [5] übernommen. Auf eine Nennung der Primärquellen wird verzichtet.

Als häufige Ursache von Polygonen dritter Ordnung wird die Radbearbeitung mit einem Dreibackenfutter genannt.

In China wurde seit 2013 intensiv die Radpolygonbildung an **Hochleistungs-Wechselstromlokomotiven** untersucht, wozu in [5] sieben Quellen aufgeführt werden. Die umfangreichen

Messungen ergaben für die drei Lokomotivtypen polygonalen Radverschleiß mit den Ordnungen 17-19 und 24. Die Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Biegemoden des Radsatzes für die Radpolygonisierung verantwortlich sind. Die Eigenschwingungen der Radsätze können leicht durch diskrete Unregelmäßigkeiten der Radlauffläche, verbleibende Polygonisierung der Räder nach der Reprofilierung und Unregelmäßigkeiten der Schienenschweißnähte angeregt werden. Außerdem ist das Fahrgeschwindigkeitsprofil der Lokomotive auf der gleichen Strecke grundsätzlich gleich. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Eigenschaften der Reprofilierung der Räder, die Steigung der Strecke, der Schwellenwert des Antischlupfreglers und die feste Betriebsart eine Schlüsselrolle bei der Bildung polygonaler Räder spielen.

Ein Typ einer **Wechselstromlokomotive** in Südafrika leidet seit 2015 unter schwerwiegender Radpolygonbildung. Die Lokomotive fährt überwiegend mit 80 km/h und die vorherrschende harmonische Ordnung der Radpolygonisierung beträgt 20. Dabei weist die Ausprägung auf der Nicht-Getriebeseite und der Getriebeseite einen erheblichen Unterschied auf. Das heißt, dass die Radpolygonisierung auf demselben Radsatz asymmetrisch ist. Nahliegend ist dabei, dass die erste Torsionseigenmode des Radsatzes bei der Polygonbildung eine Schlüsselrolle spielt, da der Knotenpunkt dieser Mode nicht in der Mitte der Achse liegt. Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass die gekoppelte Mode von Fahrmotornicken und Radsatztorsion bei etwa 56 Hz die Ursache für die asymmetrische Radpolygonbildung ist. Selbsterregte Stick-Slip-Vibrationen bei gesättigter Adhäsion, insbesondere auf gebogenen Gleisen, und erzwungene Erregung durch die Ober- und Zwischenharmonischen eines frequenzvariablen Antriebs für den AC-Fahrmotor sind zwei potenzielle Erregungsquellen für die Torsionsschwingungen, wobei letztere als Hauptgrund für die Polygonisierung angesehen wird. Zwei Abhilfemaßnahmen wurden erprobt: einerseits die Verwendung eines Kontrollsystems zur Erkennung und Unterbrechung der Torsionsschwingungen und andererseits durch Filter und geänderter Steuerungssoftware bestimmte Ober- und Zwischenharmonische zu vermeiden.

Bei der Stockholmer **U-Bahn** konnte gezeigt werden, dass die Entwicklung einer polygonalen Radordnungen 14-20 durch die vertikale Gleis-Anti-Resonanz bei 165 Hz verursacht wurde, während die Zunahme der Ordnungen 5-7 auf die P2-Resonanz (bei 40 Hz) und die Schwellenüberfahrt (bei 34,7 Hz) bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h zurückzuführen ist. Als Ursache für das kontinuierliche Wachstum von Radpolygons dritter Ordnung (vermutlich durch Dreibackenfutter initiiert) wurde das Brems- oder Traktionssystem vermutet.

Radpolygonisierung an **U-Bahn** Zügen ist in China zum Teil sehr weit verbreitet. Allerdings fahren baugliche Züge in verschiedenen Städten, wobei in manchen Städten sich Radpolygone bilden, während in anderen keine auftreten. Dieses Phänomen kann mit der Gleisform und/oder der Verteilung der Bogenradien zusammenhängen. Angeblich neigen Züge auf Strecken mit einem größeren Anteil an Bögen mit kleinem Radius eher zur Polygonbildung als Züge, die auf Strecken mit weniger engen Bögen fahren.

Zur einer U-Bahn-Linie in Guangzhou, deren Fahrzeug durch einen linearen Induktionsmotor (LIM-Zug) angetrieben werden, gibt es mehrere Untersuchungen zur Ursache der dort auftretenden Polygone 9. Ordnung. Als Ursache werden neben der leichten Anregbarkeit der ersten Biegeschwingung des Radsatzes, eine selbsterregte Schwingung durch mehrerer instabiler Stick-Slip-Moden bei gesättigter Adhäsion und eine vertikale Vibration des linearen Induktionsmotors diskutiert, allerdings sind die Polygone auch an Drehgestellen ohne Induktionsmotor aufgetreten.

Bei der Polygonbildung an anderen chinesischen U-Bahnen mit einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h ist die P2-Resonanz die Hauptursache für ein Radpolygon mit 5-8 Oberschwingungen. Die Kombination der P2-Resonanz mit der Biegeresonanz erster Ordnung des Radsatzes ist die Hauptursache für ein Radpolygon mit 13. bis 16. Oberschwingungen (Wellenlängen von 160 bis 200 mm) für den Zug auf einer der U-Bahnlinien in Peking. (Anmerkung:

vermutlich der gleiche Schwingmechanismus in der Kurzzeitdynamik wie bei der Schlupfwellenbildung unter (4) vorgestellt).

Für die ausgeprägtere Polygonbildung auf den rechten als auf den linken Rädern einer Flotte von U-Bahnzügen wird die größere Gesamtläng von Rechtskurven im Netz zusammen mit einer Anregung der ersten Biegeschwingung des Radsatzes auf stark gekrümmten Gleisen verantwortlich gemacht.

