

**Bericht 2-162**

**Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)  
Montreux-Oberland Bernois (MOB)**



## Vermeiden von Kurvenkreischen bei Eisenbahnen

– Veröffentlichungsbericht –

PROSE AG  
Zürcherstrasse 41  
CH-8400 Winterthur  
Schweiz  
Tel: +41 52 262 74 00  
Fax: +41 52 262 74 01  
email: info@prose.ch

	Name	Datum	Unterschrift
<b>Vorbereitet</b>	B. Thallemer, J. Raubold, M. Widmer	14.03.2005	
<b>Geprüft</b>	S. Bühler	14.03.2005	
<b>Freigegeben</b>	S. Bühler	14.03.2005	

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
2.1	Ausgangslage	5
2.2	Zielsetzung	5
2.3	Durchführung	5
<b>3</b>	<b>Erfahrungen und Beobachtungen bei der MOB</b>	<b>6</b>
3.1	Auftreten von Kurvenkreischen	6
3.2	Bisherige Versuche bei der MOB	6
3.3	Spurkranzschmierung	6
3.4	Radbauarten	7
3.5	Achslasten	7
3.6	Radschallabsorber	7
<b>4</b>	<b>Rahmenbedingungen</b>	<b>8</b>
4.1	Trassierung	8
4.2	Traktion	9
<b>5</b>	<b>Ursachen und Entstehung des Kurvenkreischens</b>	<b>9</b>
<b>5.1</b>	<b>Ursachen des Kurvenkreischens</b>	<b>9</b>
5.1.1	Kurvenkreischen durch Quergleiten	10
5.1.2	Kurvenkreischen durch Spurkranzreiben	10
<b>5.2</b>	<b>Entstehung des Kurvenkreischens</b>	<b>10</b>
5.2.1	Einflussgrössen	11
5.2.2	Wirkung	12
<b>6</b>	<b>Eingriffsmöglichkeiten zur Eliminierung des Kurvenkreischens</b>	<b>13</b>
<b>6.1</b>	<b>Ansatzpunkte</b>	<b>13</b>
<b>6.2</b>	<b>Vermeidung bzw. Verminderung der Anregung</b>	<b>14</b>
6.2.1	Anlaufwinkel bzw. Abrollgeometrie (siehe Punkt 1.1)	14
6.2.2	Reduktion der Rad-Schiene-Kräfte (siehe Punkt 1.2)	14
6.2.3	Kontaktgeometrie des Radaufstandspunktes (siehe Punkt 1.3)	15
6.2.4	Fahrzeuggeschwindigkeit (siehe Punkt 1.4)	15
6.2.5	Reibwertbeeinflussung durch ortsfeste oder fahrzeuggebundene Anlagen (siehe Punkt 1.5)	15
6.2.6	Aufschweissungen von metallischen Materialien (siehe Punkt 1.3 und 1.5)	18
6.2.7	Spezielle Materialpaarungen (siehe Punkt 1.5)	18
<b>6.3</b>	<b>Dämpfung der Schwingung</b>	<b>19</b>
6.3.1	Innere Dämpfung und Anregung der Eigenmodi (siehe Punkt 2.1)	19
6.3.2	Äussere Dämpfung (siehe Punkt 2.1 und 2.2)	19

<b>6.4</b>	<b>Abschirmung der Ausbreitung (siehe Punkt 3)</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>Kommentierte Literatur</b>	<b>23</b>

# 1 Zusammenfassung

Diese Veröffentlichung ist im Zusammenhang eines Auftrags vom BUWAL und MOB an PROSE zum Thema Vermeiden von Kurvenkreischen bei Eisenbahnen entstanden. Dabei wurden Lösungsvorschläge zur Eliminierung des Kurvenkreischens bei der MOB erarbeitet.

Ausgangslage ist, dass das Rollmaterial der MOB sukzessive mit Radschallabsorbern ausgerüstet wird. Diese zeigen eine gute Wirkung gegen Kurvenkreischen. Die Umbauten werden im Rahmen normaler Revisionen durchgeführt und es wird daher noch längere Zeit in Anspruch nehmen, bis das Kurvenkreischen mit dieser Massnahme eliminiert werden kann. Deshalb prüft MOB, an einigen Bögen auch Massnahmen an der Strecke vorzunehmen, die das Kurvenkreischen unterbinden. Dieser Bericht dokumentiert die Ausgangslage, die Lösungsansätze und führt eine Grobevaluation von auf dem Markt erhältlichen Lösungen durch.

Die Erfahrungen und Beobachtungen, die bei der MOB gemacht wurden, und der aktuelle Stand der Wissenschaft sind dokumentiert und bewertet. Die Entstehung des Kurvenkreischens und die Einflussparameter werden beschrieben. Die Eingriffsmöglichkeiten werden vorgestellt und Lösungsansätze diskutiert und bewertet.

Die Rahmenbedingungen bei der MOB sind mit Meterspur, engen Radien, grossen Steigungen und konzentrierter Traktion gegeben und schränken die Auswahl der Lösungsansätze ein. Neben dem schon verfolgten Ansatz der Raddämpfung ist einzig der Ansatz der Reibwertreduktion am Berührungspunkt des Rades mit der Schiene erfolgversprechend. Systeme, die ortsfest Mittel auf die Schiene aufbringen, bieten den besten Nutzen bei geringsten Aufwand und Risiken. Verschiedene Produkte sind auf dem Markt, sowohl was Applikationseinrichtungen als auch was die aufzubringenden Mittel angeht. Aus Betriebs-sicht ist bei solchen Systemen insbesondere die Betriebstauglichkeit unter allen Witterungsbedingungen und die gute Einstellbarkeit der Ober- und Untergrenze des Reibwertbereichs zu beachten. Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit ist der Unterhaltsaufwand und der Mittelverbrauch entscheidend.

Validierte Lösungen für Einsatzbedingungen, die die Anforderungen bei MOB einschliessen, gibt es heute jedoch noch nicht.

## 2 Einleitung

### 2.1 Ausgangslage

Bei der von der Chemins de fer Montreux-Oberland Bernois (MOB) betriebenen Bahnnetz kommt es in engen Kurven zu Lärmbelastigungen aufgrund des Kurvenkreischens. Das Rollmaterial der MOB wird deshalb sukzessive mit Radschallabsorbern ausgerüstet. Diese zeigen eine gute Wirkung gegen Kurvenkreischen. Die Umbauten werden im Rahmen turnusmässiger Unterhaltsarbeiten durchgeführt. Deshalb wird eine vollständige Ausrüstung der Fahrzeugflotte einige Zeit in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund prüft die MOB, an neuralgischen Bögen kurzfristig Massnahmen zur Eliminierung des Kurvenkreischens auch an der Strecke vorzunehmen.

Verschiedenste Verfahren für die Vermeidung von Kurvenkreischen wurden vorgeschlagen, einige sind in Pilotanlagen realisiert, einige auf dem Markt erhältlich und schon breiter angewendet, vor allem im Bereich Metro, Strassenbahnen und Vollbahnen. Bewährte, gut dokumentierte, validierte und in Serie realisierte Lösungen für die Anwendung unter den Bedingungen der MOB sucht man heute jedoch noch vergebens.

Die Betriebsbedingungen bei der MOB (Steigungen, Radien, Traktionsart) sind zu berücksichtigen.

### 2.2 Zielsetzung

Die PROSE AG wurde vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und der MOB beauftragt, die Realisierung einer streckenseitigen Lösung von der technischen Seite zu unterstützen.

Das Ziel dieser Lösung ist, das Kurvenkreischen in engen Bögen mit minimalen Kosten und unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Trassierung und des Betriebes bei der MOB zu vermeiden.

### 2.3 Durchführung

Deshalb werden in diesem Bericht verschiedene Lösungsansätze zusammengetragen, gruppiert und grob bewertet. Die Informationsgewinnung erfolgte dabei aus vorhandenen Kenntnissen und aus Literatur- und Internetrecherchen. Aus den gesammelten Lösungsansätzen wird eine Empfehlung für die Realisierung bei der MOB abgeleitet.

Die Kenntnisse werden öffentlich zugänglich gemacht. Es wird davon ausgegangen, dass die Lösungen, die unter den Bedingungen der MOB erfolgreich sind, auch bei den anderen schweizerischen Schmalspurbahnen mit Erfolg angewandt werden können.

## 3 Erfahrungen und Beobachtungen bei der MOB

### 3.1 Auftreten von Kurvenkreischen

Bei der MOB wurden die folgenden Beobachtungen gemacht:

- Allgemeine Beurteilung
  - schwere Wagen quietschen mehr als leichte
  - Speichenräder quietschen nicht (zumindest nicht so stark)
  - unregelmässiges Gleis unterbricht Anregung sofort, um dann wieder anzusteigen (z.B. verlaschtes Gleis gegenüber geschweisstem Gleis)
- Einfluss der Witterung
  - auf trockenen Schienen tritt Kurvenkreischen auf
  - am schlimmsten im Sommer vor Gewittern
  - auch im Winter tritt Kurvenkreischen auf
  - sobald die Schienen richtig nass sind, tritt kein Kurvenkreischen auf
  - auch in den meisten Tunnels tritt Kurvenkreischen auf

### 3.2 Bisherige Versuche bei der MOB

- An einem Fahrzeug der MOB wurde mit Hochdrucksprühnebel ein Öl auf die Lauffläche gesprüht. Die Vorrichtung war schwierig einzustellen und in konstantem Zustand zu halten und damit vom Standpunkt des Unterhalts her untauglich. Das Kurvenkreischen verschwand, aber man hatte Adhäsionsprobleme.
- Bewässerung eines Kurvenabschnitts durch einen Sprühschlauch in Gleismitte. Der Wasserverbrauch war gross. Das Kurvenkreischen verschwand, man hatte keine Adhäsionsprobleme. Die Lösung ist nicht wintertauglich und eine langfristige Schädigung des Oberbaus wurde befürchtet. Deshalb wurde der Versuch abgebrochen.
- Ein Antidröhnmittel wurde auf die Radseitenflächen aufgespritzt. Im Anschlagversuch war ein klarer Unterschied erkennbar, aber das Kurvenkreischen war unverändert.
- Weichere Zwischenlagen wurden in einem ausgewählten Streckenbereich (Kurvenradien  $\geq 100$  m) auf Betonschwellen montiert. Besserer Fahrkomfort, aber keine Auswirkung auf das Kurvenkreischen. Verwendete Zwischenlagen vom Hersteller A
- Allgemein wurde beobachtet, dass, wenn ein Material (bzw. Sand, Sägemehl, Wasser) auf die Schiene aufgebracht wird, das Kurvenkreischen abrupt aufhört.

