Technische Universität Berlin

RCB rail center Bützow

Forschungsvorhaben "Leiser Verkehr"

Abschlussbericht

RCB :

Arbeitspaket Nr. 1:	**Durchführung von lauftechnischen Versuchsfahrten Zulassung der Maschine RC 01 durch das EBA**
Arbeitspaket Nr. 2:	**Betriebserprobung**
Arbeitspaket Nr. 3:	**Verfahrenszulassung des Schleifsystems durch die DB AG, Einstell- und Arbeitsgenehmigung für RC 01**
Arbeitspaket Nr. 4:	**Durchführung eines Pilotprojekts**

TU Berlin :

Arbeitspaket Nr. 3 :	**Erstellung des Untersuchungs- und Messprogramms « Akustik » und « Schienenoberfläche »**
Arbeitspaket Nr. 4 :	**Durchführung der Schleiffahrt und Akustikmessungen**
Arbeitspaket Nr. 5 :	**Optimierung der Schleifstrategie**
Arbeitspaket Nr. 6 :	**Erstellung LCC-Programm**
Arbeitspaket Nr. 7 :	**LCC-Berechnung**

Forschungsvorhaben „Leiser Verkehr“

Bericht 203/07
vom August 2007

Entwicklung und Umsetzung des neuen, optimierten Schleifverfahrens HSG (High Speed Grinding) für Schienen

Arbeitspaket Nr. 1: **Durchführung von lauftechnischen Versuchsfahrten Zulassung der Maschine RC 01 durch das EBA**

Arbeitspaket Nr. 2: **Betriebserprobung**

Arbeitspaket Nr. 3: **Verfahrenszulassung des Schleifsystems durch die DB AG, Einstell- und Arbeitsgenehmigung für RC 01**

Arbeitspaket Nr. 4: **Durchführung eines Pilotprojekts**

mit Förderung durch das Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

Bearbeiter:
Dipl.-Kfm. Marcel Taubert
Dr.-Ing. Konstantin v. Diest

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung (Taubert) 3
1.1 Überblick über vorhandene Technologien zur Schienenbearbeitung 3
1.2 Anlass der Entwicklung einer neuen Technologie 9

2. Arbeitspaket 1: Durchführung von lauftechnischen Versuchsfahrten mit dem Ziel der Zulassung der Maschine RC 01 durch das EBA 11
2.1 Problemstellung 11
2.2 Lösungsansatz und Durchführung 11
2.3 Ergebnisse 12

3. Arbeitspaket 2: Betriebserprobung 13
3.1 Problemstellung 13
3.2 Lösungsansatz und Durchführung 13
3.3 Ergebnisse 14

4. Arbeitspaket 3: Verfahrenszulassung des Schleifsystems durch die DB AG, Erhalt einer Einstell- und Arbeitsgenehmigung für RC 01 16
4.1 Problemstellung 16
4.2 Lösungsansatz und Durchführung 16
4.3 Ergebnisse 18

5. Arbeitspaket 4: Durchführung eines Pilotprojekts 19
5.1 Problemstellung 19
5.2 Lösungsansatz und Durchführung 19
5.3 Ergebnisse 20

6. Abschluß 22

1. Einleitung

Die Herausforderungen bei der Instandhaltung des Rad-Schiene-Systems haben sich in den letzten 15 Jahren grundlegend verändert. Während noch bis in die neunziger Jahre die Beherrschung des *Verschleißes* an Rad und Schiene im Vordergrund der Entwicklung stand, ist an dessen Stelle heute die Beseitigung von *Rollkontaktermüdungsschäden* und Oberflächenunebenheiten, wie *Riffel* und *Schlupfwellen* getreten.

Diese Entwicklung führt zur Notwendigkeit neuer Instrumente der Schienenpflege. Während es lange Zeit galt, den Verschleiß an Rad und Schiene durch Optimierung des Grundmaterials zu verhindern, so fehlt genau dieser Verschleiß heute, wenn durch Rollkontaktermüdung entstehende Schienenfehler sich schneller als der natürliche Materialabrieb entwickeln. Künftige Instrumente zur Schienenpflege und zur Verlängerung der Schienenlebensdauer müssen es ermöglichen, Schienenfehler durch künstlichen Verschleiß gezielt zu kontrollieren. Daneben führt ein kontinuierlich ansteigendes Verkehrsaufkommen zu betrieblichen Herausforderungen bei der Planung und Eintaktung von Instandhaltungsmaßnahmen.

1.1 Überblick über vorhandene Technologien zur Schienenbearbeitung

1.1.1. Überblick

In den letzten Jahrzehnten haben sich unterschiedliche Verfahren zur Schienenbearbeitung etabliert. Heute werden folgende Technologien eingesetzt:

- Schleifen,
- Hobeln und
- Fräsen

Das Schleifen stellt weltweit die am weitesten verbreitete Technologie dar. Hierbei wird unterschieden zwischen Verfahren mit starren Rutschersteinen, oszillierenden Rutschersteinen und rotierenden Schleifscheiben. Die Arbeitsgeschwindigkeiten beim maschinellen Schienenschleifen liegen zwischen 5 – 12 km/h (rotierende Schleifscheiben) und 40 km/h (starre Rutschersteine).

Beim Hobeln handelt es sich um ein spanabhebendes Arbeitsverfahren, bei dem der Schienenwerkstoff in mehreren Überfahrten von geraden und profilierten Hobelplatten aus Hartmetall abgetragen wird. Das optimale Einsatzspektrum des Hobelns liegt in der Bearbeitung stark geschädigter Schienen, der Beseitigung von Spurverengungen sowie in der Entgratung von Schienen in engen Bögen und in Rangieranlagen. Eine vollständige Reprofilierung der Schiene erfordert je nach Schädigungszustand fünf bis zehn Schnitte mit einer Geschwindigkeit von jeweils vier bis fünf km/h bei Abträgen bis zu mehreren Millimetern.

Analog dem Hobeln handelt es sich auch beim Fräsen um ein spanabhebendes Verfahren. Die Fräsplatten sind dabei auf einem rotierenden Fräsrad angeordnet, das längs der Schiene geführt wird. Mit Fräsmaschinen lassen sich in einer Überfahrt Abträge von einigen Zehntel-Millimetern bis

in den Millimeterbereich erzielen. Durch eine der Schienenkopfkontur angepasste Anordnung der Fräsplatten wird das Querprofil der Schiene analog der Sollgeometrie in einer Überfahrt hergestellt. Aufgrund des technologisch bedingten Mindestabtrages von ca. 0,2 mm pro Fräsrad und der geringen Arbeitsgeschwindigkeit von ein bis zwei km/h liegt das optimale Einsatzspektrum der Frästechnik in der korrigierenden Schienenbearbeitung.

1.1.2. Schleifen

Beim Schienenschleifen werden zwei Arbeitsverfahren mit unterschiedlichen Einsatzspektren unterschieden:

- Schleifen mit Rutschersteinen (starr oder oszillierend) und
- Schleifen mit rotierenden Schleifscheiben.

Schleifmaschinen mit Rutschersteinen

Rutschersteine sind prismatische Schleifkörper mit rechteckigem Querschnitt, die in senkrechter Richtung auf die Fahrfläche der Schiene gepresst werden. Die Form der Schleifkörper passt sich dabei innerhalb kurzer Zeit der konvexen Form des Schienenkopfes an, so dass die Fahrfläche vollständig bestrichen wird. Da die Schleifkörper nicht um die Schienenlängsachse geneigt werden können, ist eine Bearbeitung des Querprofils nicht möglich.

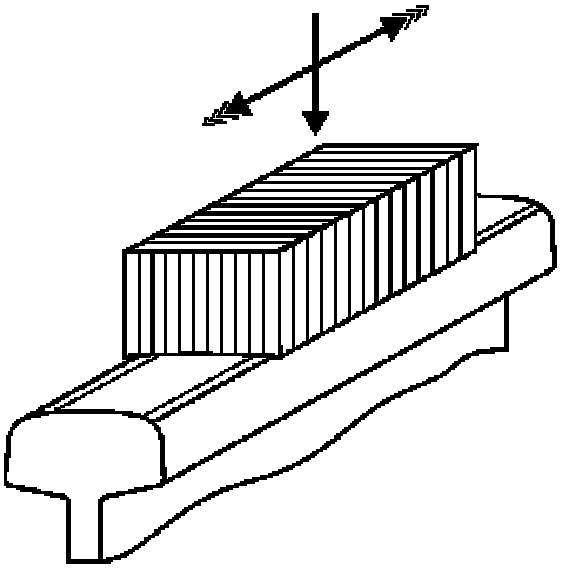


Abb. 1: Rutscherstein, schematische Darstellung

Rutscherstei nmaschinen eignen sich nicht zur Reprofilierung von Schienen, jedoch können Hindernisse wie Bahnübergänge, Schienenkontakte und Führungsschienen ungehindert schleifend durchfahren werden. Zur Anwendung kommen Arbeitsverfahren mit

- starren Rutschersteinen und mit
- in Schienenlängsrichtung oszillierenden Rutschersteinen.

Maschinen mit fünf hintereinander geschalteten Schleifaggregaten zu je sechs Schleifsteinen erreichen in einer Überfahrt bei einer Geschwindigkeit von 1 - 2 km/h einen Materialabtrag von 0,05 - 0,07 mm.

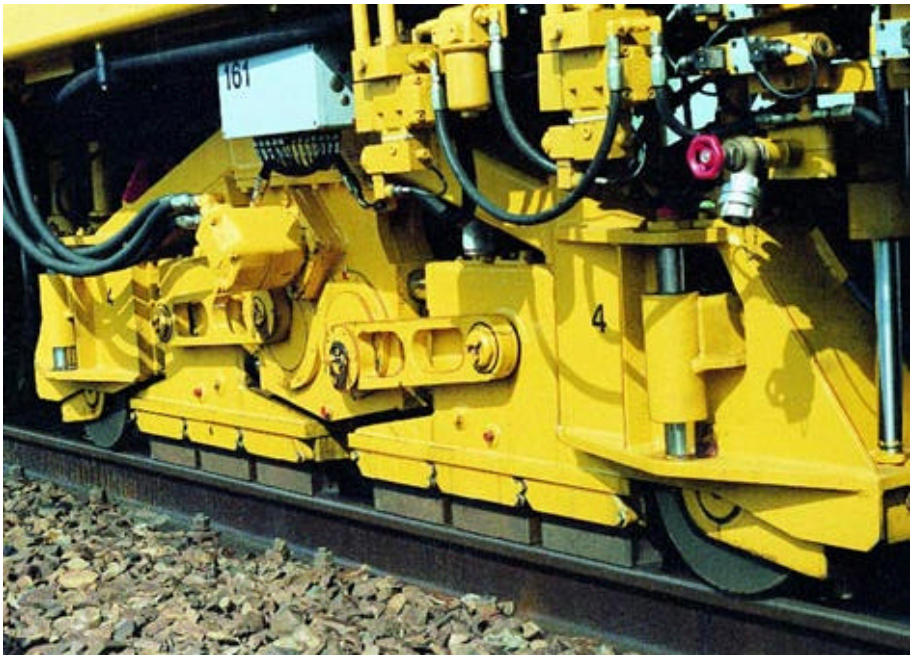


Abb. 2: Arbeitsaggregat mit oszillierenden Rutschersteinen

Schleifmaschinen mit rotierenden Schleifscheiben

Rotierende Schleifscheiben sind zylinderförmige oder kegelstumpfförmige, angetriebene Schleifkörper, die um eine (i. d. R. schwenkbare) Achse drehen. Je nach eingesetztem Verfahren kann dabei entweder die Stirnfläche (Topfscheibe, Tellerscheibe) oder die Mantelfläche (Schleifrad, auch Diskusscheibe) für die Materialbearbeitung genutzt werden.