IWNICKI et al. führen im Übersichtspaper [5] sechs Quellen zu Radpolygonen bei **Straßen- und Stadtbahnen**, die hier als Referenzen [18] bis [23] geführt werden. Allerdings beschreiben die ersten drei Quellen hauptsächlich das Phänomen und dessen dynamische Auswirkungen:

- LULU et al. [18] stellten fest, dass die Räder eines Straßenbahntyps mit 70 % Niederflurtechnik einen polygonalen Verschleiß der Ordnung 10 aufwiesen und vergleichen in einer Simulation den Einfluss der Polygone auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge.
- SHI et al. [19] beschäftigen sich mit der Messung von Radunrundheiten geringer Ordnung und Radpolygonen bei Straßenbahnen in China und mit den dadurch angeregten Schwingungen am Fahrzeug.
- STAŚKIEWICZ ET AL. [20] berichteten aus Polen von zwei Straßenbahntypen (Hochflur und Niederflur), bei denen sowohl bei neuen als auch bei verschlissenen Rädern eindeutig eine „Dreieckspolygonisierung“ auftreten und führen diese hauptsächlich auf die Spanbedingungen beim Drehen zurück.

IWNICKI et al. stellen fest, dass es wenige Studien über den Mechanismus der Radpolygonisierung bei Straßen- oder Stadtbahnen gibt und weisen nur auf die Arbeiten von ZEHETBAUER et al. [21][22] und KURZECK und HECHT [23] hin.

- ZEHETBAUER et al. untersuchen in [21] an einem Niederflurstraßenbahnfahrwerk mit nicht angetriebenen, gummigefederten Losrädern in einer MKS-Simulation den Einfluss der Steifigkeit und Dämpfung von Achsträger und Radfederung sowie der Kraftschlusscharakteristik auf die Neigung zu reiberregten Schwingungen am führenden, bogeninneren Rad bei Fahrt durch einen Bogen mit einem Radius von 25 m. Diese reiberregten Schwingungen werden mit der Bildung von Polygonen 17. bis 20. Ordnung auf Straßenbahnrädern in Verbindung gebracht. Den Schwingmechanismus bildet eine durch den Querschlupf angeregte Biegeschwingung des Radträgers. In [22] überführen ZEHETBAUER et al. das MKS-Modell in ein Minimalmodell mit zwei Freiheitsgraden, an dem sich besonders gut die Einflussfaktoren auf die reiberregte Schwingung diskutieren lassen.
- Zuletzt erwähnen sie noch die Studie von KURZECK und HECHT [23], die hier bereits unter (4) vorgestellt wurde, die zeigte, dass selbsterregte Schwingungen des auch zu Radpolygonisierung führen kann.

Die Polygonisierung der Räder von **Hochgeschwindigkeitszügen** wurde erstmals bei ICE-Zügen in Deutschland festgestellt. Polygone dritter und zweiter Ordnung waren bei Standard-Vollstahlrädern bzw. gummigefederten Rädern dominant. Polygone dritter Ordnung wurden bei der Radbearbeitung initiiert, die anschließend die Biegeschwingung erster Ordnung des Radsatzes und die P2-Resonanz anregen können, was die Vergrößerung der Unrundheit des Rades fördert.

Seit 2014 ist die Polygonisierung der Räder von **Hochgeschwindigkeitszügen** in China zu einem ernsthaften Problem geworden, und es wurden große Anstrengungen unternommen, um die Mechanismen ihrer Entstehung zu untersuchen. Bei verschiedenen Arten von Hochgeschwindigkeitszügen in China wurden höhere periodische Ordnungen als beim ICE beobachtet. Die Wellenlängen der Radpolygonisierung liegen je nach Zugtyp, Gleisart und Betriebsgeschwindigkeit zwischen 100 mm und 180 mm. Bei einer Geschwindigkeit von 300 km/h und Polygonen mit einer dominierenden Wellenlänge von ca. 140 mm ergibt sich eine

Anregungsfrequenz von 580 Hz. Verschiedene Quellen aus China berichten von Ermüdungsversagen bestimmter Drehgestellkomponenten wie Drehgestellrahmen, Getriebegehäuse, Stahlspiralfeder usw. aufgrund der hohen dynamischen Belastung von Radpolygonen.

Über die Entstehungsmechanismen besteht in China kein Konsens, aber chinesische Forscher haben in letzter Zeit drei mögliche Hypothesen untersucht: (i) Schwingungen der Drehgestellkomponenten, (ii) durch den Radstand des Drehgestells bedingte Biegemodi der Schiene und (iii) durch Reibung erregte Eigenschwingungen des Radsatz-Schiene-Systems. Allerdings konnte bisher keine Hypothese komplett bestätigt werden. Da Unterschiede in der Wellenlänge für den gleichen Typ von Hochgeschwindigkeits-EMUs auf verschiedenen Strecken bei Fahrt mit der gleichen Betriebsgeschwindigkeit auftreten, kann die Ursache nicht allein beim Fahrzeug liegen. Auffällig ist, dass im Frequenzbereich um 580 Hz mit 576 Hz eine Eigenmode des Radsatzes liegt als auch die Biegemode dritter Ordnung der Schiene, die durch den Radstand des Drehgestells eingeschränkt wird (nach numerischer Modalanalyse der Schiene liegt diese abhängig von nach Schwellenabstand, Radstand des Drehgestells und vertikaler Steifigkeit der Befestigungsmittel zwischen 550 und 650 Hz).