### 3.3 Spurkranzschmierung

Grundsätzlich sind alle Triebfahrzeuge bei der MOB mit einer Spurkranzschmierung jeweils an der vorlaufenden Achse ausgerüstet. Zum Teil bei älteren Fahrzeugen mit fester Zeitsteuerung (führte zu Überschmierung von Bahnhöfen und damit zu Adhäsionsproblemen). Bei neueren Fahrzeugen mit heute üblicher wegabhängiger Steuerung. Die Schmieranlagen stammen von zwei verschiedenen Herstellern (Hersteller B und C).

### 3.4 Radbauarten

Die MOB beschafft heute für Wagen und Triebwagen standardmässig Monoblockräder mit vorbereiteten Auflageflächen und Löchern für die Einzelblock-Absorber. Sobald sie abgefahren sind, können sie abgedreht und bandagiert werden. Die alten Räder sind alle bandagiert.

### 3.5 Achslasten

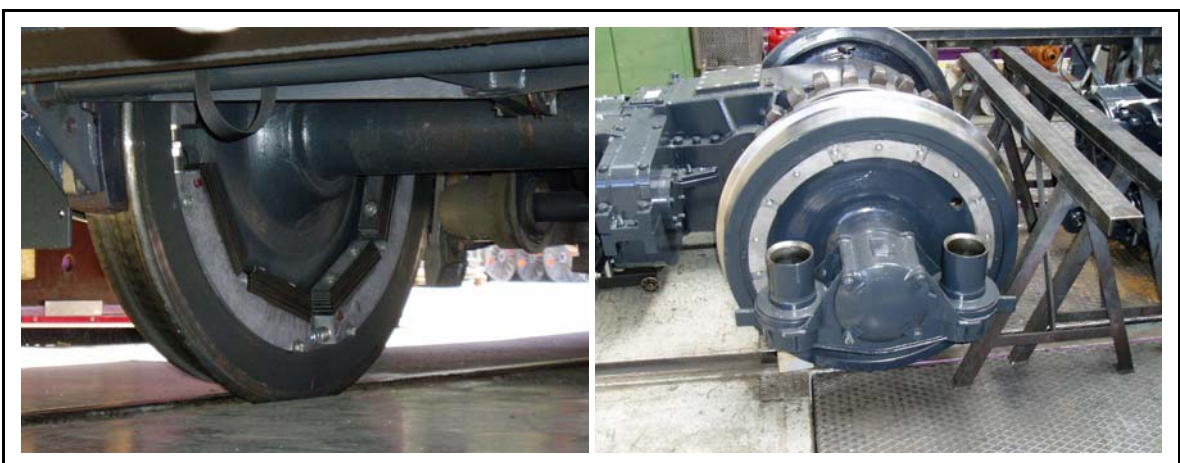
Die Achslastunterschiede sind sehr gross:

- leichteste Wagen (Güterwagen leer) ca. 2,5 t
- Lok 8000 (Ge 4/4) 16 t

### 3.6 Radschallabsorber

Bei den Fahrzeugen der MOB sind 4 Bauarten von Radschallabsorber im Einsatz:

- Eine Bauform sind Einzelblöcke, die mit Schrauben direkt an der Radscheibe befestigt sind (Hersteller D). Dazu sind die Räder mit den entsprechenden Auflageflächen und Löchern vorbereitet.
- Für Nachrüstungen bestehender Räder setzt MOB Doppelblöcke ein, die im Radreifen verspannt werden (Hersteller D). Mit 2 kleineren Schrauben werden die Blöcke in axialer Richtung festgehalten. Die Bohrungen dazu macht MOB selbst und trägt auch selbst die Verantwortung dafür. Die Schichtung der Zungen ist radial (siehe Abbildung 3-1 links).
- Bei den Zahnradbahnen (Vevey) werden Zungenabsorber vom Hersteller E eingebaut. Die Schichtung der Zungen ist dort axial (siehe Abbildung 3-1 rechts).
- Prototyp-Drehgestelle (4 Stück) vom Hersteller F mit Lamellenabsorbern vom Hersteller G.



**Abbildung 3-1:** Ansicht Doppelblockabsorber (links) und Zungenabsorber (rechts)

Bei den Triebfahrzeugen der Baureihen 6000 (Gepäcktriebwagen) und 8000 (Ge 4/4) sind keine Radschallabsorber eingebaut und müssten speziell angepasst werden.



Die Baureihe 7000 (GTW) ist ebenfalls nicht mit Radschallabsorbern ausgerüstet. Im Neuzustand der Räder fahren sie quietschfrei, mit der Zeit würden sie dann jedoch auch zu quietschen beginnen. Die Triebradsätze sind mit gummigefederten Rädern ausgerüstet.

Bei den Absorbern vom Hersteller D gibt es zwischen Radschallabsorber und Radscheibe einen Spalt, der sich mit der Zeit mit Schmutz füllt, der dann hart wird und die Wirkung der Absorber aufhebt. Deshalb wird nun eine Reinigungsprozedur entwickelt, um die Absorber dauernd funktionsfähig zu halten und Sanierungen zu vermeiden (Sanierung braucht Demontage und abmeisseln der Schmutzkruste etc.).

Des weiteren wurde der Gummi durch Silikon ersetzt, weil der Gummi teilweise Schmelzspuren zeigte.

Reibringdämpfer vom Hersteller H wurden noch nicht versucht. Die Kostenersparnis ist bei der MOB klein, da die Bandagen viele verschiedene Durchmesser aufweisen und damit viele verschiedene Ringgrößen vorgehalten werden müssten. Zudem ist bekannt, dass sich die Wirkung mit zunehmender Verschmutzung reduziert.

## 4 Rahmenbedingungen

### 4.1 Trassierung

Die MOB ist eine Schmalspurbahn im voralpinen und alpinen Gelände, mit einer Spurweite von 1000 mm. Es gibt einige bezüglich des Kurvenkreischens neuralgische Bögen mit Bogenradien zwischen 75 m und 100 m. Zudem liegen diese Abschnitte in Steigungsbereichen von 30 bis 65 ‰. In **Abbildung 4-1** sind beispielhaft zwei enge Bögen dargestellt.



**Abbildung 4-1:** Beispiel von neuralgischen Bögen

Der Oberbau besteht im Allgemeinen aus ca. 30 cm Schotter, Schwelle, Stahl-Fixierungsplatte, Kunststoff-Zwischenlage und Schiene (ca. 39-47kg/m).



Die neuralgischen Bögen befinden sich in der untermittelbaren Nähe von Wohnbebauungen, wo das Kurvenkreischen deutliche Lärmbelastigungen verursacht.  
Für die betroffenen Kurven ist die Streckengeschwindigkeit höher als die ausgeglichene Geschwindigkeit (es ergeben sich unkompensierte Querschleunigungen auf Gleisebene zwischen 0,2 und 0,9 m/s<sup>2</sup>).

## 4.2 Traktion

Aus den Rahmenbedingungen der Linienführung (mit Steigungen bis 65 ‰) und den betrieblichen Bedingungen der MOB mit einem wesentlichen Anteil lokbespannter Züge ist deutlich, dass Reibwertveränderungen sehr kritisch zu beurteilen sind.

Die MOB betreibt einen Grossteil der Züge mit konzentrierter Traktion (Lokomotive oder Triebwagen als führendes, im Zug angeordnetes oder schiebendes Fahrzeug). Die verschleissfreien Bremsen der Triebfahrzeuge (Widerstandsbremse und regenerative Bremse) werden so weit als möglich genutzt (wirkend auf Triebachsen). Diese Art des Betriebes erfordert höhere Reibwerte als ein Betrieb mit verteilter Traktion.

# 5 Ursachen und Entstehung des Kurvenkreischens

## 5.1 Ursachen des Kurvenkreischens

Hier wird bewusst das Anlaufgeräusch vom Kurvenkreischen unterschieden, da die Anregung an einem anderen Rad stattfindet und die Anregung in einer anderen Art und Weise abläuft.

Die Rollradiendifferenz kann in engen Bögen nicht mehr durch Radaufstandspunktverschiebung ausgeglichen werden. Die Folge davon ist, dass das bogenäussere Rad mit dem Spurkranz anläuft. Der Radsatz wird durch das bogenäussere Rad quasi kontinuierlich durch den Spurkanal geführt.

In **Abbildung 5-1** ist das Laufverhalten des vorlaufenden Radsatzes in engen Kurven grafisch dargestellt.

Dieses Verhalten gilt allgemein für starre Radsätze der vorlaufenden Achse eines Drehgestells bzw. Fahrzeugs. Aufgrund der engen Bogenradien dürfte sich das Drehgestell im Spiessgang durch den Bogen bewegen, d. h. beim nachlaufenden Radsatz ist ein genau umgekehrtes Verhalten im Vergleich zum vorlaufenden Radsatz anzunehmen.

In der Literatur findet man unterschiedliche Aussagen ob Einzelräder auch zu Kurvenkreischen führen, eine weitere Diskussion findet im nächsten Abschnitt statt <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Siehe auch kommentierte Literatur: [13] und [14]

Zur Zeit finden im Rahmen eines EU Forschungsprojekts detaillierte Untersuchungen, Analysen und Simulationen statt, um ein besseres Verständnis der genauen Ursachen und Zusammenhänge zu erhalten [3].