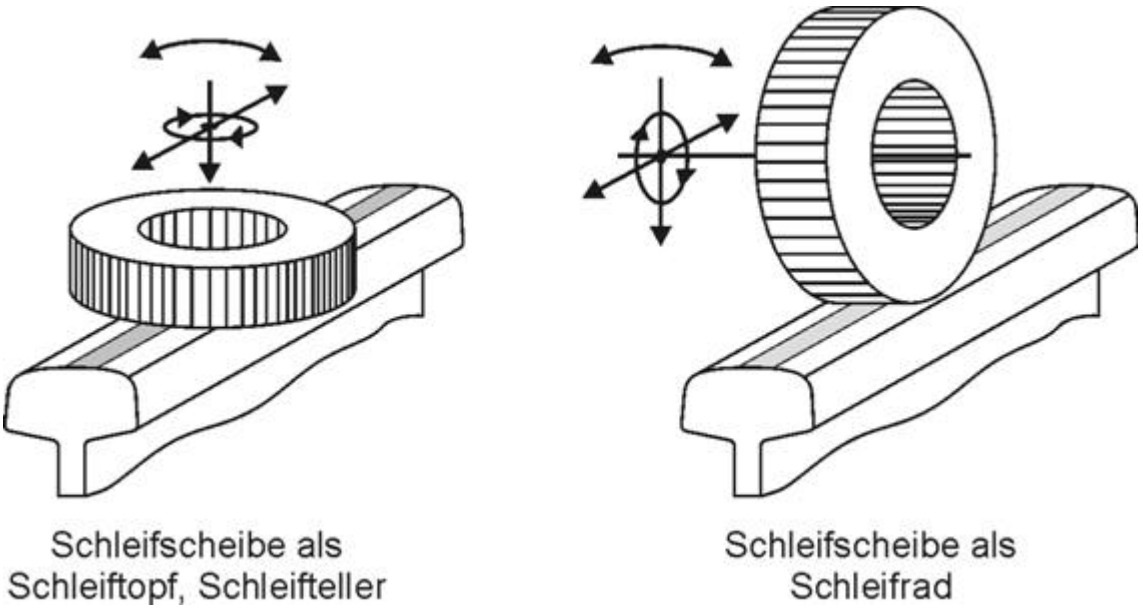


Abb. 3: Rotierende Schleifscheiben, schematische Darstellung

Eine vollständige schleiftechnische Bearbeitung des Schienenkopfes im Längs- und Querprofil (Reprofilierung) ist nur mit Topf und Tellerscheiben möglich. Die Technologie wurde in den letzten 50 Jahren kontinuierlich weiter entwickelt und ist im Vollbahnbereich international das am weitesten verbreitete Bearbeitungsverfahren.
Die im Vergleich zu Rutschersteinen höhere Reibleistung rotierender Schleifscheiben führt zu einem entsprechend höheren Materialabtrag.
Zur Reprofilierung des Schienenkopfes können die Schleifaggregate in verschiedenen Winkeln von etwa –90° (an der Fahrkante) bis +45° (an der Außenkante) um die Schienenlängsachse geschwenkt werden.

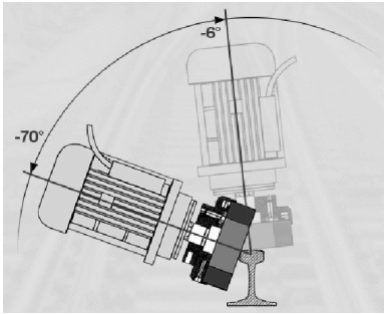


Abb. 4: Schleifmotor (schematische Darstellung)

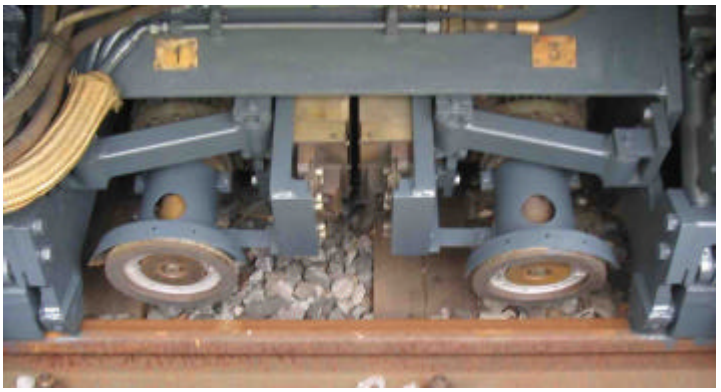


Abb. 5: Arbeitsaggregat einer Schleifmaschine, hier ohne Abdeckung

Der Materialabtrag und die Fertigmeterleistung hängen beim Schleifen mit rotierenden Schleifscheiben neben dem vorgefundenen Schienenzustand und der Länge und Verteilung der Arbeits-

abschnitte wesentlich von der Maschinenkonfiguration (Anzahl und Leistung der Schleifmotore) ab. Schleiffahrten werden als Pendelfahrten im Zweirichtungsbetrieb durchgeführt. Kleine Schleifmaschinen mit wenigen Motoren benötigen mehr Überfahrten als Großmaschinen und erbringen eine entsprechend geringere Fertigmeterleistung. Bei kleinen Abschnittslängen, insbesondere beim Schleifen von Weichen, kommen aufgrund der geringeren Maschinenlänge und der besseren Wendigkeit bevorzugt Maschinen mit 16 bis 24 Schleifscheiben zum Einsatz. Dabei wird eine Fertigmeterleistung von maximal 1.000 m/h erreicht. Zum Schleifen auf langen Streckenabschnitten kommen Großmaschinen mit bis zu 96 Schleifmotoren zur Anwendung, die eine vollständige Instandsetzung des Längs- und Querprofils in einer Überfahrt ermöglichen (One-Pass-Grinding). In Frankreich wird das One-Pass-Grinding auf Hochgeschwindigkeitsstrecken systematisch eingesetzt. In einer Überfahrt mit 8 km/h werden bei einem Materialabtrag von 0,3 mm bis zu 40 km Fertigschliff in einer Schicht erbracht.

1.1.3. Hobeln

Das Hobeln ist ein spanabhebendes Bearbeitungsverfahren, das sowohl bei der stationären Schienenbearbeitung in Aufarbeitungswerken als auch bei der mobilen Schienenbearbeitung im Gleis eingesetzt wird. Dabei werden der Schienenkopfkontur angepasste Hobelplatten in verschiedenen Winkelstellungen hydraulisch auf die Schiene gepresst.

Abb. 6: Arbeitsaggregat einer Hobelmaschine

Die Arbeitsgeschwindigkeit beim Hobeln beträgt je Schnitt etwa vier bis fünf km/h. Die Fertigmeterleistung hängt von der Anzahl Schnitte und der Arbeitsabschnittslänge ab. Für die vollständige Reprofilierung des Schienenkopfes beträgt die Fertigmeterleistung etwa 220 m/h, für die Reprofilierung der Fahrkante (z.B. Spurberichtigung oder Entgratung in engen Bögen) bis zu 400 m/h.

Die Hobelwerkzeuge benötigen einen Arbeitsraum, der den Ausbau von Gleisschaltmitteln und anderen Hindernissen wie Bohlenüberwegen, Führungsschienen o.ä. notwendig machen kann.

1.1.4. Fräsen

Analog dem Hobeln handelt es sich auch beim Fräsen um ein spanabhebendes Arbeitsverfahren, das sowohl bei der stationären Schienenaufarbeitung als auch bei der mobilen Schienenbearbeitung mit gleisfahrbaren Maschinen eingesetzt wird. Beim Fräsen erfolgt die Bearbeitung des Schienenkopfes durch ein rotierendes Fräsrad, das – bestückt mit einer Vielzahl einzelner Fräsmesser – hydraulisch auf die Schiene gepresst wird. Beim Fräsen entstehen durch die Führung der Fräsplatten über die Schiene Facetten und eine schuppenartige Struktur auf der Schienenoberfläche, die durch ein nachlaufendes Schleifrad oder durch eine nachlaufende Bearbeitung mit oszillierenden Rutschersteinen beseitigt werden.

Abb. 7: Arbeitsaggregate einer Schienenfräse

Mit Fräsen wird in einer Überfahrt ein Abtrag von 0,3 mm bis zu 2,5 mm an der Fahrkante erzielt. Fräsen arbeiten im Einrichtungsbetrieb. Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt abhängig von dem vorgefundenen Schienenzustand 0,6 bis 1,5 km/h. Bei einer mittleren Fertigmeterleistung zwischen 450 und 650 m/h ist das Fräsen bei hohen Materialabträgen den meisten anderen Arbeitsverfahren überlegen. Bei Abträgen von wenigen Zehntelmillimetern (präventive Schienenbearbeitung) lassen sich hingegen mit Schleifmaschinen erheblich höhere Fertigmeterleistungen erzielen.

Für alle heutigen Schienenbearbeitungsverfahren gilt - aufgrund ihrer relativ geringen Arbeitsgeschwindigkeit - die Notwendigkeit von *Streckensperrungen*. Damit führt jede Instandhaltungs- und Pflegemaßnahme von Schienen grundsätzlich zu betrieblichen Einschränkungen und Verzögerungen im Regelfahrplan. Daneben entstehen Zusatzkosten durch Sicherung, Zugumleitungen und die Demontage/Montage von Gleisschaltmitteln.

1.2 Prinzip einer neuen Technologie

Das Projekt High Speed Grinding verfolgt den Ansatz, erstmalig präventive Schieneninstandhaltung ohne betriebliche Einschränkungen durchzuführen. Darüber hinaus sollen die Kosten im Vergleich zu heutigen Instandhaltungsstrategien minimiert werden.