Nach Ansicht von IWNIKI et al. scheint es immer möglich zu sein, für eine gegebene Fahrzeuggeschwindigkeit durch Experiment oder Simulation eine Frequenz des gekoppelten Fahrzeug-Gleis-Systems zu finden, die die Wellenlänge des gebildeten Radpolygons erklären könnte. Wichtiger ist es, zu überprüfen, ob die Schwingung bei dieser Frequenz während des Fahrzeugbetriebs angeregt werden kann oder nicht.

Folgende Abhilfemaßnahmen werden aufgeführt:

- regelmäßige Reprofilierung der Räder
- die Neukonstruktion von Schlüsselkomponenten wie Rädern, Achsen, Drehgestellen oder Übertragungsstrukturen
- Anpassung der Antriebs- oder Bremssteuerungen
- Vermeidung von artreinem Verkehr mit konstanter und einheitlicher Geschwindigkeit

Bahnbetriebe, bei denen Fahrzeuge und Geschwindigkeiten gemischt werden, scheinen weniger anfällig für Polygonbildung zu sein.

(13) PENG kommt in der Literaturübersicht in [24] zu folgenden potenziellen Ursachen für die Entstehung von Radunrundheiten:

- Eine anfängliche Unrundheit 3. Ordnung kann durch das Einspannen des Rades mit Drei-Backenfutter beim Reprofilieren oder eine Unrundheit 4. Ordnung durch die Tragrollen bei der Unterflurdrehbank entstehen.
- Viele Studien sagen, dass die Polygonisierung ein Festfrequenz- oder Festwellenlängen-Problem ist und durch eine Resonanzfrequenz des Fahrzeug/Gleis-Systems ausgelöst wird. Dabei haben folgende Mechanismen häufig eine zentrale Bedeutung
 - Biegeeigenmoden des Radsatzes (beispielsweise bei Lokomotiven ist die 1. Biegeeigenmode mit Polygonen 18. Ordnung und die 2. Biegeeigenmode mit Polygonen 24. Ordnung verbunden)
 - Torsionseigenmoden (angeregt durch Stick-Slip-Effekte und/oder die Traktionssteuerung)
 - P2 Resonanz (vertikale Resonanz des gekoppelten Fahrzeug/Gleis-Systems) & vertikale Anti-Resonanz des Gleises

- Strukturelastizität der Gleiskomponenten: Biegeeigenmoden der Schiene zwischen zwei Schwellen oder zwei Radsätzen.
- Übertragung der durch Polygonisierung entstanden Vibrationen an einem Radsatz auf den nächsten
- Selbstanregung durch Stick-Slick-Effekte z.B. beim Bremsen
- Eigenfrequenzen des Drehgestells

PENG erarbeitet in [24] eine Methodik, um in der Simulation zu bewerten, welche Polygonordnungen in einem System bevorzugt auftreten. Am Beispiel eines Lokomotivradsatzes auf elastischem Gleis zeigt er, wie sich aus der Phasenlage zwischen Anregung des Gleises bzw. bestehenden Polygonen auf dem Rad und periodischen Verschleiß, entscheidet, ob sich Polygonordnungen verstärken oder auslöschen. Dazu führt er eine «Verschleiß-Frequency-Responds-Function» (Verschleiß-FRF) eine «Funktion der Entwicklungstendenz» ein. Dieses Verfahren erinnert an TASSILLY und VINCENT [13][14], ist aber viel besser dokumentiert. Anschließend werden bei PENG die verschiedenen Einflüsse aus Gleisanregung, bestehenden Radpolygone sowie Radsatz- und Gleiseigenmoden untersucht. Der Phasenlage zwischen Anregung und Verschleiß kommt bei dem Entstehungsprozess die Schlüsselfunktion. Liegt die Phasenlage zwischen kleinstem Radradius und maximalem Verschleiss im Intervall $\pm \frac{\pi}{2}$, wachsen die Polygone, am stärksten bei $\phi=0$. Die Wachstumsrate ist weiter abhängig vom Amplitudenverhältnis B/A von Verschleissamplitude (B) und Polygonamplitude (A):

$$\text{Growth ratio} = \frac{\sqrt{A^2 - 2AB \cos \phi + B^2}}{A} = \sqrt{(B/A)^2 - 2(B/A) \cos \phi + 1}$$

Da die Phasenlage teilweise von dem verwendeten Modell zur Berechnung des Materialabtrages beeinflusst wird, vergleicht PENG die Auswirkung von vier gängigen Verschleißberechnungsmethoden.

In der Zusammenfassung kommt PENG in [24] zu dem Schluss, dass es keine allgemeingültige Erklärung gibt, die alle Umstände abdecken kann, möglicherweise weil die Polygonisierung von Eisenbahnradern ein Problem mit mehreren Faktoren ist und für verschiedene Szenarien (z. B. Fahrzeugtyp, Strecke, Geschwindigkeitsbereich) die Polygonisierung von Rädern auf eine unterschiedliche Kombination dieser potenziellen Faktoren zurückgeführt werden kann, wodurch das Problem schwer zu erklären ist.

Die allgemeinen Bedingungen für die Entstehung von Radunrundheiten (engl. OOR: out of roundness) sind:

- Das Rad läuft über einen langen Zeitraum mit konstanter Geschwindigkeit, um ein stabiles Umfeld für die allmähliche Entwicklung von Rad-OOR zu schaffen.
- Eine oder mehrere Strukturmoden können signifikant angeregt werden, was zu einer anhaltenden Vibration mit fester Frequenz an der Rad- / Schiene-Schnittstelle über eine lange Zeit führt.
- Die Energieverteilung der Gleisanregung ermöglicht die dominante Anregung einiger Strukturmoden.
- Die Polygon-Ordnung, die bei einer bestimmten Geschwindigkeit am stärksten zunehmen würde, kann anhand der Funktion der Entwicklungstendenz ermittelt werden, die aus der momentanen Verschleiß-FRF abgeleitet werden kann.