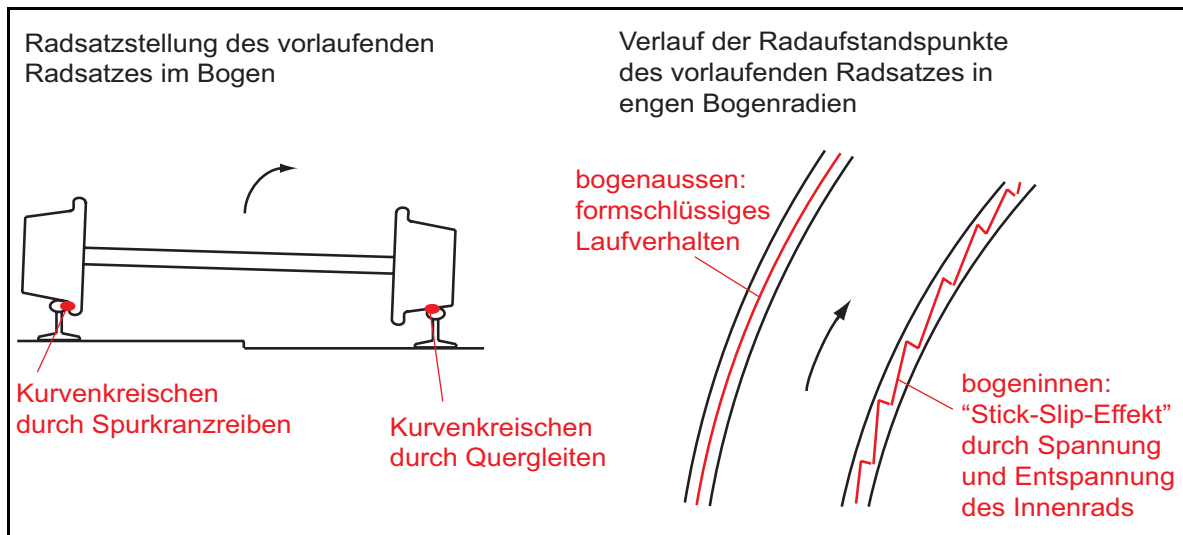


Abbildung 5-1: Verhalten des vorlaufenden Radsatzes in engen Bogenradien

### 5.1.1 Kurvengleiten durch Quergleiten

Das Innenrad läuft zur Gleismitte hin und der Radsatz verspannt sich dabei. Sobald die Spannkraft grösser wird als die Reibkraft (Reibwert mal Normalkraft) am Innenrad, entspannt sich das Innenrad ruckartig. Diese Stossanregung ("Stick-Slip-Effekt") bringt vor allem das Innenrad in seinen Eigenformen zum Schwingen und das Kurvengleiten entsteht dabei.

### 5.1.2 Kurvengleiten durch Spurkranzreiben

Das Kurvengleiten durch Spurkranzanlauf wird durch quasikontinuierliches Reiben des Spurkranzes an der Schiene erzeugt. Das heisst, die Anregung ist eine Weganregung durch die Oberflächenrauheiten am Berührungspunkt. Das Quergleiten des Aussenrades im Radaufstandspunkt kann wegen der quasikontinuierlichen erzwungenen Bewegung und der dynamischen Verspannung gegenüber dem Spurkranz als ruckfrei angenommen werden.

## 5.2 Entstehung des Kurvengleichens

Es werden die folgenden Ebenen bei der Entstehung des Kurvengleichens betrachtet:

- Einflussgrössen
- Wirkung

### 5.2.1 Einflussgrössen

Die primäre Ursache für die Entstehung des Kurvenkreischens ist die Geometrie des makroskopischen Rad-Schiene-Kontakts. Die Ursachen dafür sind einerseits darin zu suchen, dass die kinematische Abrollbedingung eines Radsatzes im Bogen nicht mehr erfüllt werden kann. Andererseits kann die Ursache auch in einem ungenügenden Ausdrehwinkel des Radsatzes im Drehgestell begründet sein. Beides führt zu einem grossen positiven Anlaufwinkel, nachfolgend zum Anlaufen des Rades an der Aussenschiene und zu einer Verspannung des Radsatzes, da das Innenrad zur Gleismitte hin läuft.

Für einen nachlaufenden Radsatz ist im allgemeinen Spiessgang anzunehmen, damit ändern sich jedoch nur die „Vorzeichen“, aber das generelle Verhalten bleibt unverändert.

Allein das Anlaufen und Verspannen des Radsatzes führt noch nicht zum Kurvenkreischen.

Erst mit den Massen, Steifigkeiten und Dämpfungen des Rades und des Radsatzes und den Eigenschaften des Rad-Schiene-Kontakts entsteht ein schwingungsfähiges System. Die Steifigkeiten und inneren Dämpfungen eines Radsatzes sind durch Material und Geometrie gegeben. Änderungen an diesen Parametern sind extrem aufwändig. Ein auf den Radseitenflächen aufgebracht Material ändert an diesen Werten nur sehr wenig. Einzig der Reibwert des Rad-Schiene-Kontakts ist ein äusserlich relativ einfach beeinflussbarer Wert.

In der **Abbildung 5-2** sind die groben Zusammenhänge schematisch dargestellt.

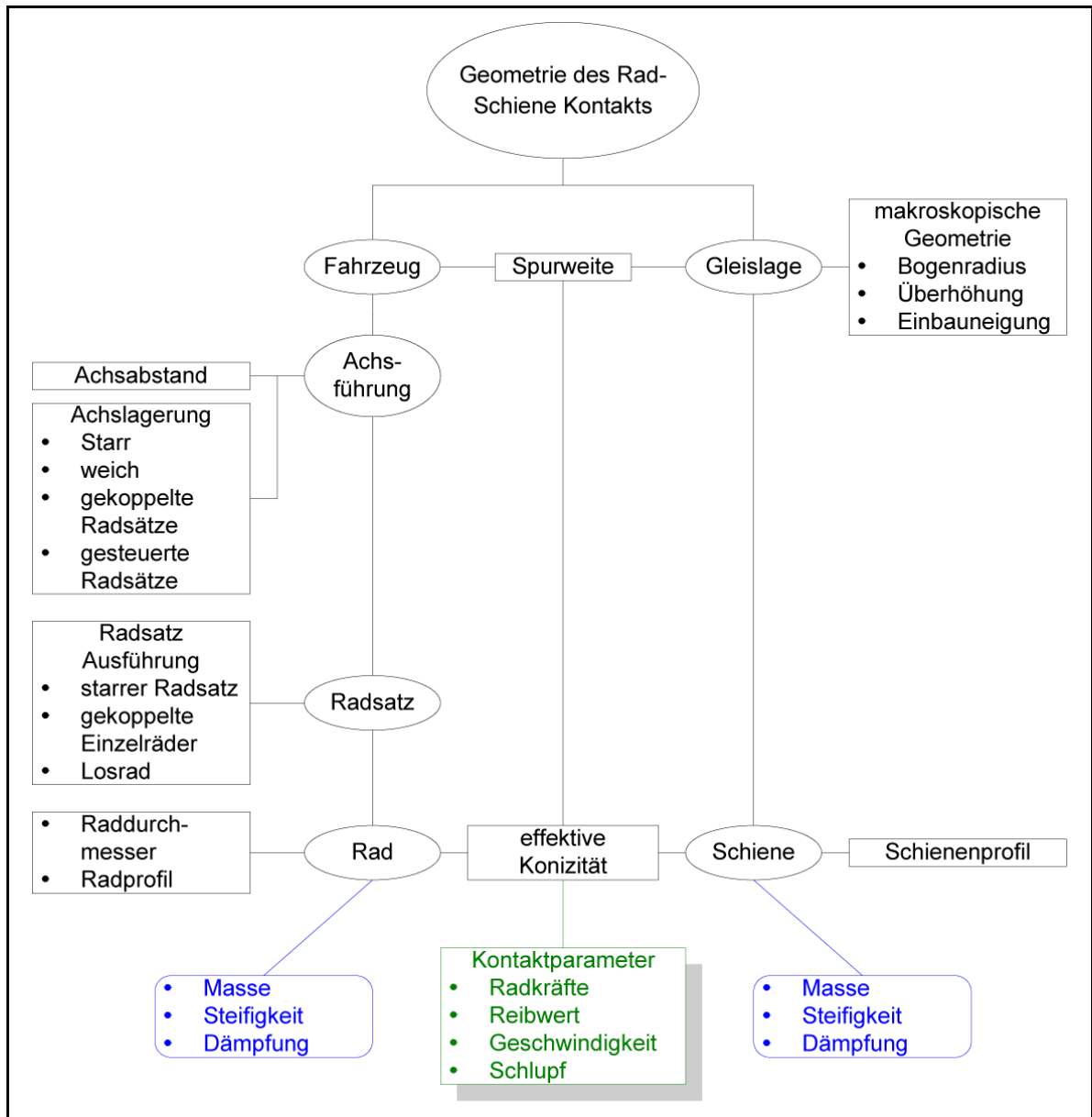


Abbildung 5-2: Einflussgrößen für Kurvenkreischen

### 5.2.2 Wirkung

Die „Stick-Slip“- Anregung im Falle des Quergleitens ist eine stochastische impulsförmige Kraftanregung in axialer Richtung mit hoher Folgerate. Dies entspricht einer dauernden breitbandigen Anregung des Radsatzes. Dieser beginnt in seinen Eigenmodi zu schwingen.

Die Anregung beim Spurkranzanlauf kann demgegenüber als kontinuierliche höherfrequente schmalbandige Weganregung interpretiert werden, denn das Abrollen des Rades und die laterale Führungskraft erzeugen einen kontinuierlichen Kontakt des Spurkranzes mit der Aussenschiene. Die häufige Reibung von Spurkranz und Schiene (in der Regel mit Schmiermittel) ergibt eine relativ glatte homogene Oberfläche sowohl am Spurkranz als auch an der Schienenflanke. Die Fahrgeschwindigkeit bestimmt primär das Frequenzband der Anregung. Da der Ort und die Bewegungsrichtung des Spurkranzanlaufs (der Rei-

bung) unter anderem vom Anlaufwinkel abhängen, ist die Richtung der Anregung nicht nur axial sondern auch radial und tangential.