Das patentierte Verfahren High Speed Grinding basiert auf dem Prinzip des Umfangschleifens, bei dem in diesem Fall die einzelnen Schleifkörper unter einem bestimmen Winkel über die Schienen gezogen werden. Ein separater Antrieb der Schleifkörper ist hierbei nicht notwendig. Die längsorientierte Ausprägung der Berührungslinie der Schleifkörper führt zur Beseitigung von Riffelbergen und einer kontinuierlichen Verbesserung des Schienenlängsprofils. Das Prinzip des passiven Umfangsschleifens führt zu einer Adaption des Schleifkörpers an das Schienenquerprofil, eine gezielte Reprofilierung ist somit nicht möglich, vielmehr wird ein vorhandenes Profil konserviert.

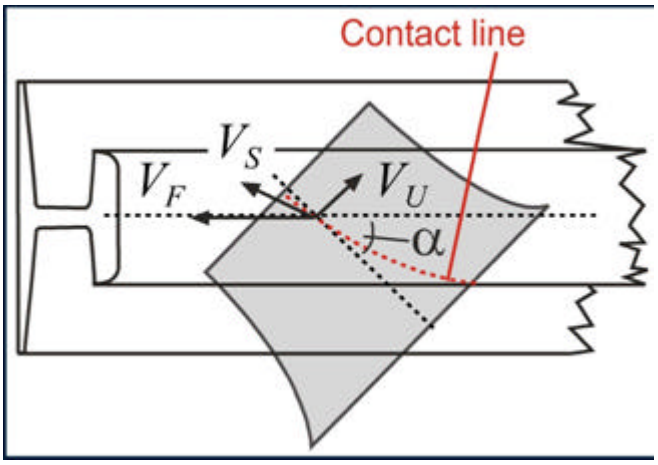


Abb. 8: Prinzip des Hochgeschwindigkeitsschleifens

Der Verzicht auf angetriebene Schleifsteine ermöglicht das Erreichen hoher Arbeitsgeschwindigkeiten, die Geometrie der Schleifkörper ermöglicht die Bearbeitung der Schienen ohne notwendigen Ausbau von Gleisschaltmitteln oder ähnlichem. Dies ist Grundvoraussetzung für einen betriebsfreundlichen Einsatz des Systems als regelmäßiges Instrument der Schienenpflege.

Ziel des Schleifverfahrens ist der gleichmäßige Materialabtrag auf der Schiene zur Beseitigung von ermüdeten Materialschichten an der Schienenoberfläche und zur Verbesserung der Längswelligkeit. Bei regelmäßigem Einsatz des Systems werden Schienenfehler bereits in der Entstehung unterdrückt, gleichzeitig führt eine optimale Schienenoberfläche zu einer erheblichen Verringerung der dynamischen Kräfte des Rad-Schiene Systems. Dies wiederum impliziert weniger Schienenlärm und weniger Belastung und Instandhaltung des gesamten Fahrwegs.

Erstmals umgesetzt wurde High Speed Grinding im Schleiffahrzeug RC 01. Dieses neu entwickelte Fahrzeug schleift gleichzeitig mit 48 Schleifsteinen pro Schiene, aufgeteilt auf 4 Schleifaggregate, welche durch ein revolverartiges Wechselsystem bis zu 3 mal während der Arbeitsfahrt ausgetauscht werden können. Erst nach Verschleiß aller vier Schleifreihen ist ein Halt notwendig.

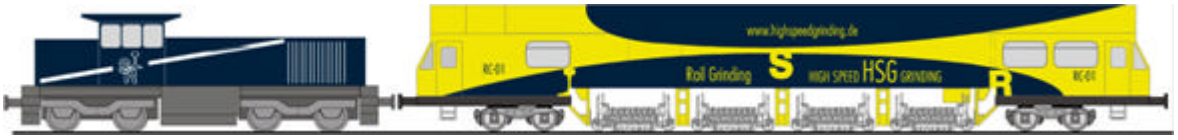


Abb. 9: Schleifwagen RC01

Das Design des gesamten System wurde auf vollständige Profilfreiheit ausgelegt und ermöglicht somit hohe Arbeitsgeschwindigkeiten ohne den vorherigen Ausbau von Gleisschaltmitteln, Bahnübergängen o.ä..

2. Arbeitspaket 1: Durchführung von lauftechnischen Versuchsfahrten mit dem Ziel der Zulassung der Maschine RC 01 durch das EBA

2.1 Problemstellung

Der für den Schienenschliff wichtigste Prozessparameter ist die Anpresskraft von Schleifkörpern auf die Schiene. Je nach verwendetem Schleifmittel wird über die Anpresskraft der Abtrag wie auch der Schleifmittelverschleiß gesteuert. Durch das Andrücken der Schleifkörper an die Schiene wird aufgrund von Reaktionskräften jedoch gleichzeitig das Fahrwerk entlastet. Angesichts der großen Anzahl von gleichzeitig angepressten Schleifkörpern ist die Entlastung so signifikant, dass die Räder der ca. 5 t schweren Schleifaggregate fast ohne Aufstellkraft sind. Deshalb werden die Schleifaggregate hydraulisch mit zusätzlich 50 kN gegenüber dem Basisfahrzeugs angepresst, wodurch wiederum dessen Drehgestelle entlastet werden. Diese Entlastung ist erheblich, zumal die Masse des Basisfahrzeugs durch das Aufgleisen der Schleifaggregate in die Schleifstellung bereits um ca. 20 t reduziert ist. Das in Transportstellung zunächst ca. 75 t schwere Fahrzeug belastet seine Drehgestelle im Schleifbetrieb nur noch mit knapp 40 t. Die für die Entgleisungssicherheit und das sichere Laufverhalten notwendige Aufstellkraft könnte also zu gering sein. Vor dem Hintergrund der hohen Arbeitsgeschwindigkeit von 80 km/h verlangte deshalb das Eisenbahnbundesamt (EBA) den Nachweis von Laufverhalten und Entgleisungssicherheit nach dem *ausführlichen Verfahren*.

2.2 Lösungsansatz und Durchführung

Der Nachweis der Lauf- und Entgleisungssicherheit wird gemäß UIC 518 bzw. ERRI B55 /RP8 durch vom EBA zugelassene Prüfstellen erbracht. Beim ausführlichen Verfahren wird die Laufsicherheit durch Messung von Vertikal- und Querkräften während der Fahrt direkt am Rad durchgeführt. Hierzu müssen wiederholte Fahrten in all Konstellationen, also in *Transportstellung* (Schleifaggregate angehoben), *Arbeitsstellung* (Schleifaggregate abgesenkt aber nicht schleifend) und *Schleifstellung* (Schleifaggregate abgesenkt und schleifend) durchgeführt werden.

Im Fall des Schleifwagens RC01 bestand die Schwierigkeit darin, dass die Infrastrukturbetreiber Schleiffahrten aufgrund der fehlenden Verfahrenszulassung nicht gestatteten, diese aber nur nach vollständiger EBA-Zulassung, also nach Nachweis der Laufsicherheit in Schleifstellung erteilt wird. Eine Lösung wurde schließlich durch Versuche auf Gleisen der ÖBB erreicht, die sich bereit erklärten, die Fahrten in Schleifstellung auf gewissen Nebengleisen zu dulden, so dass die erforderlichen Daten gemessen und ausgewertet werden konnten.

Der Nachweis der Entgleisungssicherheit erfolgt im Stand auf einem Verwindungsprüfstand, bzw. auf einem verwundenen Gleisbogen mit sehr geringer Geschwindigkeit und ohne Schleifen. Dieser Test konnte deshalb bei der Prüfstelle der DB in Minden durchgeführt werden.

Die angegebenen Prüfungen konnten jedoch nur für das Basisfahrzeug mit regulären Achssätzen durchgeführt werden, nicht jedoch für die **Schleifaggregate**. Dies scheitert an der fehlenden Verfügbarkeit von entsprechend kleinen Messradsätzen bzw. bei Messung von Achslagerquerkräften an den konstruktiven Gegebenheiten. In Absprache mit dem EBA erfolgte der Nachweis deshalb in folgenden Schritten:

- Ganzheitliche Betrachtung des Schleifaggregat-Laufverhaltens
- Ursachenanalyse aller für das Laufverhalten kritischen Fehlermöglichkeiten
- Einschätzung der kritischen Situationen
- Sicherheitskonzept (Systeme (Hydraulik, Steuerung, Sensorik, etc.) für ein stabiles Laufverhalten)
- Sicherheitsnachweis (Bewertung der Systeme mittels FMEA)

2.3 Ergebnisse

Eine Bewertung der Testergebnisse durch einen sachverständigen Gutachter wurde schließlich im Herbst 2005 als Nachweis der Lauf- und Entgleisungssicherheit anerkannt. Zusätzlich wurde seitens des EBA zunächst nur eine vorläufige Zulassung für ein Jahr ausgestellt, innerhalb dessen das Fahrzeug zu testen und sämtliche Unregelmäßigkeiten zu melden sind. Ende 2006 wurde schließlich die unbefristete EBA-Zulassung ausgesprochen.

3. Arbeitspaket 2: Betriebserprobung

3.1 Problemstellung

Für die Betriebserprobung standen folgende Fragen im Vordergrund:

- ? Wird der angestrebte Schleifabtrag erreicht? Wird die Längswelligkeit verbessert?
- ? Wird der Schienenkopf an den richtigen Stellen beschliffen?
- ? Ist der Arbeitsprozess der Maschine (Hydraulik, Steuerung, etc.) dauerhaft und reproduzierbar? Welche Schäden treten auf.
- ? Ist die Maschine reif für einen Einsatz bei der Bahn (Staubentwicklung, elektromagnetische Verträglichkeit, etc.)

Ferner galt es betriebliche Punkte (Traktionsleistung, Weichenüberfahrt, Staubfilterung und -entsorgung, etc.) im Zuge der Erprobung zu klären.

3.2 Lösungsansatz und Durchführung

Die genannte Problemstellung wurde im Zuge von insgesamt 8 Schleiftests über einen Zeitraum von 26 Monaten parallel zu den Prüffahrten für die eisenbahntechnischen Zulassungen bearbeitet. Bei diesen Schleiftests wurde ein Gleisabschnitt von 500 – 1500 m Länge durch die Schleifmaschine mit unterschiedlichen Prozessparametern beschliffen. Die Schleiftests wurden im gesperrten Gleis von zwei Privat-Bahnen durchgeführt. In der Frühphase wurden die Tests nicht in der vollen Maschinen-Konfiguration mit vier Schleifaggregaten sondern mit nur einem durchgeführt, um Änderungen, die zunächst nur an einem Schleifaggregat vorgenommen wurden, besser bewerten zu können. Geschliffen wurde stets mit der Ziel-Geschwindigkeit von 80 km/h.