4 Zusammenfassung

4.1 Allgemein

Für die Entstehung von periodischen Verschleißmuster auf Rädern und Schienen wie Riffeln, Schlupfwellen und Radpolygonen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Mechanismen, die noch nicht alle geklärt sind. Für einige Fälle wie beispielsweise den Radpolygonen bei chinesischen HGV-Zügen gibt es noch teilweise unbewiesene und widersprüchliche Thesen. Bei anderen Fällen wie Schlupfwellen im Bogen liegen eindeutige Erklärungen vor. Ein Patentrezept zur Lösung derartiger Probleme ist aktuell leider nicht verfügbar. Folgende Grundvoraussetzung für die Bildung derartiger Verschleißmuster lassen sich zusammenfassen:

- Auftreten einer gemeinsamen, periodischen Schwingung des Systems Fahrzeug/Fahrweg in der Kurzzeitdynamik (Einzelfahrzeug auf bestimmten Gleisabschnitt), die eine periodische Schwingung der Normalkraft und ggf. überlagert eine Schwingung des Schlupfes und der Schlupfkraften verursacht, woraus ein periodischer Materialabtrag an Rad und Schiene entsteht.
- Bei Radpolygonen muss ein Vielfaches der Wellenlänge des periodischen Verschleißes des Radumfangs entsprechen.
- Vorliegen der für eine konstruktive Überlagerung erforderlichen Phasenlage zwischen bestehenden periodischen Anregungen durch Rad- und Schienenfehlern und periodischem Materialabtrag.
- Konstante Bedingungen, die eine stabile Musterbildung ermöglichen. Dabei sind begünstigend
 - für die Bildung von Radpolygonen:
Lange zeitliche Anteile im Fahrbetrieb mit konstanter Geschwindigkeit und sonst gleichbleibenden dynamischen Randbedingungen (Gleisbauart, Gleisanregung, Trassierung).
 - für die Bildung von Riffeln und Polygonen:
Baugleiche Fahrzeuge (insbesondere bezüglich des Fahrwerks), die den Streckenabschnitt mit gleicher Geschwindigkeit und gleichen Traktions- oder Bremskräften passieren.

Jeder Wirkmechanismus erzeugt in der Kurzzeitdynamik gleichermaßen eine periodischen Materialabtrag an Rad und Schiene. Die weiteren Randbedingungen entscheiden darüber, ob sich in der Langzeitdynamik ausgeprägte Verschleissmuster bilden.

Folgende Anregungsmechanismen können eine Rolle spielen:

- Selbsterregung durch Reibung
 - Querschlepp bei Bogenfahrt häufig als «friction induced mode-coupling instability»
 - Längsschlepp bei Traktion / Bremsen häufig in Verbindung mit der abfallenden Kraftschluss/Schlepp-Funktion
- Parametererregung
 - Schwellenüberrollfrequenz (prinzipiell möglich, nach Peng [24] eher unbedeutend)
- Fremderregung
 - Stochastisch
 - durch Rad- und Gleisfehler
 - Periodisch

- durch vorhandene Welligkeiten auf der Oberfläche von Rad und Schiene sowohl durch Fertigungsfehler (Drehbank) oder bereits stattgefundenen Verschleiß
- durch Antriebsstrang oder Bremssystem

Die folgenden Schwingformen können bei der gemeinsamen Schwingung des Systems Fahrzeug/Fahrweg eine Rolle spielen

- P2-Resonanz
- Eigenformen des Gleises (Schwellen-Antiresonanz, Biegeschwingungen der Schiene)
- Radsatzeigenformen, vorrangig Biege- und Torsionseigenmoden

4.2 Diskussion der Einflüsse

Tabelle 4-1 fasst den Zusammenhang zwischen Systemparametern und dem Einfluss auf den Erregungsmechanismus zusammen.

Tabelle 4-1 Zusammenfassende Bewertung der anfangs aufgeführten, vermuteten Einflussfaktoren

Parameter	Einfluss	Quelle
System: Straßen- oder Vollbahn, Güterverkehr	Systeme unterscheiden sich in <ul style="list-style-type: none"> - Spurführung insbesondere Radprofile (Schlüpfe) - Radlasten (Normalkraftniveau) - Radien (Querschleupf, kinematische Zwänge) - Fahrgeschwindigkeiten (Wellenlängen) 	
Spurweite	Kein spezifischer Einfluss erwartet	
Trassierung Gerade oder Bogen	Auftreten von hohen Querschleupfen aus kinematischen Zwängen insbesondere in engen Bögen	
Radsatzbauart: Losrad bzw. Radsatz	Losrad bzw. Radsatz: Einfluss auf Längsschleupf bei Bogenfahrt Masse: Einfluss auf P2-Resonanz Biege- und Torsionseigenmoden: Einfluss auf Schwingfrequenz	
Spurkranzschmierung	uneingeschränkt Verschleiß-reduzierend im Bogen (vorwiegend an Spurkranz und Schienenflanke)	
Schienenkopf-konditionierung	Gerade: moderat Verschleiß erhöhend bei Traktion/Bremsen Bogen: stark Verschleiß senkend	Kap. 4.3
Gleisbauart Schotter / Feste Fahrbahn / Straßenbündiges Rillengleis	Bestimmt dynamische Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> - P2-Resonanz - Schwellen Anti-Resonanz - Biegeschwingungen der Schienen 	