Es ist offensichtlich, dass die unterschiedlichen Anregungen auch verschiedene Eigenmodi des Radsatzes anregen können. Die möglichen Eigenformen sind im Fall des Spurkranzanlaufs reduziert, da das Rad an diesem Zustand in zwei Punkten die Schiene berührt. Die schwingende Radscheibe strahlt Schall ab.

## **6 Eingriffsmöglichkeiten zur Eliminierung des Kurvenkreischens**

### **6.1 Ansatzpunkte**

Viele der Parameter, die zum Kurvenkreischen führen, sind nicht frei wählbar, wie zum Beispiel die Streckenführung. Auch am Fahrzeug sind viele Parameter nicht variierbar und damit in Bezug auf Kurvenkreischen nicht optimierbar. Massnahmen können an den folgenden Punkten ansetzen:

1. Anregung reduzieren = Verkleinerung der Sprungamplituden
  - 1.1. Anlaufwinkel reduzieren
  - 1.2. Normalkraft reduzieren
  - 1.3. Kontaktgeometrie (Einfluss des Kontaktorts und der Form der Kontaktfläche)
  - 1.4. Fahrgeschwindigkeit reduzieren
  - 1.5. Reibwert reduzieren
2. Eigenmodi = angeregte Schwingungen durch Dämpfungsmassnahmen reduzieren
  - 2.1. Dämpfung Rad und / oder
  - 2.2. Dämpfung Schiene
3. Ausbreitung

Dieser Bereich wird nicht weiterbetrachtet, da die Reduktion des Lärms nicht ausreichend ist. Benötigt würde eine Pegelreduktion grösser als 20 - 30dB. Lärmdämmung<sup>2</sup> mit z.B. Lärmschutzwänden mit touristisch vertretbaren Höhen erreichen nur einen Bruchteil davon.

Im Folgenden sind die einzelnen theoretischen Möglichkeiten mit praktisch durchführbaren Massnahmen näher erläutert.

---

<sup>2</sup> Dämpfung: Reduktion der Festkörper- Schwingung; Dämmung: Reduktion der Schallausbreitung



## 6.2 Vermeidung bzw. Verminderung der Anregung

### 6.2.1 Anlaufwinkel bzw. Abrollgeometrie (siehe Punkt 1.1)

Die Rollradiendifferenz durch die Radaufstandspunktverschiebung auszugleichen, ist aufgrund der hier betrachteten engen Bogenradien nicht möglich. Eine Anpassung des Rad- bzw. Schienenprofils, um die nötige Rollradiendifferenz zu erzeugen, steht ausser Diskussion. Zudem erfordert es eine grosse Beweglichkeit der Achse um die Hochachse bzw. ein grosses longitudinales Primärfederungsspiel mit passender Steifigkeit und eventuell nötiger Dämpfung. Bekannt ist, dass kastengesteuerte Achsen bei Drehgestellfahrzeugen deutlich geringere und damit bessere Anlaufwinkel verursachen als gegenseitig gesteuerte Achsen oder selbst regulierende (selbst gesteuerte) oder gar starr gefesselte Achsen [15]. Dies gilt jedoch nur, wenn sich das ganze Fahrzeug im Vollbogen befindet.

Bei Strassenbahnen und Talgo-Gliederzügen sind Einzelradfahrwerke im Einsatz, die gesteuert sein müssen, da sonst kein verbesserter Anlaufwinkel erreicht wird [19].

Eine Änderung der Radsatzanbindung steht jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht zur Disposition.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### 6.2.2 Reduktion der Rad-Schiene-Kräfte (siehe Punkt 1.2)

Um die Schwingungsanregung zu vermeiden, kann man die Haftkraft reduzieren, um dadurch die ruckartigen Bewegungen des Radsatzes zu verhindern oder zumindest die Sprungamplituden klein zu halten. Eine Reduzierung der Haftkraft kann durch eine kleinere Normalkraft oder durch einen kleineren Reibwert erreicht werden.

Radaufstandskraft und Verspannkraft sind die Aktionskräfte im Falle des Quergeleitens. Im Falle des Spurkranzreibens besteht eine Weganregung durch die Oberflächenrauheiten, die nötige Andruckkraft ist eine Kombination von Führungskraft und innerer Verspannung des Rades zwischen Radaufstandspunkt und Kontaktpunkt des Spurkranzanlaufs.

Die Achslast lässt sich normalerweise nicht ändern, nur die Verteilung der Radaufstandskraft auf Innen- und Aussenrad durch Variation der resultierenden Querbewegung ist in geringem Umfang möglich. Es wird mit unkompensierter Geschwindigkeit gefahren, damit sind die Aussenräder in der Regel höher belastet als die Innenräder.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verteilung der Normalkraft am Rad. Zum Beispiel kann bei Einsatz einer Rillenschiene die gesamte Normalkraft von der Lauffläche entfernt werden und auf den Spurkranz übertragen werden, wie dies bei Strassenbahnen in Kreuzungsbereichen oft praktiziert wird. Dies erfordert eine angepasste Spurkranzform und entfällt deshalb in diesem Fall. Auch wird damit der Fahrkomfort in der Regel verschlechtert.

Eine Verteilung der Kraft auf Lauffläche und Spurkranz mit einer elastischen Rillenschiene entfällt bei der MOB mit ihrem grossen Normalkraftspektrum und ist nicht erprobt.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### **6.2.3 Kontaktgeometrie des Radaufstandspunktes (siehe Punkt 1.3)**

Einen Einfluss auf das Kurvenkreischen kann der Kontaktort und die Form der Kontaktfläche haben, so dass sich lokal ändernde Reibwert und Kraftflussrichtungen ergeben. Man könnte durch eine modifizierte Kontaktgeometrie (d.h. des Schienenkopfes in Längsrichtung, beispielsweise durch eine Art künstlicher Riffel) versuchen, die „Stick-Slip“ Bewegung zu minimieren hin in Richtung einer quasi gleitenden Bewegung, so dass die Anregungsstösse des Radsatzes durch viele Stösse mit kleinen Amplituden ersetzt werden. Diesbezüglich wurde keine Quelle gefunden, die diesen Ansatz verfolgt. Erfolgsaussichten sind damit unklar und der Umfang der Änderungen am Gleis eher gross.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### **6.2.4 Fahrzeuggeschwindigkeit (siehe Punkt 1.4)**

Durch Senkung der Fahrgeschwindigkeit könnte vermutet werden, dass die Anregung genügend abnimmt, um Kurvenkreischen zu vermeiden. Die Sprungamplituden bleiben zwar wohl gleich, aber die Häufigkeit nimmt ab.

Bisherige Untersuchungen bei der MOB zeigten, dass der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf das Kurvenkreischen gering ist und das Kurvenkreischen auch bei niedrigen Geschwindigkeiten nicht verschwindet.

Auch Erfahrungen bei Strassenbahnen und beim Verschieben von Wagen in Depot- und Werksarealen zeigen, dass eine Geschwindigkeitsreduktion das Kurvenkreischen nicht vermeiden kann.

Hingegen nimmt die Einwirkdauer bei Reduktion der Geschwindigkeit zu.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### **6.2.5 Reibwertbeeinflussung durch ortsfeste oder fahrzeuggebundene Anlagen (siehe Punkt 1.5)**

Der Reibwert kann einerseits durch zusätzliche Verbrauchsmittel und andererseits durch Variation der Kontaktmaterialien beeinflusst werden. Gängig sind bereits ortsfeste Schmiersysteme und fahrzeuggebundene Spurkranzschmiersysteme. Während der Spurkranzanlauf nach einem Schmiermittel verlangt, das den Reibwert minimiert, benötigt man für das Quergleiten ein Mittel, das optimalerweise richtungspolar wäre (in Längsrichtung einen möglichst hohen und in Querrichtung einen möglichst niedrigen Reibwert). Der Reibwert darf nicht tiefer sein als bei nasser Schiene, da sonst Traktionsprobleme entstehen können. Bei Systemen mit verteilter Traktion könnten Bremsprobleme vor Traktionsproblemen auftreten.

Ausgehend vom Laufverhalten eines führenden Radsatzes müsste nur die Innenschiene auf der Fahrfläche behandelt werden. Da aber für nachlaufende Radsätze Spiessgang anzunehmen ist, muss demnach auch die Aussenschiene auf der Fahrfläche behandelt werden. Dies wird durch Erfahrungen in Japan bestätigt [17]. Damit scheiden Überlegungen aus, dass eine Schiene behandelt werden kann und die andere die Traktion übernimmt, also auf der Innenschiene auch Öle oder Fette verwendet werden können, die den Reibwert sehr stark herabsetzen.

## Ortsfeste Anlagen zur Reibwertkonditionierung

Ortsfeste Anlagen haben den Vorteil, dass sie nur an den besonders kritischen Stellen eines Bahnnetzes installiert werden müssen und alle Achsen mit dem Mittel behandelt werden. Nachteilig ist der Unterhalt und eventuelle Einschränkungen beim Gleisunterhalt durch die Installation.

Mit Hilfe ortsfester Reibwertkonditionieranlagen wird ein Mittel auf die Schienenfahrfäche aufgetragen und dabei die zwischen Rad und Schiene auftretenden Reibungen so beeinflusst, dass der für das Quietschen verantwortliche Stick-Slip-Effekt vermindert oder eliminiert wird. Durch eine spezielle Zusammensetzung dieser Mittel wird dabei der Reibwert auf ein optimales Niveau zur Eliminierung des Kurvenkreischens bei gleichzeitiger Sicherstellung der Traktions- und Bremskräfte gebracht. Als Nebeneffekt werden zudem teilweise beachtliche Verschleissminderungen erreicht.