Gemessen wurde in erster Linie der Schleifabtrag, zusätzlich wurden das Schienenquerprofil und die -längswelligkeit vor und nach jedem Test ermittelt, um sicherzustellen, dass diese innerhalb der geforderten Toleranzen bleiben. Aufgrund des geringen Schleifabtrags pro Überfahrt (0,01 – 0,05 mm) und der zu erwartenden großen Streuungen wurde der Abtrag nach jeder Überfahrt an mindestens 5 (teilweise bis zu 10) Messpunkten pro Schiene ermittelt. Pro Prozessparameter-Einstellung wurden zunächst drei, später vier Wiederholungen durchgeführt. Die Messungen wurden mit Bahn-zugelassenen Messgeräten (SHM, DQM und RMF) durch speziell geschultes Personal durchgeführt. Zusätzlich wurde durch die Maschinenbesatzung noch der Schleifkörperverschleiß und deren Erwärmung gemessen. Die Auswertung erfolgte später unter Benutzung der üblichen stochastischen Methoden.

Variiert wurde während der Tests vor allem der Anpressdruck auf die Schleifkörper. Bei jedem Test wurden ferner unterschiedliche Schleifmittel (Schleifkorntyp, -zusammensetzung und -korngröße sowie die Bindemittelfestigkeit) verwendet. Außerdem wurden von Test zu Test Anpassungen an der Maschinentechnik vorgenommen (Schleifkörpereinspannung, hydraulische Ventiltechnik, etc.).

Derartige Schleiftests waren bedingt durch den Einsatz von schwerem Gerät (80 t Schleifmaschine mit 1000 kW Lok), den hohen bahntechnischen Vorbereitungsaufwand (Gleissperrung), die große Anzahl von erforderlichen Schleifkörpern (ca. 50 Stck./Test, ca. 10.000 €/Test) und die hohe Anzahl von Bedien- und Messpersonal sehr aufwändig.

Abb. 10: RC01 während der Erprobung (nur zwei Schleifaggregate im Einsatz)

Parallel zu den Tests wurden die Sekundärsysteme (Hydraulik, Staubabsaugung und –filterung, Wassersprüheinrichtung) beurteilt, deren Mängel dokumentiert und über die Dauer der Betriebserprobung hinweg ständig weiterentwickelt.

3.3 Ergebnisse

Durch wiederholte Tests wurde ein Schleifkörpertyp identifiziert, der hinsichtlich Abtrag und Verschleiß als optimal eingestuft werden kann. In jedem Schleifaggregat werden die Schleifkörper etwas anders zum Schienenkopf zugestellt, damit dieser an Fahrkante und Fahrfläche bedarfsgerecht beschliffen wird. Der maximale Abtrag ergibt sich am Übergang von Fahrkante und –fläche, wo die Neigung zur Rissbildung (HeadChecks) am größten ist. Der Anpressdruck wurde so ermittelt, dass sich ein Abtrag von ca. 0,05 mm pro Überfahrt einstellt. Der Schleifmittelverschleiß oder deren Aufheizung können bei diesem Druck in Grenzen gehalten werden.

Durch Zugabe von Wasser ergibt sich ein deutlich glätterer Beschliff, allerdings ist der Abtrag geringer (ca. 50 %). In Abstimmung mit der Bahn wurde ein Betriebsmodus bestehend aus 3 Überfahrten (2 trocken, 1 naß) festgelegt, wodurch ein Gesamtabtrag von 0,1 mm sicher erreicht wird.

Die Glättung von Längswellen im Bereich 30 – 1000 mm Länge ist messtechnisch gut nachweisbar. Durch den zunächst recht groben Beschliff ist die Schienenoberfläche jedoch sehr rau. Dadurch neigt der Messtaster des Längswelligkeitsmessgerätes zum Springen und suggeriert große Wellen, gerade im kurzen Wellenbereich. Dies konnte dadurch nachgewiesen werden, dass bei langsamerem Vorschub die Messergebnisse deutlich günstiger ausfallen. Nach wenigen Zugüberfahrten ist die Schiene überdies soweit geglättet, dass die kurzen Längswellen unterhalb der DB-Vorgaben liegen. Die abschließende Schlichtfahrt mit Wasser dient dazu, die Schiene weiter zu glätten und dadurch die Lärmemission direkt nach dem Beschliff in Grenzen zu halten.

Bei der Staubabsaugung wurde noch keine optimale Kombination von Material und Geometrie für die Erfassung des Staubs gefunden. Je dichter die Erfassungslippen gegen die Schiene abdichten (und damit Staub und Funken effektiv einfangen), um so stärker sind sie auch Beschädigungen durch Kollision mit Oberbaumaterialien (Bahnübergängen, Weichen, Radlenkern, Schaltmitteln, etc.) ausgesetzt. Schadenstolerante Materialien wie Gummi unterliegen jedoch einem extremen Verschleiß durch die Bestrahlung mit glühenden Funken. Hier ist weiterer Entwicklungsbedarf erforderlich.

4. Arbeitspaket 3: Verfahrenszulassung des Schleifsystems durch die DB AG

4.1 Problemstellung

Das Hochgeschwindigkeitsschleifen unterscheidet sich nicht nur hinsichtlich Arbeitsgeschwindigkeit und Abtrag von konventionellen Schienenbearbeitungsverfahren. Da der Schleifbetrieb als Zugfahrt und völlig ohne betriebsbehindernde Gleissperrung durchgeführt werden soll, ist der Nachweis der Schleifleistung mittels herkömmlicher Handmessungen (Abtrag, Längs- und Querprofil) nicht sinnvoll, da hierzu die Gleissperrung erforderlich wäre, die eigentlich vermieden werden soll. Andererseits sind bei den hohen Fahrgeschwindigkeiten die Messungen in der notwendigen Präzision auch nicht durch ein maschinenintegriertes System durchführbar. Insbesondere der Abtrag kann nur mittels Vor- und Nachmessung ermittelt werden.

Die Verfahrenszulassung der Bahn war im Wesentlichen an die Forderung geknüpft, einen sicheren und reproduzierbaren Nachweis der Schleifleistung und -qualität zu leisten.

Ferner zeigte sich die Messung von Schleifabträgen an der Schiene im Bereich weniger Hunderstel Millimeter als problematisch. Diese Messung wird in der Regel durch ein Bahn-zugelassenes Gerät vorgenommen, bei dem die Schienenhöhe relativ zu drei am Schienenfuß angebrachten Aufstellpunkten vor und nach der Bearbeitung gemessen wird. Aus der Differenz dieser Werte ergibt sich der Abtrag. Durch wiederholtes Aufstellen des Messgeräts auf diesen Punkten schleichen sich leicht Messfehler ein, z. B. weil sich Schmutz auf den Aufstellpunkten ablagert, weil sich die Aufstellpunkte während der Schienenarbeiten verändern oder weil aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen den Messungen eine Längenänderung im Messgerät auftritt.

4.2 Lösungsansatz und Durchführung

Zum Nachweis der Schleifleistung wurde ein neuartiges, hybrides Verfahren vorgeschlagen und letztlich durch die Bahn akzeptiert:

- Der für den Schleifabtrag relevante Prozessparameter Anpressdruck auf die Schleifkörper wird durch eine bordgestützte Datenarchivierung kontinuierlich für alle Schleifaggregate aufgezeichnet und gibt Auskunft darüber, ob und wie stark geschliffen wurde. Ferner sind Schleifaussetzer (Weichen, Steinwechsel, etc.) direkt erkennbar.

- Der Zusammenhang zwischen Schleifkörper-Anpressdruck und Abtrag wird durch eine einzelne Messung erbracht. Die Messstelle wird an eine geeignete Stelle gelegt, so dass mittels Sicherungsposten und ohne Gleissperrung die notwendigen Daten aufgenommen werden.

Zur Auswertung der Prozessdaten wurde eine eigene Software entwickelt, welche die Prozessdaten grafisch aufarbeitet und so leicht nachvollziehbar macht. Außerdem werden Auftragsdaten und Einzelereignisse dargestellt.