4.3 Einfluss Schmierung (Schienenkopfkonditionierung)

Bei der Bogenfahrt von Straßen- und Stadtbahnen mit konventionellen Drehgestellen durch enge Bögen ist der auftretende Schleupf durch die kinematischen Zwänge im Bogen bestimmt und so hoch, dass die Tangentialschleupfkraft im Sättigungsbereich der Kraftschlussfunktion liegt. Vereinfachend ergibt sich die Tangentialschleupfkraft im Radaufstandspunkt aus dem Produkt aus Radaufstandskraft und Kraftschlussmaximum ergibt. Der Verschleiß ist damit direkt proportional zum Kraftschlussmaximum. Eine Konditionierung der Schienenköpfe mit dem Ziel, bei ungünstigen Witterungsbedingungen das Kraftschlussmaximum von sehr hohen Werten von über 0,45 auf Werte um 0,20 abzusenken, führt zu einer entsprechenden Verschleißreduktion (verzögertes

Wachstum) und senkt gleichzeitig das Risiko reiberregter Schwingungen (Vermeiden des Auftretens).

Bei Traktions- und Bremsvorgängen ist die Schlupfkraft durch die geforderte Traktions- oder Bremskraft vorgegeben und die Schlupfgeschwindigkeit stellt sich entsprechend der vorliegenden Kraftschlussbedingungen ein. Beim Einsatz von Schienenkopfkonditionierungsmitteln ist entscheidend, ob nur das Kraftschlussmaximum abgesenkt wird oder auch die Anfangssteigung der Kennlinie abgesenkt wird. Das Beispiel aus Abbildung 4-1 zeigt den zweiten Fall: Um einen Kraftschlussbeiwert von 0,2 für die Traktion zu erreichen, erhöht sich der Schlupf von 0,1 im trockenen Zustand auf ca. 0,75 % mit dem Konditionierungsmittel. Damit erhöht sich die geleistete Reibarbeit. Ob sich dann der Materialabtrag erhöht oder verringert ist abhängig von der Änderung des Proportionalitätsfaktor zwischen Reibarbeit und Materialabtrag durch das Konditionierungsmittel.

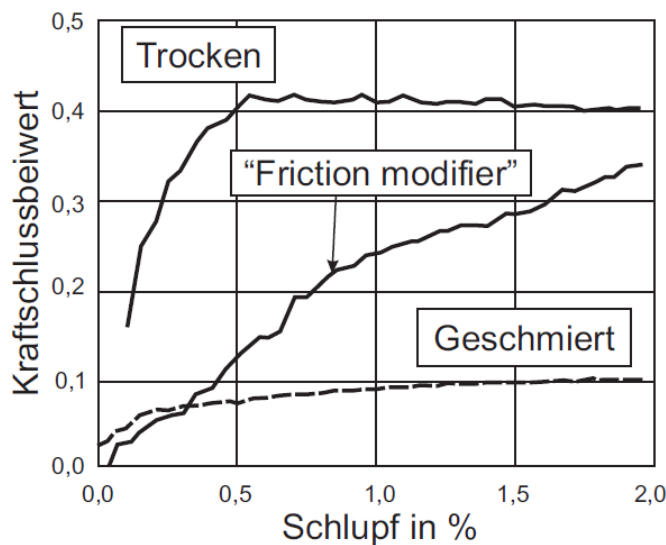


Abbildung 4-1 Kraftschlusskurve mit „Friction modifier“ nach Abbildung 4-1

Ist der Schlupf zur Überwindung kinematischer Zwänge z.B. in engen Bögen erforderlich, ändert Schmierung den Schlupf und damit die Schlupfgeschwindigkeit nicht, aber senkt die Schlupfkraft, das Produkt aus Schlupfgeschwindigkeit und Schlupfkraft, die Reibleistung sinkt und damit auch der Materialabtrag.

Müssen dagegen Schlupfkraft z.B. als Antriebskräfte übertragen werden, erhöht eine Schmierung den für die Übertragung der gleichen Schlupfkraft erforderlichen Schlupf und damit die Schlupfkraft, so dass bei gleicher Schlupfkraft die Reibleistung und damit auch der Materialabtrag ansteigen.

Siehe auch Linder [3] Kap. 5.2.3, dort wird gezeigt, dass ein geringerer Schlupfwert in der Simulation im 300 m Bogen zu reduziertem und im 1200 m Bogen zu erhöhten Materialabtrag führt.

5 Antworten auf die eingangs aufgeworfenen Fragen

5.1 Gibt es einen Zusammenhang zwischen Polygonbildung und z.B. Riffelbildung?

Ja, Polygonbildung und Riffelbildung können auf den gleichen, mechanischen Schwingprozessen basieren. Grundsätzlich können Schwingprozesse, die in der Kurzzeitdynamik zu periodischem Verschleiß führen, sowohl Radpolygone als auch periodische Schienenfehler (Riffel oder Schlupfwellen) verursachen. Ob sich die entsprechenden Verschleißphänomene ausbilden hängt von der Gleichförmigkeit der Randbedingungen für die Langzeitdynamik ab.

5.2 Hat der Schwarzbelag einen Einfluss auf die Riffel- und Polygonbildung?

Leider wurden zu Schwarzbelag keine Literaturstellen gefunden. Vorschläge zur weiteren Untersuchung des Einflusses von Schwarzbelag macht Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

5.3 Welche Auswirkungen haben Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung?

Der Einfluss der **Spurkranzschmierung** wurde nicht im Detail untersucht. Theoretisch sollte eine Spurkranzschmierung durch starke Reibwertminderung bei Spurkranzkontakt vorrangig den Verschleiß an Spurkranz und Schienenflanke reduzieren und einen nachrangigen Einfluss auf periodischen Laufflächenverschleiß haben. Da sich häufig nicht verhindern lässt, dass Spurkranzschmierfett in geringfügigen Mengen auch auf die Lauffläche wandert, kann die Spurkranzschmierung auch ansatzweise als Schienenkopfkonditionierung wirken.