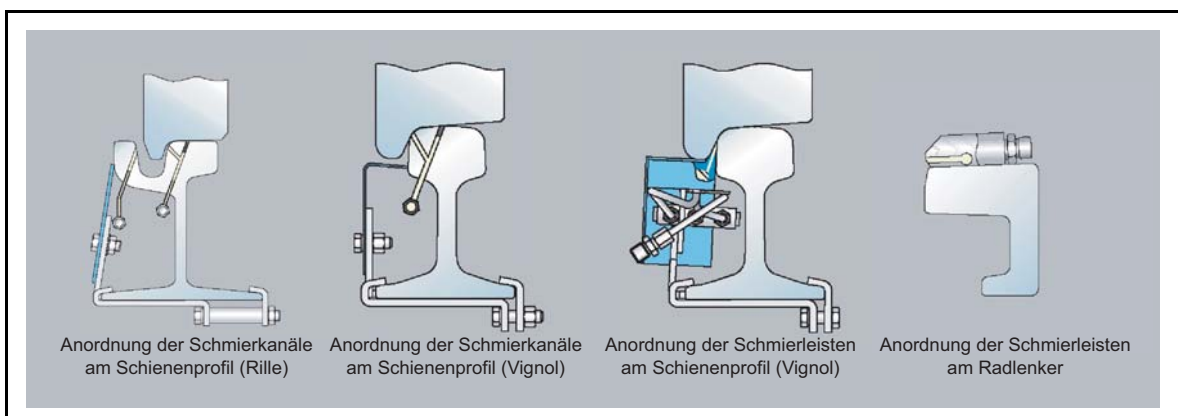
Dabei wird entweder eine Flüssigkeit durch entsprechende Anlagen aufgesprüht oder ein pastöses Mittel direkt durch Schienenkopfb Bohrungen hindurch gepresst. Ziel ist es, das verwendete Mittel auf die Räder aufzubringen, von wo es dann auf die Rad-Schiene-Kontaktfläche abgegeben wird. So wird erreicht, dass die Schiene in kritischen Kurvenabschnitten mit einem dünnen Film bedeckt wird.

Die Platzierung der Reibwertkonditionieranlage muss direkt vor den Anlaufstellen des Spurkranzes an den Schienen erfolgen. Diese Anlaufstellen sind für jeden Einzelfall gesondert zu bestimmen. Ein sich nähernder Zug wird durch einen Vibrationssensor oder durch eine Lichtschranke erkannt und daraufhin eine Mittelabgabe ausgelöst.

## Produkte und Anlagen

Eine Übersicht über mögliche Anordnungen der Anlagen mit Schienenkopfb Bohrungen oder Sprühanlagen zeigt die **Abbildung 6-1**. Diese Übersicht entstammt einem Werbeprospekt über ein elektronisches Schmieresystem der Firma I. Das Mittel wird dabei entweder durch Bohrungen direkt auf den Schienenkopf aufgebracht oder durch Leisten auf den Schienenkopf aufgesprüht.

Die Anlagen der Firma I sind bei vielen Strassen- und Vollbahnen im Einsatz. Kunden sind beispielsweise die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) oder die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ).



**Abbildung 6-1:** Anordnungsmöglichkeiten der Kanäle und der Leisten zum Mitteleintrag (Bildquelle: Firma I)

Ein anderes Beispiel für die Anwendung einer ortsfesten Reibwertkonditionieranlage ist die bei der Bremgarten-Dietikon-Bahn eingebaute Anlage der Firma J. Für dieses System wurden die Schienenköpfe mit Bohrungen versehen, durch die dann ein kaugummiartige Mittel der Firma K direkt auf die Schiene gelangt. Der Vorteil gegenüber Sprühsystemen ist, dass der Wirkstoff direkt an die richtige Stelle gelangt. Das Kreischen ist bei nahezu allen Fahrzeugen verschwunden, d.h. es wurde eine Reduzierung des Lärms von ursprünglich 100 dB auf durchschnittlich 65 dB erreicht.

Die Mittelabgabe wird durch eine vor der kritischen Stelle installierten Lichtschranke ausgelöst, wobei das Mittel durch Gasdruck ausgepresst wird. Der Gastank und der Behälter für das Reibwertmittel wird einmal jährlich aufgefüllt. Die gesamte Versorgungsanlage ist etwa 1.20 m hoch und 0.40 m breit und wurde in der Kurve im Schotter eingelassen, sie ist also von aussen nicht sichtbar, sie kann jedoch auch konventionell in Schaltschränken neben dem Gleis angeordnet werden. Die Anlagen sind in Steigungen von 43 ‰ und 50 ‰ und in Kurvenradien von 60 m, 70 m und 120 m angebracht. Es wurden bisher (auch bei Nässe) keinerlei negative Auswirkungen auf das Fahr- und Bremsverhalten festgestellt. Die Bremgarten-Dietikon-Bahn betreibt die Anlagen auch im Winter, obwohl zu dieser Jahreszeit auch schon vor der Installation kein Kurvenkreischen aufgetreten ist. Als positiver Nebeneffekt konnten Verschleissminderungen von bis zu 30% verzeichnet werden. Die Bremgarten-Dietikon-Bahn betreibt jedoch nur Triebwagen im Unterschied zur MOB, die auch lokbespannte Züge einsetzt.

Die SBB setzt bei der S-Bahn Zürich eine Pilotanlage der Firma J ein. Jedoch waren Schienenkopfbohrungen aus Sicherheitsgründen nicht tolerierbar, so dass bei dieser Anwendung das Mittel mit einem Sprühsystem aufgebracht wird.

Als Reibwertvermittler kann auch ein Mittel der Firma L eingesetzt werden [4].

Ein anderer Hersteller eines Reibwertkonditionierers ist die Firma M. Es wird ein Mittel vertrieben, das einen immer positiven Reibwertgradienten verspricht. Dadurch kann es zu keiner instabilen Adhäsionssituation kommen und das Rad kann nicht rutschen. Deshalb kann kein Kurvenkreischen entstehen.

Empfehlung:

Ortsfeste Anlagen zur Reibwertkonditionierung stellen für die gegebenen Umstände bei der MOB eine geeignete Massnahme dar, um das Kurvenkreischen zu eliminieren. Das Reibwertniveau muss jedoch genau eingestellt und beibehalten werden können.

### **Fahrzeuggebundene Anlagen zur Reibwertkonditionierung**

Fahrzeuggebundene Anlagen haben den Vorteil, dass sie nur an den besonders kritischen Achsen bzw. Fahrzeugen installiert werden müssen. Nur zum Teil nachteilig ist der Unterhalt, denn die Fahrzeuge müssen ohnehin gewartet werden.

Traditionell sind fahrzeuggebundene Anlagen nur auf den Spurkranz ausgerichtet und die Mittel entsprechend auf hohe Gleiteigenschaften hin optimiert, was bei zu hohem Mittelauftrag zu Adhäsionsproblemen führt. Bei der VBZ werden spezielle Dosierfahrzeuge zum Auftrag von Reibwertvermittlern eingesetzt.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### 6.2.6 **Aufschweissungen von metallischen Materialien (siehe Punkt 1.3 und 1.5)**

Eine andere Variante gegen das Kurvenkreischen ist, an stark beanspruchten Stellen Metallbänder auf die Schienen zu schweißen, um den Verschleiss an Schienenmaterial zu vermindern. Als Nebeneffekt kann damit durch Veränderung des Reibwerts auch die Eliminierung des Kurvenkreischens erreicht werden.

So haben beispielsweise die VBZ Ende der 80er Jahre Aufschweissungen zur Verschleissverminderung eingesetzt. Als willkommene Begleiterscheinung stellte man einen Anti-Quietsch-Effekt fest [7].

Am Anfang wurden bei der VBZ Chromstahlbänder aufgeschweisst (teilweise schon auf die zu verlegenden Schienen vormontiert), die dann aber häufig abblätterten und so erhebliche Folgekosten verursachten. Negative Auswirkungen auf die Adhäsion hatte man keine und man schweisste in allen Steigungen. Heute verwendet man dünnere Bänder, die immer erst vor Ort montiert werden und dies nur an Stellen mit besonders grossem Verschleiss. Die Zielsetzung dieser Massnahmen ist die Verschleissminimierung. Soll primär das Kurvenkreischen vermieden werden, so setzt die VBZ ortsfeste Anlagen ein (siehe Abschnitt 6.2.5).

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### 6.2.7 **Spezielle Materialpaarungen (siehe Punkt 1.5)**

Im Vordergrund steht auch hier wieder die Verschleissminderung. Produkte, die effektiv gegen Kurvenkreischen entwickelt wurden, finden sich wenige. Man führte zum Beispiel Versuche mit einer speziellen Keramik durch, welche eine gute Standzeit aufwies, aber in einem sehr niedrigen Reibwert resultierte. Dieses Produkt ist daher im Fall der MOB, wo in den problematischen Kurven grosse Steigungen vorhanden sind, nicht geeignet.

Weiter wurden mit Hilfe von Laserschweissen verschiedene Metalle auf den Schienenkopf aufgebracht, die so eine metallische Bindung mit dem Schienenmaterial eingehen und die Schienenoberfläche erhärten. Die Reibwerte können auf diese Weise erhöht oder – je nach verwendetem Material - gesenkt werden. Allerdings stellte man keinen Einfluss auf das Kurvenkreischen fest, jedoch ergeben sich z.T. erhöhte Probleme mit der Dauerfestigkeit [18].

Es wurden Versuche mit verschiedensten Materialien im Labor durchgeführt, unter anderem mit Bronzeaufschweissungen der Firma N. Im Praxistest verschwand die aufgetragene Schicht jedoch nach wenigen Zügen wieder; ganz im Gegensatz zu den Laborergebnissen, wo aufgrund der immer selben Kontaktpartner Rad-Schiene ein Materialaustausch so stattfand, dass die Aufschweissungen eine lange Lebenszeit versprachen.

Andere Materialien wurden auch ausprobiert, z.B. Keramik, die durch Flamm-spritzen auf die Schiene aufgetragen wurde. Dieses Keramik weist eine gute Standfestigkeit auf, allerdings auch einen sehr niedrigen Reibwert. Wegen dem niedrigen Reibwert ist es für die MOB ungeeignet.