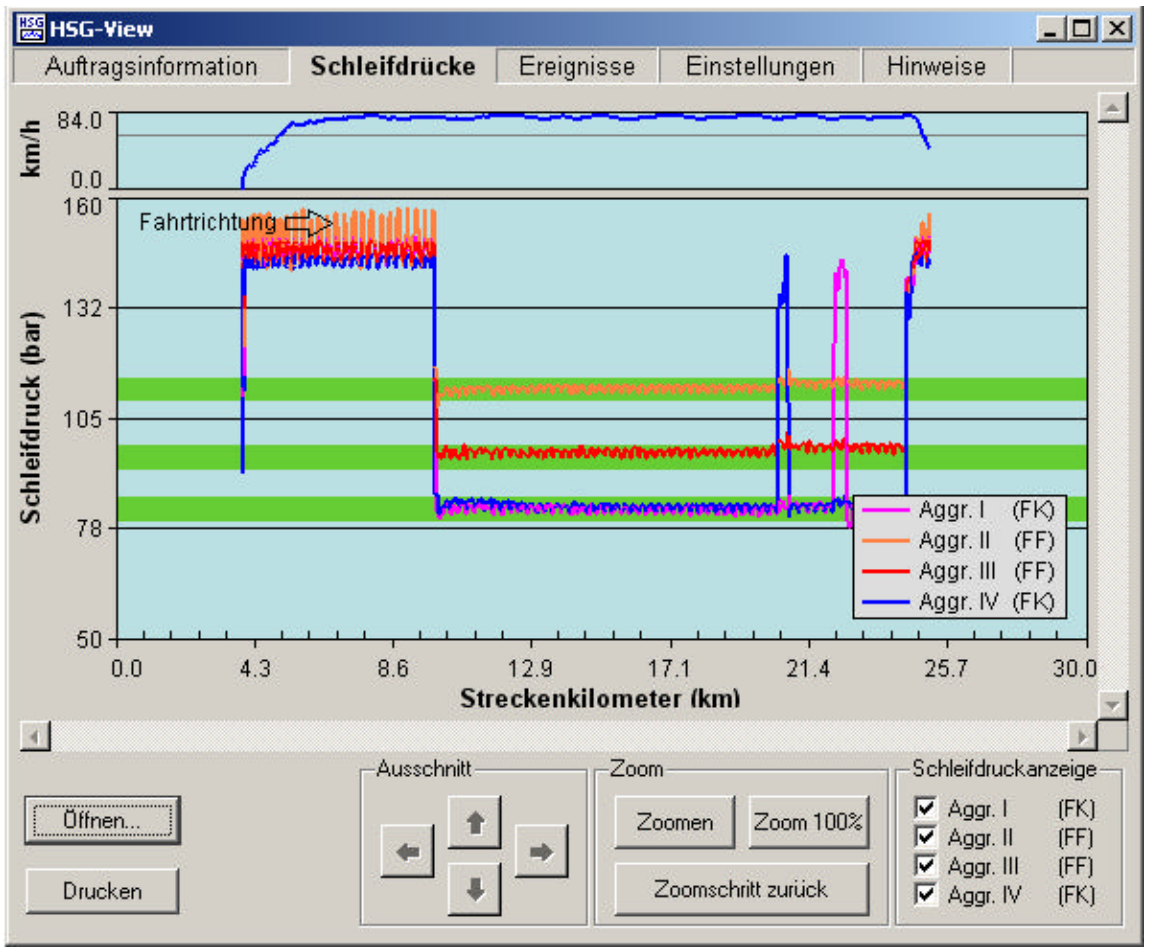


Abb. 11: Prozessdatenanalyse mit Software „HSG-View“

Um die Messungenauigkeiten bei der Abtragsmessung zu reduzieren, wurde ferner ein eigenes Messgerät entwickelt, umfangreich getestet und den Prüfstellen der DB zur Prüfung und Zulassung übergeben. Das neue Messgerät ist im Bereich der Aufstellpunkte gegenüber dem vorhandenen Gerät überarbeitet, so dass eine Lagerung ohne Zwangskräfte möglich ist. Die Wiederholgenauigkeit der Messungen – auch im Außeneinsatz und im rauhen Bahnbetrieb – wurde nachweisbar verbessert.

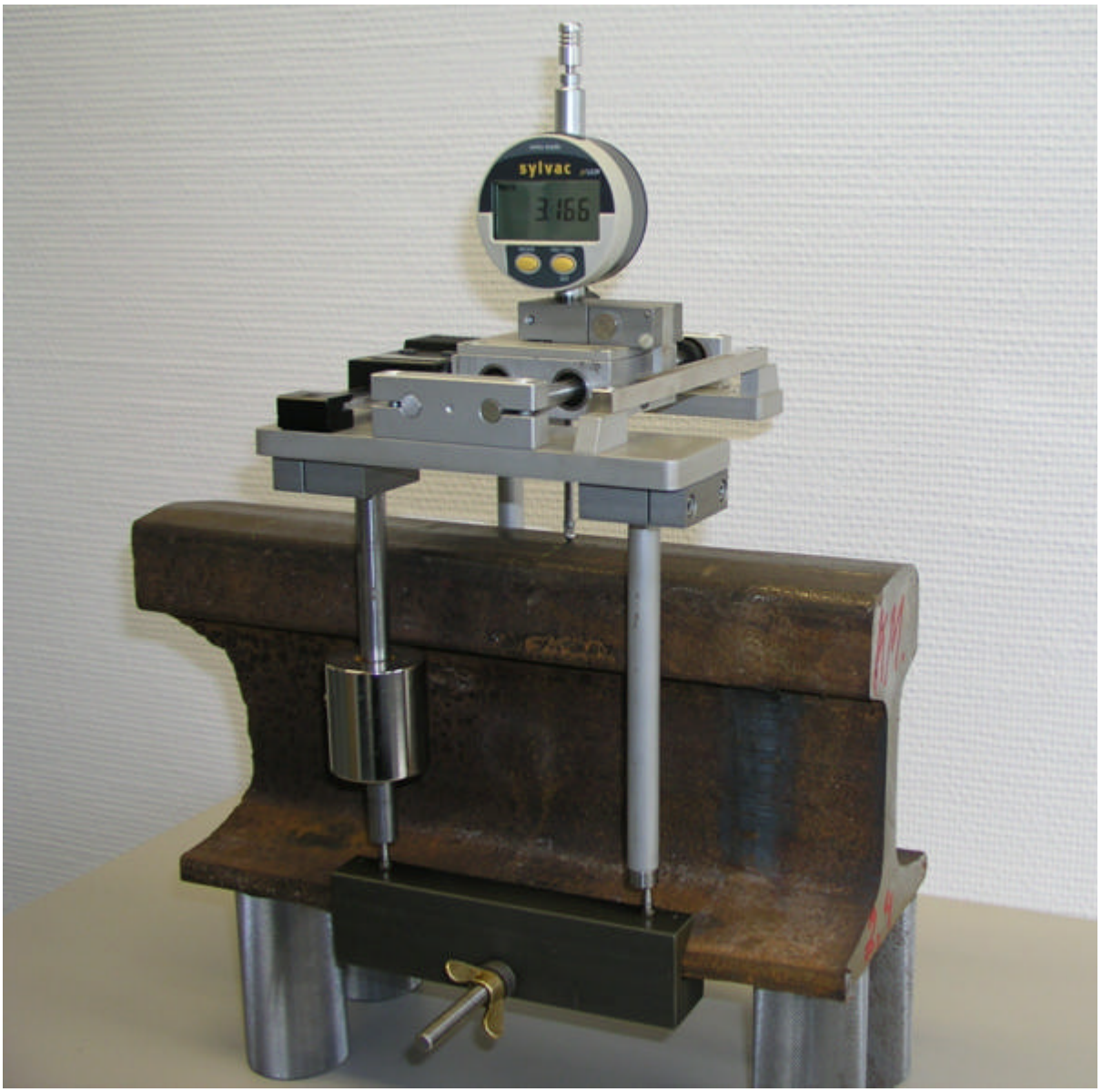


Abb. 12: Neu entwickeltes Höhenabtragsmessgerät SHM -850

4.3 Ergebnisse

Die Verfahrenszulassung des HSG-Schleif- und Qualitätssicherungs verfahrens wurde im Herbst 2007 durch die Bahn erteilt (s. Anhang). Im Rahmen eines zweijährigen Erprobungsprogramms wird in 2008/09 der Betrieb des Schleiffahrzeugs, das Qualitätssicherungssystems sowie die Auswirkungen auf den Zustand des Gleises aufgenommen und bewertet.

5. Arbeitspaket 4: Durchführung eines Pilotprojekts

5.1 Problemstellung

Zur Beurteilung der Auswirkungen des HSG-Beschliffs auf die Lärmemission sollte im Rahmen eines Pilotprojekts an einem Streckenabschnitt Lärmmessungen vor und nach der Schienenbearbeitung durchgeführt werden. An die Auswahl der Strecke waren folgende Bedingungen geknüpft:

- Der Verkehr auf der Strecke soll ein Mischverkehr (Hochgeschwindigkeitszüge, Personennahverkehr und Güterverkehr sein).
- Das Gleis muss in einem Zustand sein, dass der HSG-Beschliffs einen messbaren Unterschied macht, die Verriffelung darf also weder zu gering noch zu stark sein. Der Oberbau muss soweit in Ordnung sein, dass andere Gründe für Lärmemission als Schienenverriffelung untergeordnet sind.
- Der Abschnitt muss für eine Schallmessung geeignet sein (kein Störschall von benachbarten Quellen, keine oder möglichst geringe Schallreflektionen, gerade Streckenführung, ausreichend seitlicher Abstand zum Aufbau der Mikrophone, etc.)
- Der Streckenbetreiber muss der Maßnahme zustimmen (dies ist ohne eine Verfahrenszulassung schwierig bis unmöglich).

Insbesondere die letzte Forderung erforderte eine sehr hohe Reife der Maschine und wiederholte Schleifdemos vor Entscheidungsträgern der DB, damit ein noch nicht vollständig zugelassenes Verfahren zum Einsatz kommen kann. Ein entsprechender Test auf weniger exponierten (und damit zugänglicheren) Nebengleisen wird durch die ersten beiden Forderungen ausgeschlossen.

Neben der Suche nach einer geeigneten Strecke galt es Ferner den Einsatz und die Messungen zeitlich abzustimmen. Die Herausforderungen des reinen Messeinsatzes sind im Bericht der TU - Berlin beschrieben.

5.2 Lösungsansatz und Durchführung

Nachdem EBA-Zulassung und Einstellgenehmigung bereits in 2005 und 2006 erteilt, und in 2007 zwei erfolgreiche Schleifdemos gemeinsam mit der zulassenden Stelle der DB absolviert worden waren, gelang es schließlich im Frühjahr 2007 von der Niederlassung HH auf der Strecke HH-Kiel die Zustimmung für ein solches Schleifprojekt auf einem 10 km langen Streckenabschnitt zwischen HH-Langenfelde und Elmshorn zu erhalten. Als Messstelle wurde der Haltepunkt Priesdorf am KM 18,630 als geeignet ausgewählt.

Am 25. April 2007 wurde – ein Tag nach erfolgter Lärm-Vormessung durch den Projektpartner – der Streckenabschnitt auf beiden Richtungsgleisen mit jeweils vier Schleifüberfahrten bearbeitet. Sämt-

liche Fahrten wurden tagsüber als Zugfahrt (ohne Gleissperrung) zwischen dem Regelverkehr durchgeführt. Die Arbeiten waren ohne besondere Vorkommnisse nach 6 Stunden abgeschlossen. In Abtragsmessungen ergab sich ein durchschnittlicher Abtrag von 0,14 mm.

Abb. 13: RC01 während des Pilotversuchs auf der Strecke HH-Kiel am 25. April 07

5.3 Ergebnisse

Der Schienenkopf wurde im Bereich Y-32 bis Y+20 beschliffen. Der Beschliff der Fahrkante erfolgt bis 8 mm unter SOK. In Abtragsmessungen ergab sich ein durchschnittlicher Abtrag von 0,14 mm. Eine Längswelligkeitsmessung musste aufgrund eines Defekts am Messgerät RMF kurzfristig abgebrochen werden. Die Ergebnisse der Lärmmessungen sowie deie Entwicklung des Schienenkopfes in den Wochen nach der Bearbeitung sind im Bericht der TU-Berlin ausführlich angegeben.

Abb. 14: Schleiffbild der Schiene nach 4 Überfahrten (Gleisinnen ist oben)

Aufgrund der unerwartet durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen (Stopfen) im Zeitraum zwischen den Akustikmessungen ist leider eine objektive Bewertung der Lärmemission vor und nach dem Schleifen nicht gegeben. Eine Wiederholung des Versuchs im Rahmen des laufenden Projekts ist aus Zeitgründen nicht mehr möglich.