Eine **Schienenkopfkonditionierung** führt in **engen Bögen** zur Minderung der Neigung zur Schlupfwellenbildung, da bei gleichen Schlupfwerten (aus der Bogenlaufkinematik) die Schlupfkräfte und die Reibarbeit gesenkt werden, womit sowohl die Anregungsenergie von reiberregten Schwingungen als auch der Materialabtrag gesenkt werden.

Auf **geraden Gleis** und bei durch Längsschlupfkräften aus Traktion oder Bremsen angeregten Riffelbildungsprozessen führt eine Schmierung durch eine Schienenkopfkonditionierung zu höherer Reibarbeit und somit (theoretisch) zu einem schnelleren Riffelwachstum.

5.4 Zusammenhang Phänomene Infrastruktur- und Fahrzeugseitig?

Die meisten plausiblen Erklärungen des Entstehungsprozesses in der Kurzzeitdynamik setzen eine gemeinsame Schwingung von Gleis und Rad bzw. Radsatz voraus. Es müssen demnach die geeigneten Fahrzeug- und Gleiseigenschaften zusammentreffen.

5.5 Wodurch entstehen Riffel in der Geraden bzw. im Bogen?

Schlupfwellen in engen Bögen entstehen meistens durch reiberregte Schwingungen bei Bogenfahrt. Kinematische Zwänge werden durch Schlupf unter hohen Längs- und/oder Querschlupfkräften im Radaufstands ausgeglichen, was die Voraussetzung für die Reiberregung bildet. Radsatz und Gleis beginnen gemeinsam zu schwingen was zu einer periodischen Schwingung der Reibarbeit führt.

Riffel in der Geraden können durch Traktionskräfte und Schlupf ähnlich wie Schlupfwellen oder durch eine Anfangserregung (Fehler auf Rad- bzw. Schienenoberfläche) in einer geeigneten Eigenfrequenz von Radsatz und Gleis provoziert werden. Dabei muss die Phasenlage von periodischem Materialabtrag zur Anfangsanregung passen, so dass der periodische Materialabtrag die Anfangsanregung verstärkt.

5.6 Wodurch entsteht Polygonbildung am Rad

Grundsätzlich entstehen Radpolygone durch die gleichen Schwingprozesse wie bei periodischen Schienenfehlern. Allerdings müssen zusätzlich

- ein ganzzahliges Vielfaches der sich aus Schwingfrequenz und Fahrgeschwindigkeit ergebenden Wellenlänge dem Radumfang entsprechen und
- das Fahrzeug ausreichend häufig den Randbedingungen ausgesetzt sein (vor allem konstante Geschwindigkeit).

5.7 Was sind typische Wellenlängen bzw. Frequenzbereiche?

Die Wellenlängen von Riffeln bzw. Schlupfwellen variieren zwischen 25 mm und 1500 mm abhängig von Verkehrssystem (Tram, Vollbahn, HGV, heavy-haul Güterverkehr) und Fahrgeschwindigkeit. Zwischen Wellenlänge und Schwingfrequenz sind über die Fahrgeschwindigkeit gekoppelt. Typische Schwingfrequenzen liegen zwischen 40 und 600 Hz. Radpolygone treten zwischen der dritten und im Bereich der zwanzigsten Ordnung (Anzahl der Perioden über den Radumfang auf).

5.8 Akustische Auswirkungen (Dröhnen, Kurvenkreischen, ...)

Periodischer Verschleiß an Rad und/oder Schienen erhöht das Rollgeräusch. Schlupfwellen im Bogen sind häufig mit einer weniger akustisch relevanten Frequenz verbunden (z.B. 80 Hz), so dass dort eher eine Vibrationsproblematik und Dröhngeräusche im Vordergrund stehen, ohne dass Schallgrenzwerte verletzt werden. Höhere Frequenzen, insbesondere im Hochgeschwindigkeitsverkehr sind akustisch sehr relevant. Zusätzlich führen alle periodischen Verschleißmuster zu einer erhöhten dynamischen Belastung von Gleis und Fahrwerk.

Bei Bogenfahrt basieren sowohl die Schlupfwellenbildung als auch das Kurvenkreischen auf eine reiberregte Schwingung im Rad/Schiene-Kontaktpunkt. Es ist davon auszugehen, dass an einem Rad sich beide Phänomene ausschließen. Theoretisch kann nicht ausgeschlossen werden, dass in einem engen Bogen gleichzeitig die Voraussetzungen für

- Kurvenkreischen am vorlaufenden, bogeninneren Rad
- durch den Längsschlupf angeregten schlupfwellenbildende Schwingung am nachlaufenden Radsatz

erfüllt sind.

5.9 Welchen Einfluss hat eine Reibungsselbsterregung

Reibungsselbsterregung ist die Hauptursache für Schlupfwellenbildung im Bogen und teilweise in der Geraden unter hohen Traktions- oder Bremskräften.