Aufgrund der neuartigen Materialien besitzt man keine Praxiserfahrung. Deshalb ist ein Einsatz dieser Materialien mit einem hohen Risiko verbunden. Zum Beispiel wurden bisher Umwelteinflüsse nicht untersucht. Im Allgemeinen verfolgt man die Auswirkungen auf das Kurvenquietschen durch neue Materialien in den letzten Jahren eher passiv.



Empfehlung: nicht weiterfolgen

## 6.3 Dämpfung der Schwingung

### 6.3.1 Innere Dämpfung und Anregung der Eigenmodi (siehe Punkt 2.1)

Damit die Anregung keine Reaktion hervorruft, kann man die angeregte Struktur (Rad) innerlich stark dämpfen oder dafür sorgen, dass keine Eigenmodi angeregt werden. Ein Beispiel für den ersten Fall sind die gummigelagerten Radreifen, wie sie üblicherweise bei Strassenbahnen zum Einsatz kommen.

Veränderte Eigenformen des Rades können durch einen anderen Radaufbau wie z.B. nicht axialsymmetrische Räder erreicht werden, jedoch sind die Unterschiede in der Lärmentwicklung im normalen Lauf gering. Daraus kann zwar nicht zwingend auch auf eine geringe Wirkung bei Kurvenkreischen abgeleitet werden, es wird jedoch vermutet [20].

Empfehlung: nicht weiterfolgen

### 6.3.2 Äussere Dämpfung (siehe Punkt 2.1 und 2.2)

Eine andere Variante, das Kurvenkreischen zu vermindern, ist die Dämpfung der entstandenen Schwingungen des Rades und der Schiene. Dazu kann man entweder das Rad oder die Schiene dämpfen. Am Rad kann man durch das Anbringen von Absorbern oder durch eine Beschichtung der Räder die Schwingungen verringern. Andererseits kann man Absorber am Schienensteg anbringen oder die Schiene in Dämmmaterial einbetten und damit versuchen, das Kurvenkreischen zu eliminieren.

#### Radbedämpfung (siehe Punkt 2.1)

Generell haben schon frühe Versuche [6] gezeigt, dass das Kurvenkreischen mit Schwingungstilgern effizient reduziert werden kann. Dort wird bereits auch ein allfälliges Problem mit den Absorbern diskutiert. Insbesondere soll hier auf das Problem hingewiesen werden, dass die Wirkungsweise darauf beruht, dass zusätzliche Massen über Materialien angekoppelt werden, die eine vergleichsweise hohe innere Dämpfung aufweisen, also im allgemeinen Gummi. Das heisst, es handelt sich um ein System von abgestimmten gedämpften Massen. Verstimmt sich dieses System z.B. durch Alterung des Gummi oder Verschleiss des Radreifens, kann sich der Dämpfungseffekt reduzieren.

Da die MOB bereits ihre Räder mit Absorbern ausstattet, wird nicht mehr auf unterschiedliche Bauarten und Formen eingegangen.

Eine Alternative zu den bereits im Einsatz stehenden Lamellenabsorbern der MOB wäre eine direkte Radbedämpfung. So eine Radbedämpfung wird beispielsweise von der Firma O angeboten. Dabei wird ein Polyurethangemisch auf den Radsteg gespritzt, welches mit dem Radsteg eine dauerhafte Bindung eingeht und das Rad geräuscharmer macht. Im Mittel wird so eine Reduktion des Schallpegels beim Kurvenkreischen um 10 dB(A) erreicht; für eine Eliminierung ist die Dämpfung ungenügend. Dem stehen allenfalls thermische Probleme durch das Klotzbremsen und die Unmöglichkeit der optische Beurteilung des Rades (Rissprüfung) als Nachteile gegenüber.

Empfehlung: bisheriges Konzept mit diskreten Absorbern konsequent weiterverfolgen

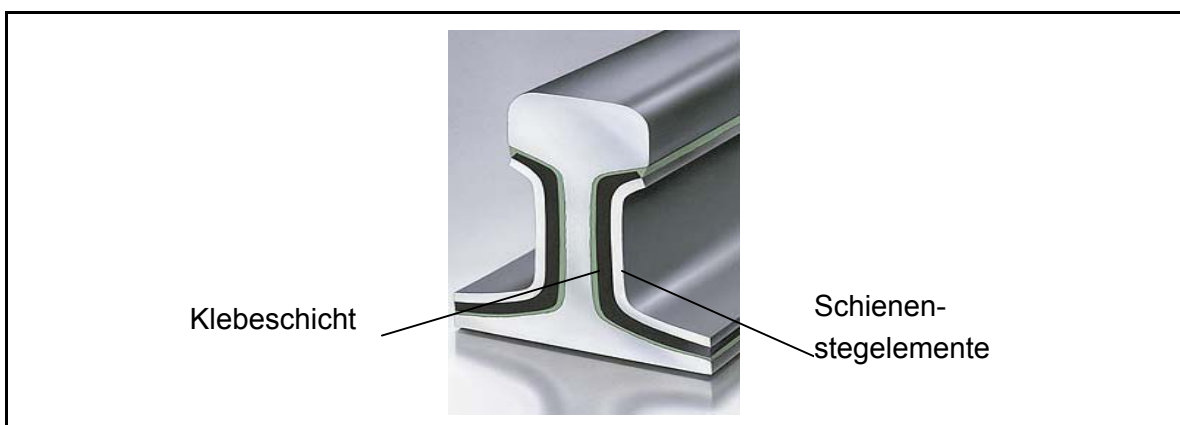
### **Schienendämpfung (siehe Punkt 2.2)**

Die Idee ist, durch Dämpfung der Schiene über den Rad-Schiene-Kontakt die Schwingungen der Radscheibe zu dämpfen. Bezüglich Rollgeräusch sind so teilweise Erfolge erzielt worden. Bezüglich Kurvenkreischen ist die Kopplung zu gering um eine nennenswerte Reduktion zu erzielen. Gerade beim Rad, das nur auf der Lauffläche berührt, kann abgesehen von der Reibdämpfung des Rad-Schiene-Kontakts keine Dämpfung von der Schiene aufs Rad wirken.

Für die Dämpfung der Schiene gibt es zwei Möglichkeiten: Die Schiene kann durch Anbringung von Absorbern oder durch Bedämpfung gedämmt werden. Als zweite Möglichkeit kann man die Schiene in einem mit Dämmmaterial gefüllten Gleisbett installieren.

Eine Möglichkeit ist, am Schienensteg eine Dämmschicht anzubringen, um die Schwingungen der Schiene zu dämpfen. Ein Verfahren ist das beidseitige Ankleben eines Deckblechs, das mit einer absorbierenden Schicht versehen ist (z.B. von der Firma P). Die Schienenstege lassen sich durch Klebtechnik einfach montieren (siehe **Abbildung 6-2**) und versprechen eine Reduzierung des Luftschallpegels von bis zu 12 dB. Ob damit das Kurvenquietschen ganz eliminiert werden kann, ist fraglich, da in erster Linie die Schallausbreitung der Schiene gedämpft wird.

Die Dämpfung von der Schiene auf das Rad dürfte aufgrund der kleinen Übertragungsfläche des Rad-Schiene-Kontakts zur Eliminierung des Kurvenkreischen nicht ausreichend sein. Versuchsweise wird dieses System von der Baselland Transport AG (BLT) eingesetzt. Detaillierte Testergebnisse von Referenzanlagen stehen aber noch nicht zur Verfügung.



**Abbildung 6-2:** Schienenstegdämpfungssystem (Bildquelle: Firma P)

Ein anderes System der Schienendämpfung wird von der Firma Q angeboten (siehe **Abbildung 6-3**). Bei diesem System werden die Gleisbefestigungen mit einer absorbierenden Zwischenlage ausgestattet. Dadurch wird die Körperschallausbreitung auf den Gleisoberbau verhindert. Dieses System ist besonders bei Brücken oder Tunnels hilfreich, da hier grosse Klangkörper von der Schiene entkoppelt werden. Mit dieser Methode wird aber das Kurvenkreischen nicht verhindert werden können. Auch bei diesem System kann

die Schallabstrahlung des Rades nicht ausreichend beeinflusst werden. Deshalb ist dieses System für den Einsatz bei der MOB nicht geeignet.



**Abbildung 6-3:** Schienendämpfungssystem (Bildquelle: Firma Q)

Eine andere Variante ist, die Schiene mit einem Vollverguss zu versehen, d. h. die ganze Schiene in eine Gummischicht einzugiessen. Die ganze Schiene wird durch einen Schienenunterguss durchgehend auf Gummimaterial abgestützt (siehe **Abbildung 6-4**). So ein System wird von der Firma O angeboten. Diese Technik wird besonders in Städten bei Strassenbahnen eingesetzt, wenn das Gleis in einer Fahrbahn verlegt ist. Durch dieses System werden Erschütterungen und Lärm reduziert.



**Abbildung 6-4:** Flüsterschiene (Bildquelle: Firma Q)

Bei einem Schottergleis - wie bei der MOB - würde dieses System bedeuten, dass zuerst eine Ummantelung um die Schienen gebaut werden muss. Dies ist nur mit grossem Aufwand zu bewerkstelligen. Diese Methode ist deshalb nur sinnvoll, wenn ein Gleis in einer Fahrbahn verlegt ist. Da der prinzipielle Aufbau bei Strassenbahnen üblich ist, es aber dort auch zu teilweise massivem Kurvenkreischen kommt, ist der Nutzen fraglich. Für die neuralgischen Kurven bei der MOB scheint dieses System deshalb nicht geeignet.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

## 6.4 Abschirmung der Ausbreitung (siehe Punkt 3)

Man kann Lärm auch durch so genannte sekundäre Schallschutzmassnahmen bekämpfen. So können lärmexponierte Gebäude durch die Errichtung von Schallschutzwänden an den Bahnstrecken geschützt werden. Eine Lärmreduzierung um 20 bis 30 dB, wie sie aber beim Kurvenkreischen nötig sein würde, ist durch Lärmschutzwände aber nicht realisierbar. Somit scheidet die Errichtung von Schallschutzwänden als Lösung zur Eliminierung des Kurvenkreischens aus.