6. Abschluß

Das eigentliche Ziel des Projektes – der Nachweis einer verringerten Lärmemission in Folge eines präventiven Beschliffs mittels HSG – konnte aufgrund des unerwartet durchgeführten Stopfens der Versuchsgleise nicht erreicht werden. Dies ist angesichts der Vielzahl der erreichten Teilziele - der Entwicklung einer komplexen und neuartigen Bearbeitungsmaschine, der abgeschlossenen Erprobung und der Vielzahl der erteilten Zulassungen - nur ein kleiner Wermutstropfen. Das HSG-System befindet sich inzwischen in einer umfangreichen und langfristigen Erprobung auf Hochgeschwindigkeitsstrecken der Bahn, welche das besondere Interesse der DB an dieser Technik zum Ausdruck bringt. Neben einer Vorbeugung gegen Verriffelung verspricht sich die DB auch eine bessere Kontrolle von Rissen im Schienenkopf als Folge von Rollkontaktermüdung.

Hamburg, 31. Jan 08

7. Anhang

7.1 EBA-Zulassung

7.2 Anwenderfreigabe der DB

Technische Universität Berlin

FAKULTÄT V
VERKEHRS- UND
MASCHINENSYSTEME

Institut für Land-
und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrwege
und Bahnbetrieb

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann

Forschungsvorhaben „Leiser Verkehr“

Bericht 203/07
vom August 2007

Entwicklung und Umsetzung des neuen, optimierten Schleifverfahrens HSG (High Speed Grinding) für Schienen

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 3: Erstellung des Untersuchungs- und Messprogramms „Akustik“ und „Schienenoberfläche“

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 4: Durchführung der Schleiffahrt und Akustikmessungen

mit Förderung durch das

Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

TU Berlin

Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb

Forschungsvorhaben „Leiser Verkehr“

Bericht 203/07
vom August 2007

Entwicklung und Umsetzung des neuen, optimierten Schleifverfahrens HSG (High Speed Grinding) für Schienen

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 3: Erstellung des Untersuchungs- und Messprogramms „Akustik“ und „Schienenoberfläche“

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 4: Durchführung der Schleiffahrt und Messungen

mit Förderung durch das

Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

Bearbeiter:

Dipl. -Ing. Christian Canis
Dipl. -Ing. Marek Grochowski
Dipl.-Ing. Sven Heidmeier
Dipl. -Ing. Bodo Schlüter
Dipl. -Ing. Birgit Strehle

TU BERLIN • SCHIENENFAHRWEGE UND BAHNBETRIEB • Sekr. SG 18 • SALZUFER 17 - 19 • D-10587 BERLIN
☎(030) 314 23314 • FAX: (030) 314 25530 • EMAIL: Info@Railways.TU-Berlin.de • INTERNET: http://www.Railways.TU-Berlin.de

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	**4**
Meßprogramm	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Ergebnisse	**6**
Schlussfolgerungen	**15**

1. Einleitung

Zur Beurteilung der akustischen Wirksamkeit des High Speed Grinding wurden vom Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TUB Messungen bei Vorbeifahrten von Regelzügen auf zwei Gleisen durchgeführt. Die Messungen fanden statt auf der Strecke Hamburg – Kiel, km 18,630 bis 19,000, süd-östlich des HP Priesdorf. Es handelt sich um eine zweigleisige elektrifizierte Strecke. Der Oberbau besteht aus UIC 60 Schienen, die mit Betonschwellen im Schotterbett verbaut sind. Die Fahrflächen der Schienen zeigten vor dem Schleifen einen normalen Abnutzungszustand mit leichten Oberflächenfehlern. Die Strecke wird von ICE-, IC-, Regionalverkehrs- sowie Güterzügen befahren.

Im Verlauf der Messungen wurden unerwartet Instandhaltungsmaßnahmen am Gleiskörper (Schotterstopfen) durchgeführt. Die hieraus resultierenden Veränderungen des akustischen Verhaltens des Oberbaus haben z.T. Auswirkungen auf die Aussagekräftigkeit der Messergebnisse, die im folgenden näher erläutert werden.

Abbildung 1: Messquerschnitt Priesdorf in Richtung Hamburg blickend

2. Messprogramm

Bezüglich der beiden Gleise waren drei Mikrofone in unterschiedlichen Abständen von Gleismitte in annähernd derselben Messebene positioniert. Die Abstände und die Messebene waren an den im Folgenden genannten Messtagen identisch. Zusätzlich zu den Schallpegeln wurden die Geschwindigkeit der Züge, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit ermittelt.

Gemessen wurde am 24.04.2007, d. h. einen Tag vor dem Schleifen der beiden Gleise. Die Messung am 26.04.2007 fand einen Tag nach dem Schleifen beider Gleise statt; am dritten Messtag, dem 21.06.2007, waren seit dem Schleifen folglich ca. acht Wochen vergangen.

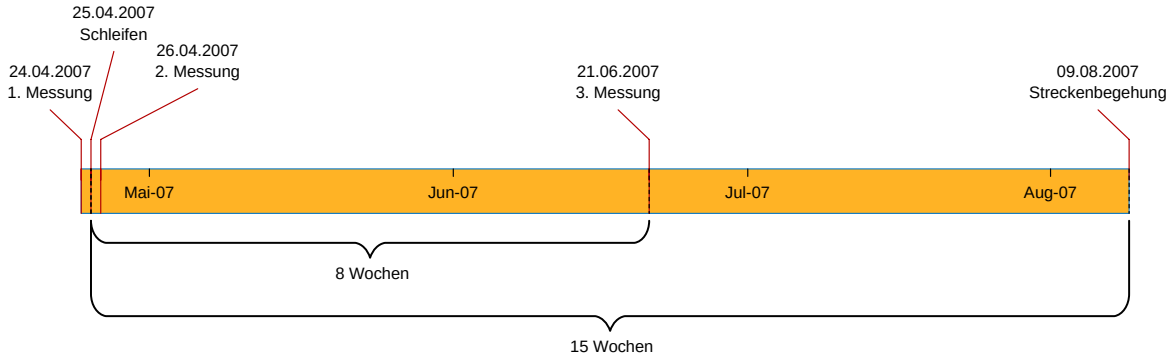


Abbildung 2: Zeitplan der Messungen

Ausgeschlossen von der Auswertung wurden Fahrten auf Gleis 1 (aus Richtung Hamburg kommend), da im Betrachtungszeitraum das Gleis im Rahmen einer Instandhaltungsmaßnahme unerwartet gestopft wurde und damit keine Aussage über die Wirksamkeit des Schleifverfahrens getroffen werden kann. Des Weiteren wurden Vorbeifahrten bei Zugbegegnungen, Fahrten in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen sowie Fahrten bei Regen ausgeschlossen. Zur Datenauswertung wurden die an den Analog-Ausgängen des DAT-Recorders von Sony zur Verfügung stehenden, bereits bei der Aufnahme A-bewerteten Schalldrucksignale jeder Vorbeifahrt auf einen Schallanalysator vom Typ B&K 2260 „Investigator“ gegeben. Mittels der bei Eisenbahn-Messungen üblichen Zeitbewertung „Fast“ wurden so die entsprechenden zeitlichen Pegelverläufe bei den einzelnen Zugfahrten erstellt. Diese Zeitverläufe mussten sodann in die B&K „Evaluator“-Berechnungssoftware übertragen werden, mittels derer sich durch manuelles Setzen von zwei Zeitmarkierungen die gewünschten Mittelungspegel $L_{Am,Wagen}$ über

eine jeweils bestimmte Wagenanzahl berechnen ließen. Beim ICE sind dies 10 Mittelwagen, bei IC-Zügen fünf oder sieben Wagen, bei den Zügen der NOB drei oder vier Wagen und bei RE-Zügen drei bis sechs Wagen. Durch diese auf die Schallemission der Wagen beschränkte Mittelwertbildung ist der Einfluss der Emission der gegebenenfalls unterschiedlich lauten Lokomotiven (Triebköpfe) auf das Untersuchungsergebnis im Wesentlichen ausgeschlossen.

Zur Erstellung der Terzspektren wurden die analogen Ausgangssignale des DAT-Recorders mit dem Real Time Analyser Typ 840 von Norsonic bearbeitet. Die Berechnung der Spektren erfolgte jeweils über die individuelle Mittelungszeit bzw. Wagenanzahl, wie sie zur Bildung des Mittelungspegels $L_{Am,Wagen}$ verwendet worden ist. Außerdem wurden die Terzspektren mehrerer Vorbeifahrten gleichartiger Züge eines Messtages energetisch gemittelt.

3. Ergebnisse

Bei der Auswertung der Mittelungspegel $L_{Am,Wagen}$ zeigte sich eine Erhöhung des Schalldruckpegels am Tag unmittelbar nach dem Schleifen. Diese Pegelzunahme war erfahrungsgemäß zu erwarten, da durch das Schleifen die Schienenoberfläche aufgeraut wird, was zu einer erhöhten Anregung von Rad und Schiene führt. Die Anfangsrauhigkeit der Schiene wird in der Regel nach relativ kurzer Zeit durch die Verkehrslast egalisiert, so das sich eine Reduktion der Schallemissionen ergibt. Bei Betrachtung der Schalldruckpegel der Messung etwa 8 Wochen nach dem Schleifen zeigte sich jedoch nicht diese erwartete Reduktion. Teilweise war sogar eine Zunahme des Mittelungspegels zu beobachten. Da es unwahrscheinlich ist, dass die Rauhigkeit der Schiene im Zeitverlauf nach dem Schleifen zugenommen hat, lässt die Pegelzunahme auf andere Einflüsse als das HSG-Schleifen schließen.

Bei der Betrachtung des spektralen Anteils einzelner Frequenzen am Schalldruckpegel wird diese Vermutung bestätigt.

Abbildung 3 bis Abbildung 6 zeigen A -bewertete Terzspektren im Bereich von 50 Hz bis 20 kHz für die ausgewerteten Vorbeifahrten der einzelnen Zugarten. Jeweils für ICE-, IC-, NOB[1]- und RE-Züge sind die Spektren des Schalldruckpegels für den Mess-

[1] Nord- Ostsee Bahn

tag vor dem Schleifen, einen Tag nach dem Schleifen und ca. zwei Monate nach dem Schleifen in einer Grafik gegenübergestellt. Beim ICE und den IC-Zügen spiegeln die Spektren nur das Ergebnis einer vermessenen Fahrt wider, während bei den NOB- und RE-Zügen sämtliche Fahrten eines Messtages in die Berechnung der Spektren eingegangen sind.