5.10 Welchen Einfluss hat die Profilpaarung Rad Schiene, welche Auswirkung hat ein Zweikontaktpunkt.

Generell bestimmt natürlich die durch die Rad/Schiene-Profilpaarung definierte Position und Größe der Kontaktfläche Lage und Menge des Materialabtrags. Allerdings wurde diese Frage nicht im Detail untersucht, da davon ausgegangen wird, dass der Einfluss gering ist: Bei periodischen Verschleiß, der bei der Fahrt in der Geraden gebildet wird, liegt der Kontaktpunkt oben auf dem Schienenkopf und etwa mittig auf dem Radprofil. Die Profile haben dann praktisch keinen Einfluss für die dem periodischen Verschleiß zugrundeliegenden Schwingprozess.

Bei Bogenfahrt können durch die Rad/Schiene-Profilpaarung die Schlüpf- und Schlupfkräfte in gewissen Grenzen abhängig von der Fahrwerksausführung beeinflusst werden. Allerdings wird hier auch kein großer Hebel erwartet.

6 Einordnung im Kontext der selbstlernenden Schienenkopfkonditionierung

6.1 Schwarzbelag

Zum teilweise bei Straßenbahnbetrieben weit verbreitetem Schwarzbelag auf dem Fahrspiegel der Schienenköpfe insbesondere bei in die Straße eingelassenen Schienen wurden keine Quellen gefunden. Vermutlich handelt es um eine Mischung aus Konditionierungsmittel und Dreck. Aus Sicht der Neigung zu periodischem Verschleiß sind hier zwei Punkte relevant:

- Kraftschluss/Schlupf-Funktion bei Schwarzbelag im Vergleich zu sauberer, trockener bzw. rein konditionierter Schiene.
- Änderung des Verschleißverhaltens (Proportionalitätsfaktor zwischen Materialabtrag und geleisteter Reibarbeit).

Aus der Bildung von Schwarzbelag kann auf eine intensive Schmierung bzw. sogar Übersmierung geschlossen werden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf einen zu reduzierenden ökologischen Fingerabdruck interessant. Weitere negative Folgen können aktuell nicht bestätigt oder wiederlegt werden. Schwarzbelag ist dementsprechend eine Rückmeldung, dass an einem bestimmten Streckenpunkt zu viel Konditioniermittel aufgebracht wird.

6.2 Berücksichtigung beider Schmiersysteme (SKK und SKS)

Weiterhin sollten im Zusammenhang mit einer Schienenkopfkonditionierung auch

- der Einfluss der Spurkranzschmierung und
- unterschiedliche Materialhärten von Rad und Schiene

mit in die Betrachtung einbezogen werden.

In zahlreichen Situationen wird es zu einer Vermischung der Spurkranzschmierung und der Schienenkopfkonditionierung kommen. Als generelle Aussage kann getätigt werden, dass eine Schienenkopfkonditionierung insbesondere Laufflächenverschleiss und Lärm in Form von Kurvenquietschen (schwingende Eigenformen des Radkörpers) und die Spurkranzschmierung den Spurkranzverschleiss und Lärm in Form von Kurvenkratzen (intensiver Spurkranzkontakt) deutlich reduzieren kann. Eine konkrete Aussage, um wieviel Prozent der Verschleiss von Rad und Schiene durch optimierte (intelligente) Schmiersysteme (Spurkranzschmierung und/oder Schienenkopfkonditionierung) reduziert werden kann wird innerhalb dieses Projekts nicht möglich sein. Hauptgründe sind die sich stetig verändernden Betriebsbedingungen (Mischbetrieb Tramlink/Combino, Einführung Tramlink, Ausmusterung Schindler- und Vevey Tram, Baustellen, ...) als auch der mehrjährige Verschleissprozess (z.B. Liegedauer der Schiene) der berücksichtigt werden sollte. Eine theoretische Aussage zur möglichen Verschleissreduktion ist durch Simulationsrechnungen möglich.

Aus der Literaturstudie und den gesammelten Erfahrungen der Autoren kann ferner abgeleitet werden, dass eine Schienenkopfkonditionierung auf der kurveninneren Schiene vermutlich am effizientesten ist und den Lärm grossteils eliminiert. Bei den stationären Anlagen in Bern wurde dem durch die Anordnung der Bohrung auf dem Schienenkopf Rechnung getragen. Dies könnte auch ein Ansatz für die mobile, fahrzeugseitige Konditionierung sein um eine weitere Mengenreduktion des Konditioniermittels zu erhalten. Akustische Messungen mit beidseitig an den Rädern angebrachten Mikrofonen bestätigen die Lärmquelle des Kurvenquietschens am kurveninneren Rad.

Vergleichbare Betrachtungen bezüglich der Spurkranzschmierung sind schwierig, da aufgrund der sich ändernden Fahrwerksstellung in Kurven (insbesondere Aussensehenstellung und Spiessgang) am kurveninneren und kurvenäusseren Rad und beim Befahren von Weichen am Radrücken zum Spurkranzkontakt kommen kann der entsprechend geschmiert werden sollte.