Empfehlung: nicht weiterfolgen

## 7 Schlussfolgerungen

Gegeben sind die Rahmenbedingungen der MOB mit Meterspur, engen Radien, grossen Steigungen und konzentrierter Traktion. Ebenfalls ist gegeben, dass die erfolgreiche Sanierung der Fahrzeuge mit Radschallabsorbern weitergeführt wird. An neuralgischen Stellen soll mit weiteren Massnahmen das Kurvenkreischen vermieden werden. Eine vorgeschlagene Massnahme muss wirtschaftlich vertretbar sein und eine hohe Erfolgchance aufweisen.

Unter diesen Voraussetzungen entfallen viele Lösungsansätze und damit auch viele Massnahmen. Neben dem schon verfolgten Ansatz der Raddämpfung verbleibt einzig der Ansatz der Reibwertreduktion am Berührungspunkt des Rades mit der Schiene.

Als konkrete Massnahmen bieten sich Systeme an, die ortsfest Mittel auf die Lauffläche und/oder Innenflanke der Schiene aufbringen durch Sprühen oder durch Bohrungen in der Schiene. Verschiedene Produkte sind auf dem Markt, sowohl was Applikationseinrichtungen als auch was die aufzubringenden Mittel angeht. Zu beachten ist bei solchen Systemen aus Betriebssicht insbesondere die Betriebstauglichkeit unter allen Witterungsbedingungen und die gute Einstellbarkeit der Ober- und Untergrenze des Reibwertbereichs. Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit ist der Unterhaltsaufwand und der Mittelverbrauch entscheidend. Als positiver Nebeneffekt kann die Reduktion von Verschleiss an Rad und Schiene dazu beitragen, dass die zusätzlichen Unterhaltskosten zumindest teilweise durch reduzierte Wartung bzw. Unterhalt an Rollmaterial und Infrastruktur kompensiert werden.

## 8 Kommentierte Literatur

1. WEBER, H. H.: *Prof. Heumanns Arbeiten auf dem Gebiet der Spurführung im Zeichen der heutigen Rad/Schiene-Technik*. In: ZEV-Glas. Ann. 102 (1978) Nr. 7/8 Juli/August, S. 201-213

Der Querreibwert stellt sich als Funktion des Querschlupfes und der Vertikalkraft dar. Ausserdem ist der Querreibwert abhängig vom Anlaufwinkel. Je grösser der Anlaufwinkel wird, desto grösser wird der Querreibwert. Die Querbewegung des rollenden Rades in der Bogenfahrt entsteht nicht nur durch reines Gleiten, sondern auch durch elastisches „Ausweichen“ des Radsatzmaterials. Die Querreibung wird massgebend durch den Schienenzustand und den Temperaturen (kaltes Wetter: niedrige Querreibung, warmes Wetter: hohe Reibwerte) beeinflusst.

2. RAQUET, E.: *Zur Schallabstrahlung von Schienenfahrzeugen für den Fernverkehr und Möglichkeiten des aktiven Schallschutzes*. Bochum, 1985. – Firmenschrift Q-V-WB 734/85

Im Geschwindigkeitsbereich ab 160 km/h ist die dominierende Schallquelle eines Schienenfahrzeugs im Bereich des Rades zu finden. Im unteren Geschwindigkeitsbereich sind Rad und Schiene bezüglich ihrer Schwingintensität vergleichbar. Deshalb relativ geringe Pegelminderung der Rollgeräusche bei Nahverkehrsfahrzeugen durch Einsatz schallgedämpfter Räder im Vergleich zur Reduzierung bei Fahrzeugen für höhere Geschwindigkeiten. Die Radschallabstrahlung wird durch Eigenschwingungen in radialer als auch in axialer Richtung hervorgerufen. Eine mögliche Schalldämpfung kann durch den Einbau von Schwingungsabsorbern im Radkranzbereich erreicht werden.

3. THOMPSON, D.J.; JONES, C.J.C.; MONK-STEEL, A.D.; ALLEN, P. D.; HSU, S.S.; IWNICKI, S.D.: *Railway Noise: Curve Squeal Noise, Roughness Growth, Friction and Wear*. Rail Research UK.

Das Kurvenkreischen entsteht durch die Anregung des Rades im Bereich der Eigenmodi. Das abgestrahlte Geräusch wird meist durch eine Frequenz dominiert und tritt zwischen 250 Hz und 10 kHz auf. Um die genauen Ursachen und Zusammenhänge erforschen zu können, hat das Rail Research UK im Zusammenarbeit mit der University of Southampton und der Manchester Metropolitan University ein Versuchsmodell aufgebaut. Ergebnisse dieses Versuchsmodells liegen noch nicht vor. Diese Untersuchungen sind Teil des UIC Research Project C242.1 bzw. wird unter RRUk project A3 weitergeführt, geplanter Projektabschluss ist 2006.

4. TROMMER, G.; WALZ, M.: *Silence in den Kurven – Kasseler Tram fährt leise auf biologisch abbaubarem Schmierstoff*. In: EI – Eisenbahningenieur (53) 11/2002, S. 51-53.

Die Problematik des Kurvenkreischens bei der Kasseler Verkehrs-Gesellschaft (KVG) wurde durch den Einsatz eines neuen Schmierstoffs gelöst. Kurvenkreischen entsteht durch die Differenz des zurückzulegenden Weges der inneren und äusseren Schiene bei Starrachsfahrzeugen. Die Räder drehen innen durch und rutschen aussen. Hinzu kommt das Quergleiten der Räder. Dämmen, Entdröhnen und Absorbieren hat sich als nicht praktikabel oder nicht ausreichend erwiesen. Deshalb fokussierte sich die Suche auf einen Schmierstoff, der umweltverträglich ist, die Reibgeräusche reduziert, den Reibkoeffizienten nicht so vermindert, dass das Brems- und Beschleunigungsverhalten nicht mehr ausreichend sind, und sich situationsabhängig und mengenmässig dosieren lässt. Diesen Anforderungen entspricht das Produkt „Tram-Silence“ der Firma Fuchs Lubritech. Diese Schmierstoffpaste wird an zwei besonders kritischen Abschnitten im



Kasseler Strassenbahnnetz durch Schienenkopfbohrungen von unten auf die Schienenlauffläche gebracht.

5. HECHT, M.: *Kurvenkreischen – Ursachen und Gegenmassnahmen*. In: Schweizer Eisenbahn- Revue 3/1995, S. 103-108.

Das Kurvenkreischgeräusch zeichnet sich durch eine um 20 dB(A) über dem Rollgeräusch liegende Lautstärke und durch dominante, hochfrequente, schmalbandige Frequenzspitzen aus. Ein wesentlicher Grund für das Kurvenkreischen ist das Quergleiten des Rades auf der Schiene. Das Quergleiten entsteht, wenn ein Radsatz mit Anlaufwinkel durch einen Bogen läuft. Zusätzlich kann in engen Bogenradien noch ein Längsgleiten auftreten, wenn die Rollradiendifferenz nicht mehr ein reines Kegelrollen zulässt. Eine konventionelle Spurkranzschmierung kann keine Abhilfe schaffen, da das Schmiermittel auf der Aussen- statt auf der Innenschiene und zwischen Spurkranz und Schienenkopfflanke und nicht zwischen den Fahrflächen aufgetragen wird. Das Kurvenkreischen lässt sich durch primäre (ortsfeste Schmieranlagen, radial einstellende Fahrwerke) oder sekundäre Massnahmen (Entdröhnung der Schiene, Dämmung der Schiene, Radschallabsorber) bekämpfen. Die ortsfesten Schmieranlagen können auf der Innenschiene installiert werden, somit kann die Aussenschiene weiter mit einem hohen Reibwert für gute Traktions- und Bremsverhältnisse sorgen.

6. STAPPENBECK, H.: *Das Kurvengeräusch der Strassenbahn – Möglichkeiten zu seiner Unterdrückung*. In: Zeitung VDI Nr.6, Band 96 (1954), S. 171-175.

In engen und langsam befahrenen Kurven tritt bei Strassenbahnen oft ein Kurvenkreischen auf. Ursache ist nicht die Reibung zwischen der Schiene und den Spurkränzen der kurvenäusseren Räder, sondern die Anfachung bestimmter axialer Biegeschwindigkeiten der kurveninneren Räder. Das Geräusch besteht aus Einzeltönen in einem schmalen Frequenzband. Das Kurvengeräusch hängt von folgenden Einflussparametern ab: Kurvenhalbmesser, Radstand des Drehgestells, Fahrgeschwindigkeit, Radlast, Beschaffenheit der Schienenoberfläche und die Anwesenheit eines Schmierfilms auf der Schiene.

7. SPRINGMANN, R.: *Durchbruch an der Quietschfront – Zürcher Trams werden – endlich leiser*. In: Tages-Anzeiger, 25.01.1988, S. 19.

Die Zürcher Strassenbahnen verursachen in engen Bogenradien bei bestimmten Wetterbedingungen (Antrocknen nach Regen oder Tausalzbelag) Kurvenquietschen. Durch den Einsatz von Schmierautos wird ein neuartiges Schmiermittel der Firma Saerdna direkt auf die Schienenoberfläche aufgetragen. Aufgrund einer speziellen Zusammensetzung dieses Schmiermittels wird das Traktions- und Bremsverhalten nicht beeinträchtigt. Die Wirkung des Schmiermittels hängt je nach der Linienbelastung fünf bis sechs Stunden an. Ausserdem wird in besonders quietschanfälligen Kurven das Kurvenkreischen durch Aufschweissungen von Chromelektroden bekämpft. Diese Massnahmen sind aber sehr kostenintensiv.

8. BERGANDER, B.; BLENKLE, C.; MEINKE, P.; STEPHANIDES, J.: *Über die Stabilität enger Bogendurchfahrten von Eisenbahn-radsätzen*. In: EI – Eisenbahningenieur (52), 2/2001, S. 53-55.