Die Spektren für den Tag vor dem Schleifen lassen den bei Personenzügen mit mittleren Geschwindigkeiten üblichen Verlauf erkennen: Maximale spektrale Anteile liegen in der 1,6- und 2,0 kHz-Terz; darüber und darunter fallen die Pegel der Spektralkomponenten mehr oder weniger stark ab, was auch eine Folge der hier vorliegenden A-Bewertung ist. Durch die Art der Datenauswertung nur über jeweils eine bestimmte Anzahl von Wagen repräsentieren die Spektren ausschließlich das Rollgeräusch der Züge, wobei oberhalb von ca. 1 kHz die Abstrahlung der Räder und unterhalb von ca. 1 kHz die Abstrahlung der Schienen (und bei tiefen Frequenzen der Schwellen) dominiert. Im übrigen zeigen die Spektren im Vergleich der Zugarten, dass ein ICE aufgrund seiner Scheibenbremsen und Radschallabsorber das niedrigste Rollgeräusch besitzt, IC- und scheibengebremste RE-Züge etwa das gleiche Rollgeräuschniveau aufweisen und dass die vermessenen Züge der NOB deutlich geringere Pegel als IC- und RE-Züge abstrahlen.

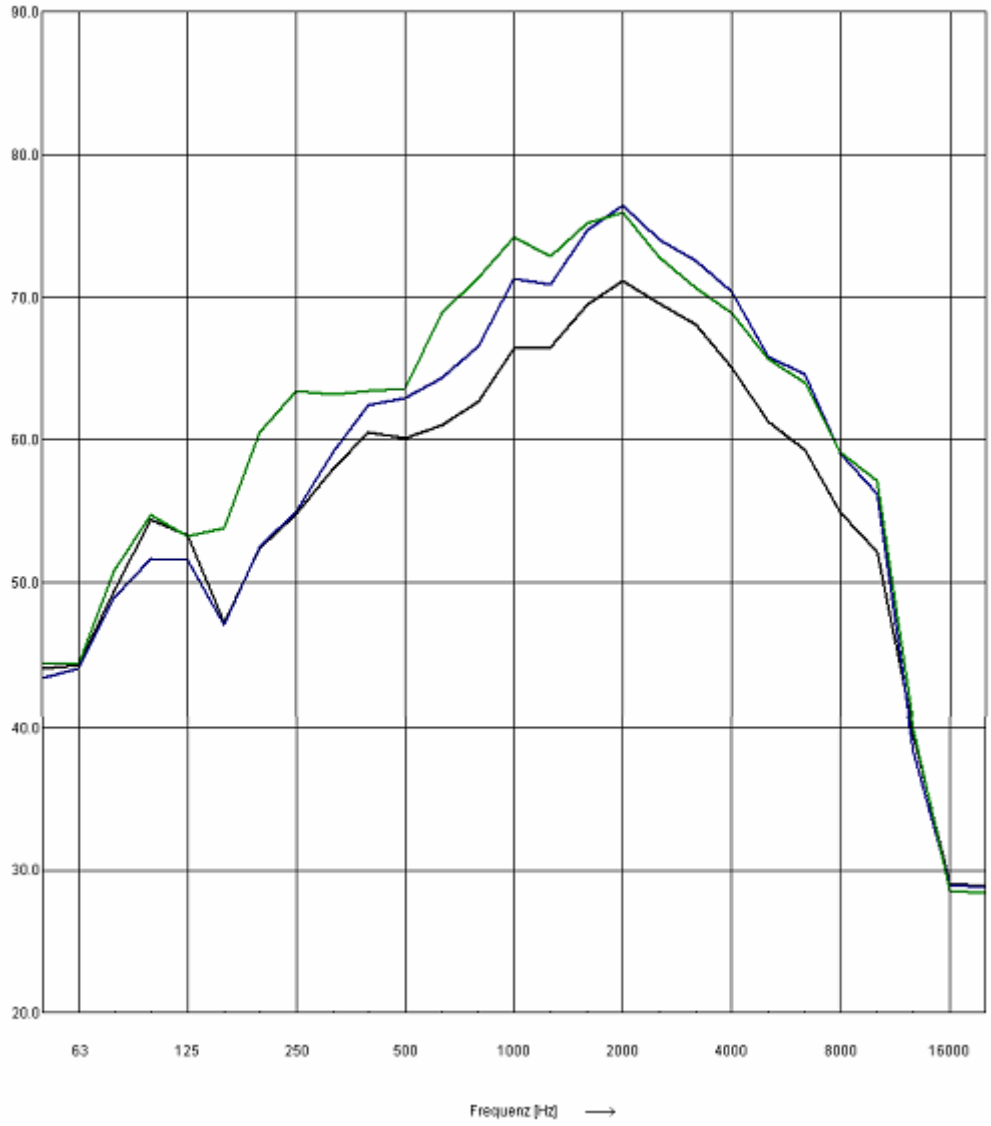


Abbildung 3: Einen Tag vor dem Schleifen (———), einen Tag nach dem Schleifen (———) und ca. zwei Monate nach dem Schleifen (———) in 7,5 m Abstand von Gleis 2 bei Vorbeifahrten jeweils eines ICE-Zuges mit Geschwindigkeiten von 112 ± 2 km/h gemessene A -bewertete Terzspektren des Schalldruckpegels

Da das Schleifen der Schienen durch das hier eingesetzte Verfahren eine starke Zunahme der Schienenrauhigkeiten und damit des Anregungsmechanismus für das Rollgeräusch verursacht hat, schlägt sich dieses bei allen Zugarten in einer breitbandigen Erhöhung der Terzpegel nieder. Am Tag nach dem Schleifen beginnt dies bei ca. 250 Hz, ergibt maximale Pegelzuwächse von 5 bis 6 dB bei Frequenzen um 2 kHz und nimmt bis hin zu ungefähr 10 kHz wieder langsam ab.

Am Messtag zwei Monate nach dem Schleifen verlaufen die Spektren oberhalb von etwa 1,6 kHz nahezu unverändert im Vergleich zum Messtag unmittelbar nach dem Schleifen. Bei Frequenzen unterhalb von ca. 1,6 kHz fällt jedoch bei allen Zugarten eine

abermalige starke Pegelerhöhung auf. Mit Sicherheit hängt dieser Effekt nicht mit spezifischen Eigenschaften der Zugarten ab, da er bei allen Zügen beobachtet wird. Es ist auch kaum zu vermuten, dass sich nach zwei Monaten die Schienenrauhigkeiten erhöht haben (und dies nur mit einer Wirkung auf Frequenzen unterhalb von ca. 1,6 kHz). Als mögliche Erklärung kommen jedoch zwischenzeitlich erfolgte Wartungsarbeiten am Gegengleis (mit u. a. Stopfen des Gleises) mit einer Auswirkung auch auf das Messgleis in Frage.

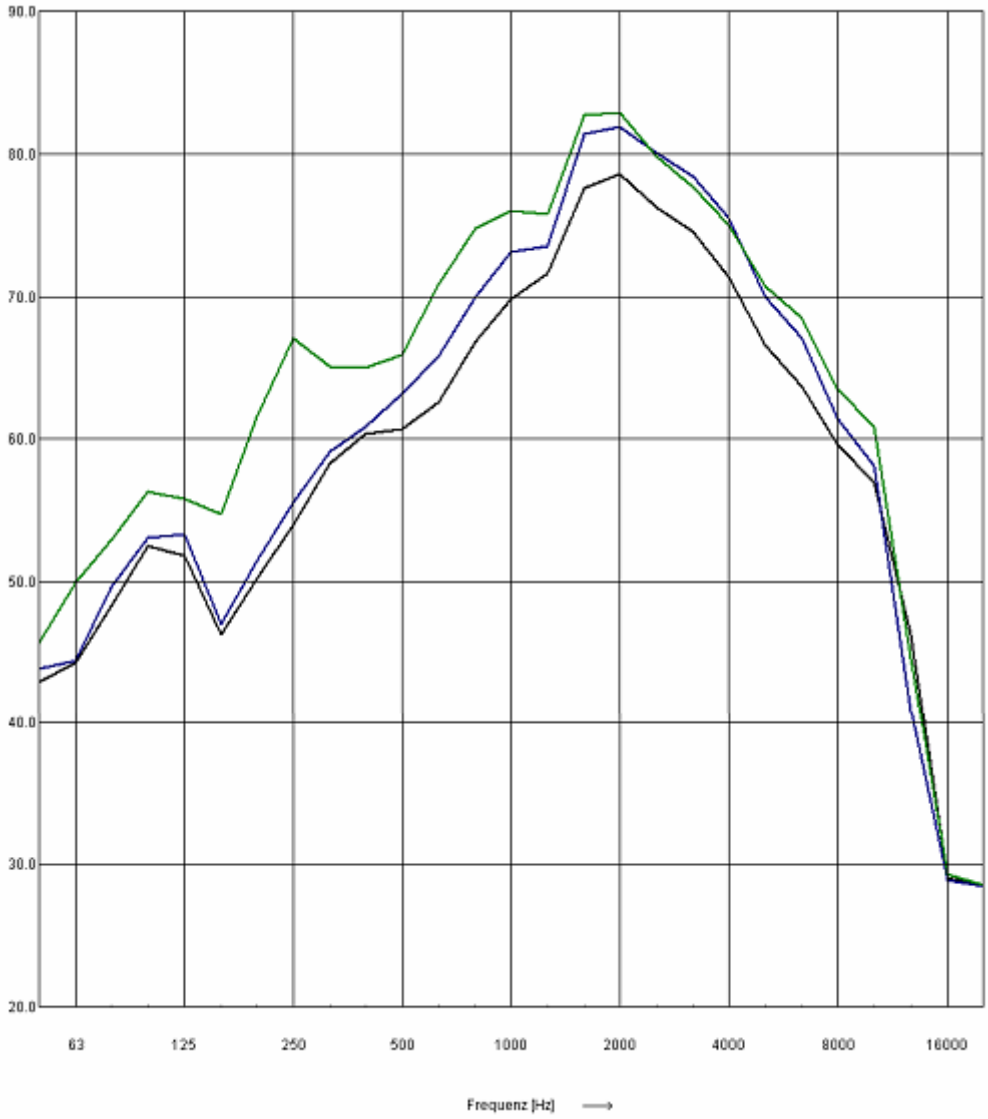


Abbildung 4: Einen Tag vor dem Schleifen (———), einen Tag nach dem Schleifen (———) und ca. zwei Monate nach dem Schleifen (———) in 7,5 m Abstand von Gleis 2 bei Vorbeifahrten jeweils eines IC-Zuges mit Geschwindigkeiten von 117 ± 3 km/h gemessene A -bewertete Terzspektren des Schalldruckpegels