7 Referenzen

- [1] *Methoden zur Minderung mittelfrequenter Schwingungen bei Bogenfahrt im Schienennahverkehr*, Bernhard Kurzeck, Dissertation TU Berlin, 2007.
- [2] *UIC-Kodex 712 E Schienenfehler*
UIC, 2002
- [3] *Dissertation Verschleiss von Eisenbahnrädern mit Unrundheiten*
Christian Linder, 1997
- [4] *Beschädigungsarten an der Schiene – verursacht durch den Betrieb*
Hans-Dieter Grohmann, Tagungsbericht Internationales Symposium «Schienenfehler», 2020
- [5] *Out-of-round railway wheels and polygonization*
Simon Iwnicki, Jens C. O. Nielsen & Gongquan Tao, *Vehicle System Dynamics*, 61:7, 1787-1830, DOI:10.1080/00423114.2023.2194544, 2023
- [6] *Stand der Forschung und Forschungsbedarf im Bereich Eisenbahnlärm*
Ulrich Weidmann, Markus Hecht & Markus Maibach, IVT ETH Zürich, 2015
- [7] *Zur Reduktion der Schlupfwellenbildung*
Florian Auer, EI-Eisenbahningenieur, 2012
- [8] *Engineering Manual, TMC 266, Rail Defects Handbook*
RailCorp Transport, 2012
- [9] *Knothe, K.: Gleisdynamik. Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin 2001.*
- [10] *Grassie, S.L. und J. Kalousek: Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Volume 207, Issue 1, 1993, Seiten 57 - 68.*
- [11] *Sato, Y., A. Matsumoto und K. Knothe: Review on rail corrugation studies Sato. Wear 253(2002), Issue 1-2 (July), Seiten 130 - 139.*
- [12] *Kim, K.H.: Verschleißgesetz des Rad-Schiene-Systems. Dissertation, Aachen, 1996.*
- [13] *Tassilly, E. und N. Vincent: A linear model for the corrugation of rails. Journal of Sound and Vibration 150 (1991), Seiten 25 - 45.*
- [14] *Tassilly, E. und N. Vincent: Rail corrugations: analytical model and field tests. Wear 144 (1991), Issue1 - 2 (April), Seiten 163 - 178.*
- [15] *Kurzeck, B.: Combined friction induced oscillations of wheelset and track during the curving of metros and their influence on corrugation, Wear 271 (2011), Seiten 299–310.*
- [16] *Magnus, K.: Schwingungen. 4. Auflage, B. G. Teubner, Stuttgart, 1986.*
- [17] *Suda, Yoshihiro; Iwasa, Takashi; Komine, Hisanao u.a.: Development of onboard friction control. Wear, 2005, Nr. 7/8, Seite 1109 - 1114.*
- [18] *Lulu GB, Chen R, Wang P, et al. Random vibration analysis of tram-track interaction on a curve due to the polygonal wheel and track irregularity. Vehicle System Dynamics 2022; 60(14): 1125–1147.*
- [19] *Shi M, Li W, Wu M, et al. Analysis of out-of-round wheels and the effect of wheel polygonalization on vehicle vibration. In: Proceedings of the 11th International*

Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2018), Delft, The Netherlands; 2018. p. 856–861.

- [20] *Staskiewicz T, Firlik B, Kominowski J. Out of round tram wheels – multibody simulation study based on measured wheel rim geometry. Proc Inst Mech Eng Part F J Rail Rapid Transit. 2022;236(1):122–133.*
- [21] *Zehetbauer F, Edelmann J, Plöchl M, et al. Study on potential evolution mechanisms of OOR wheels at trams. In: The IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. New York: Springer; 2022. p. 572–581.*
- [22] *Zehetbauer F, Edelmann J, Plöchl M. A minimal model to study self-excited vibrations of a tram wheelset in curves with small radius of curvature. Vehicle System Dynamics. 2023. DOI:10.1080/00423114.2022.2139728.*
- [23] *Kurzeck B, Hecht M. Dynamic simulation of friction-induced vibrations in a light railway bogie while curving compared with measurement results. Vehicle System Dynamics 2010; 48(Suppl.): 121–138.*
- [24] *Peng, Bo (2020) Mechanisms of Railway Wheel Polygonization. Doctoral thesis, University of Huddersfield.*
- [25] *Tao G. Investigation into the formation mechanism of the polygonal wear of HXD electric locomotive wheels [PhD thesis]: Southwest Jiaotong University; 2018.*
- [26] *Croft, B.E., C.J.C.Jones, D.J.Thompson: Modelling the effect of rail dampers on wheel–rail interaction forces and rail roughness growth rates, Journal of Sound and Vibration 323 (2009), 17–32.*
- [27] *O. Oyarzabal, J. Gómez, J. Santamaría, E.G. Vadillo: Optimization of track parameters, considering their physical dispersion, to minimize rail corrugation, 9th International Workshop on Railway Noise 2007, Munich.*
- [28] *Gómez, I. und E.G. Vadillo: An analytical approach to study a special case of booted sleeper track rail corrugation. Wear 251, Issues 1 - 12, pp. 91 - 924, October 2001.*
- [29] *Grassie, S.L.: Riffeln - Gründe und Gegenmaßnahmen. Verkehr und Technik, 1996, Heft 2, Seiten 63 - 70.*
- [30] *Johansson, A. und C. Andersson: Out-of-round railway wheels - a study of wheel polygonalization through simulation of three-dimensional wheel-rail interaction and wear. Vehicle System Dynamics 43 (2005), Issue 8, Seiten 539 - 560.*
- [31] *Johansson, A. und J.C.O. Nielsen: Rail corrugation growth - Influence of powered wheelsets with wheel tread irregularities. Wear 262 (2007), Issue 11 - 12 (May), Seiten 1296 - 1307.*
- [32] *Igeland, A.: Railhead corrugation growth explained by dynamic interaction track and bogie wheelset. Proc. of the Institute of Mechanical Engineers Part F 210 (1996), Issue 1, Seiten 11 - 20.*
- [33] *Andersson, C. und A. Johansson: Prediction of rail corrugation generated by three-dimensional wheel–rail interaction. Wear 257 (2004) Issue 3 - 4, Seiten 423 - 434.*
- [34] *Sheng, X., D.J. Thompson, C.J.C. Jones, G. Xie, S.D. Iwnicki, P. Allen und S.S. Hsu: Simulations of roughness initiation and growth on railway rails. Journal of Sound and Vibration 293(2006), Issue 3 - 5 (June), Seiten 819 - 829.*