Die Radsätze eines Drehgestellfahrzeugs laufen normalerweise durch einen engen Bogen im Freilauf. D. h., der vorlaufende Radsatz läuft mit dem Spurkranz an der Aussenschiene an und der nachlaufende Radsatz läuft frei ohne Anlauf durch den Bogen. Simulationen mit einem starren Radsatz haben ergeben, dass der vorlaufende bogenäussere Radsatz ein instabiles Laufverhalten aufweist. Wird das Simulationsmodell mit einer elastischen Achswelle ausgestattet, so verursachen Biege- und Torsionsschwin-

gungen durch den Wechsel von Einpunkt- und Zweipunktberührung das instabile Laufverhalten. So lassen sich in der Realität auch die sogenannten „Schlupfwellen“ auf der Innenschiene in engen Bögen erklären.

9. INTERNATIONAL RAILWAY JOURNAL: *Controlling Wheel Squeal On Rapid Transit Systems*. In: IRJ – International Railway Journal, October 2004, S.30-31.

Das Problem des Kurvenkreischens wurde bei den Japanischen Metro- und Vorortbahnlinien zuerst durch Einsatz von Wasser und Schmiermittel in neuralgischen engen Bögen versucht zu mindern. Dabei entstanden aber Verschmutzungs- und Traktionsprobleme. Deshalb wurde nach einer neuen Lösung gesucht. Der Einsatz von sogenannten „friction modifiers“ konnte das Kurvenkreischen mindern und gleichzeitig einen konstant hohen Reibwert von 0.35 gewährleisten. Der Lärmpegel sank von 72.6 dB auf 63.1 dB. Zudem wurde festgestellt, dass durch den Einsatz des „friction modifiers“ die Querkräfte in engen Bögen um bis zu 50% abnahmen. Untersuchungen haben ergeben, dass 85% des Kurvenkreischgeräuschs durch den sogenannten Stick-Slip-Effekt entsteht. Das Lärminderungspotential liegt zwischen 10 und 15 dB, teilweise bis zu 20 dB.

10. ENGEL, B.; BECK, H.-P.; ALDERS, J.: *Verschleissreduzierende Radschlupfregelung mit hoher Kraftschlussausnutzung*. In: eb – Elektrische Bahnen 96, (1998) 6, S.201-209.

Durch hohe Zug- und Bremskräfte besteht die Gefahr, dass die Radsätze von Lokomotiven schleudern oder gleiten. Dabei kann es zu Slip-Stick-Schwingungen kommen, die auch eine Ursache für das Kurvenkreischen sein können. Durch eine aktive Antriebsregelung können diese Slip-Stick-Schwingungen reduziert werden.

11. CERVELLO, S.: *Syope promises quieter running*. In: Railway Gazette International, September 2002, S.571-575.

Das Syope-System besteht aus einem viskoelastischen Polymermaterial, das auf den Radsteg geklebt wird. Auf diese viskoelastische Polymerschicht wird zum Schutz eine Aluminium- oder Stahlplatte montiert. Das Syope-System verspricht deutliche Lärmreduzierungen und erhöht die Zuverlässigkeit durch den zusätzlichen Schutz der Radoberfläche. Dieses System erreichte im Labor Lärmreduzierungen bei Spitzen bis zu 30 dB. Auch wurden Versuche mit dem italienischen Hochgeschwindigkeitszug ETR500 durchgeführt und dabei im Zusammenspiel mit Drehgestell-Verschaltungen Lärmreduzierungen bis zu 8 dB erreicht.

12. BLASER, U.; SOLLBERGER H.-U.; KRUMMENACHER, J.; ROSA, E.; TREFZER, K.: *Schotterloser Gleisbau – Lärmdämpfung dank elastischer Lagerung der Gleistragplatte*. In: Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 47, 17. November 1994, S.973-978.

Bei den städtischen Verkehrsbetrieben Bern (SVB) und den Basler Verkehrsbetrieben (BVB) wurden 6 Teststrecken mit einer Länge von insgesamt 1150 m mit einem Oberbau nach dem Feder-Masse-System ausgerüstet. Damit wird insbesondere die Körperschallübertragung durch das Gleisbett auf angrenzende Gebäude vermindert werden. Dabei wurden oberhalb 45 Hz Immissionsreduktionen von mindestens 12 dB erreicht.

13. NELSON, J. T.: *Transit Cooperative Research Program Report 23: Wheel/Rail Noise Control Manual*. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., 1997, S.54-65.

Es gibt drei mögliche Gründe, wie das Kurvenkreischen entstehen kann: Der longitudinale Stick-Slip-Effekt, der Spurkranzanlauf und der Stick-Slip-Effekt aufgrund des Querschlupfes bei einem Anlaufwinkel ungleich Null. Der longitudinale Stick-Slip-Effekt

kann aber nicht für das Kurvenkreischen verantwortlich sein, weil das Kurvenkreischen auch bei Einzelradfahrwerken auftritt und ausserdem die Rollradiendifferenz und das elastische Torsionsverhalten des Radsatzes die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des inneren und äusseren Rades ausgleichen können. Auch der Spurkranz-anlauf kann nicht der ausschlaggebende Grund für das Kurvenkreischen sein, da eine Spurkranz-schmierung keine Wirkung auf das Kurvenkreischen hat und ausserdem das innere Rad als eigentliche Lärmquelle identifiziert worden ist. Also ist der Querschleif der ausschlaggebende Grund für das Kurvenkreischen. Durch die Stellung des Radsatzes im Freilauf kommt es beim vorlaufenden Radsatz zu einer Anlaufwinkelvergrösserung und beim nachlaufenden Radsatz zu einer Verringerung. Dadurch entsteht der Querschleif, der wiederum das Kurvenkreischen verursacht.

14. RUDD, M. J.: *Wheel/Rail Noise - Part II: Wheel Squeal* In: Journal of Sound and Vibration (1976) 46(3), 381 - 394.

Er entwickelt ein theoretisches Modell für die Stick-Slip Bewegung. Ausgangspunkt ist die Reibwertkurve in Abhängigkeit vom Kriechen also der Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung. Während bei der Haftreibung der Reibwert stetig zunimmt so reduziert sich der Gleitreibwert bei höheren Relativgeschwindigkeiten. Betrachtet man die Ableitung der mechanischen Impedanz (anregende Kraft / erzeugte Geschwindigkeit) wird diese beim Übergang zur Gleitreibung negativ. Daraus leitet sich eine selbst erregende Schwingung ab, da die innere Dämpfung bei Stahl sehr gering ist. Abhängig von Fahrgeschwindigkeit und Bogenradius leitet er den nötigen Verlustfaktor ab, um Kurvenkreischen zu eliminieren (es wird ein Wert von 20% angeführt, welcher ca. 1000 mal über dem von Stahl liegt).

15. HARSY, G.: *Fahrwerke mit gesteuerten Radsätzen*: In: ZEV + DET Glas. Ann. 119 (1995) Nr 9/10 September/Okttober 335 - 349.

Genereller Abriss über den Entwurf von Fahrwerken, vom Machbarkeitsraum bis hin zu Life-Cycle-Costs.

16. MÜLLER, R.: *Die Problematik der Berührgeometrie Rad/Schiene*: In: Schienenfahrzeugtagung „Aktuelle Probleme bei der Konstruktion und beim Betrieb von Schienenfahrzeugen“ 8./9. Februar 1996, Berichte und Informationen 2/96 Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)

Fahrwerke und deren Verhalten in Bögen: Auswirkungen der Gleisparametrierung, Profile auf Kräfte und Verschleiss.

17. IRJ: *Controlling Wheel Squeal On Rapid Transit Systems*: In: International Railway Journal October 2004, 30 - 31

Erfahrungsbericht bei der Anwendung von „Keltrack“ bei der Tokyoter Arawaka LRT, Pittsburg Port Authority und Ney York City Transit;  
Beidseitige Schienenschmierung reduziert spektral doppelt soviel wie einseitige;  
Selbst in Steigungen von 80‰ ergaben sich keine Probleme mit Traktion bzw. Bremsen.

18. HIENSCH, M.: *Two-material rail COMBATS rolling contact fatigue*. In: Railway Gazette international September 2003

Erfahrungsbericht bei der Anwendung von Auftragschweissungen mit speziellen Materialien (DUROC) mit dem Fokus, die Rollkontaktermüdung zu verbessern. Aufgrund der Basismaterialien und Versuchsergebnissen im Labor zur Reibwertcharakteristik bestand die Vermutung, dass dies auch positive Effekte auf das Kurvenkreischen haben

könnte die sich aber nicht bestätigen; Versuchsort: Eisenerzlinie Schweden in der Nähe von Lulea und bei der Pariser Metro RATP Porte Dorée.

19. SAUTER, K.: *Die Stadtbahn wird leiser*, In: UMWELTPRAXIS Nr 13 / Juli 1997 61 – 62

Fahrzeug, Fahrwerk und Konzept des COBRA – Tram der VBZ.

20. RAISON, J.; VIET, J-J.; MÜLLER, R.: *Die Paarung Rad/Verbundstoffsohle - Reduzierung des Rollgeräusches*; In: ZEVrail Glasers Annalen 128 (2004) 10 Oktober, 474 - 497

Entwicklungen im Bereich des Rad-Schiene-Kontakts insbesondere der Einsatz von Scheibenbremsen und Kunststoff- bzw. – Verbundstoff-Bremsklötzen reduzieren die Schallemissionen.

21. HECHT M.; *Kurvenkreischen – Ursachen und Gegenmassnahmen*; In: Schweizer Eisenbahn-Revue 3/1995, 103 – 108

Versuche mit Dämmung, Entdröhnung und Wässerung an der Schiene der Zahnstangenstrecke bei der Furka-Oberalp-Bahn. Das Rad ist an sich das schwächer gedämpfte Bauteil, daher sind Massnahmen dort effektiver als an der Schiene. Dämmung ist deutlich schlechter als Dämpfung. Durch das Vorhandensein einzelner sehr hoher Frequenzspitzen entsteht subjektiv der Eindruck Schienenentdröhnung sei nicht erfolgreich, selbst wenn der Gesamtpegel um 10dB reduziert wurde.