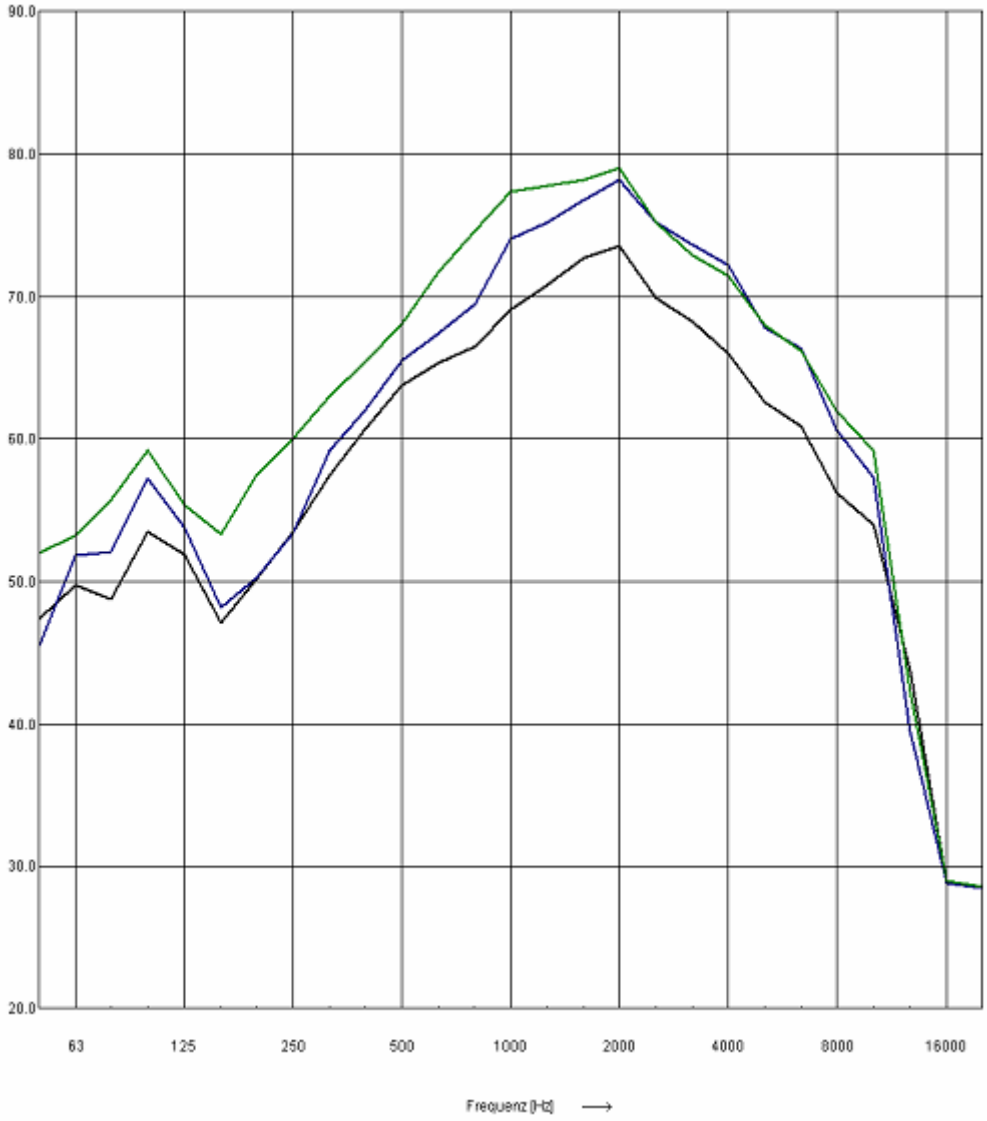


Abbildung 5: Einen Tag vor dem Schleifen (———), einen Tag nach dem Schleifen (———) und ca. zwei Monate nach dem Schleifen (———) in 7,5 m Abstand von Gleis 2 bei Vorbeifahrten von Zügen der NOB mit Geschwindigkeiten von 118 ± 4 km/h gemessene und über mehrere Züge gemittelte A -bewertete Terzspektren des Schalldruckpegels

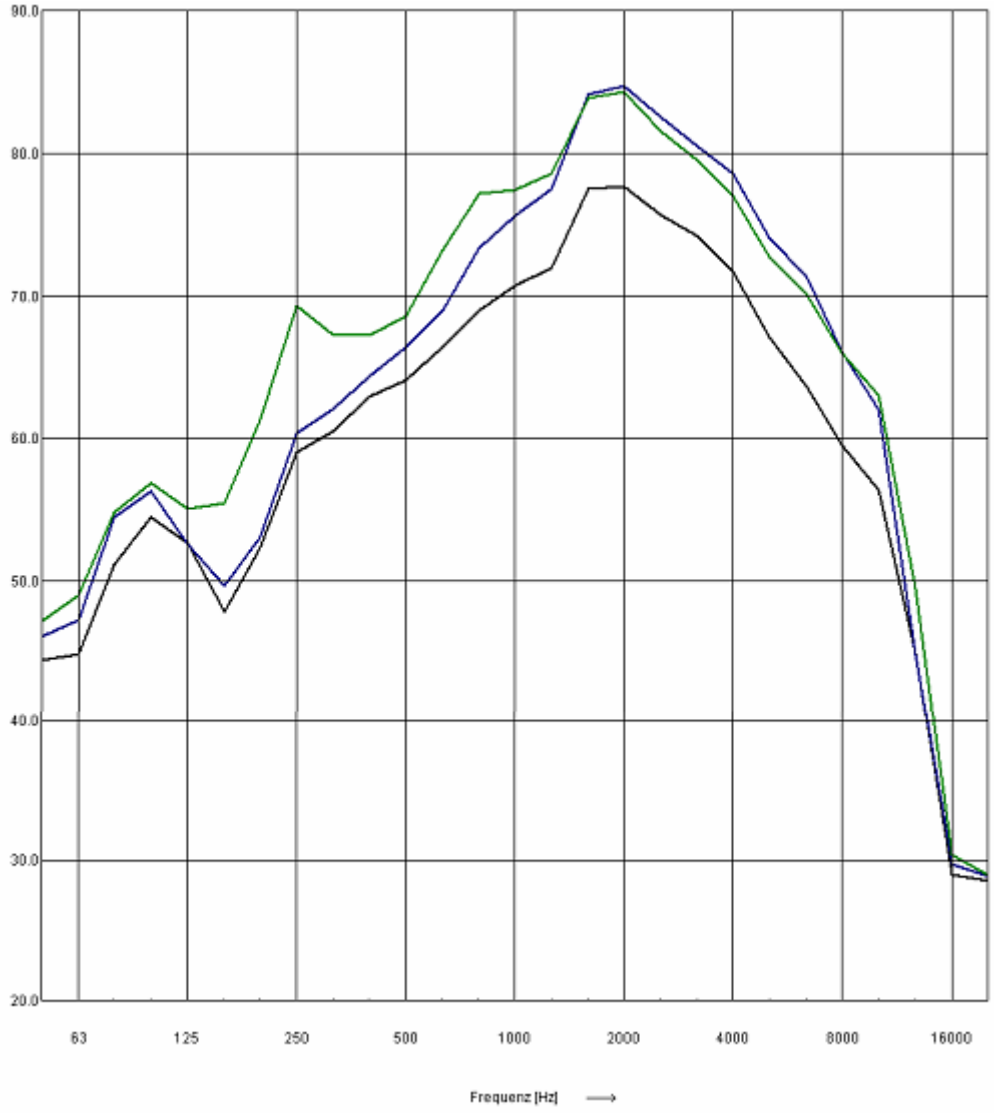


Abbildung 6: Einen Tag vor dem Schleifen (———), einen Tag nach dem Schleifen (———) und ca. zwei Monate nach dem Schleifen (———) in 7,5 m Abstand von Gleis 2 bei Vorbeifahrten von RE-Zügen mit Geschwindigkeiten von 118 ± 9 km/h gemessene und über mehrere Züge gemittelte A -bewertete Terzspektren des Schalldruckpegels

Aufgrund dieser Instandhaltungsmaßnahmen und der daraus resultierenden Änderung des akustischen Verhaltens des Oberbaus lassen die Ergebnisse der Messungen leider keine Bewertung des HSG-Schleifverfahrens aus akustischer Sicht zu. Es existieren keine gesicherten Verfahren vor, die eine Bestimmung des Einflusses des Stopfens auf die Akustik sowohl auf dem durchgearbeiteten Gleis als auch auf dem benachbarten Gleis ermöglichen würden.

Eine ursprünglich geplante vierte Schallmessung wurde aus diesen Gründen nicht mehr durchgeführt. Bei einer Streckenbegehung etwa 15 Wochen nach dem Schleifen zeigte sich jedoch eine optisch und sensorisch sehr glatte Schienenoberfläche, die auf eine

Reduktion des Schallpegels schließen lässt. Die folgenden vier Abbildungen dokumentieren den Oberflächenzustand im Zeitverlauf vor und nach dem Schleifen.

Abbildung 7: Schienenzustand vor dem Schleifen

Abbildung 8: Schienenzustand einen Tag nach dem Schleifen

Abbildung 9: Schienenzustand acht Wochen nach dem Schleifen

Abbildung 10: Schienenzustand 15 Wochen nach dem Schleifen

Auf der Strecke sind UIC 60 Schienen mit Betonschwellen im Schotterbett verbaut. Vor dem Schleifen war ein normaler Abnutzungszustand mit leichten Oberflächenfehlern festzustellen. (Abbildung 7) Einen Tag nach dem Schleifen sind deutliche Aufrauungen zu erkennen, die eine Erhöhung des Schallpegels unmittelbar nach dem Schleifen erwarten lassen. (Abbildung 8). Acht Wochen nach dem Schleifen ist erkennbar, dass die Fahrfläche der Schiene bereits wieder geglättet ist. (Abbildung 9) Eine Schallpegelzunahme im Zeitverlauf nach dem Schleifen durch eine erhöhte Schienenrauhigkeit ist daher unwahrscheinlich. Die Oberflächenbeschaffenheit nach 15 Wochen ist optisch und sensorisch als sehr gut zu bewerten. (Abbildung 10) Die Fahrfläche ist sehr glatt. Aufrauungen durch das Schleifen sind nur noch im Bereichen außerhalb der Rollkontaktzone festzustellen.

4. Schlussfolgerungen

Die akustischen Messungen zeigen eine zu erwartende Erhöhung des Schallpegels unmittelbar nach dem Schleifen. Am Messquerschnitt ist diese Pegelerhöhung jedoch auch acht Wochen nach dem Schleifen noch nicht abgeklungen. Aufgrund der unerwartet durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen am Gleiskörper (Stopfen) während des Betrachtungszeitraums sind allerdings nur eingeschränkte Aussagen über die Veränderung des Schallpegels durch das HSG-Schleifen möglich. Die Auswertung der spektralen Frequenzanteile des Vorbeifahrpegels stützt die Vermutung, dass eine Zunahme der niederfrequenten Schallanteile durch das Schotterstopfen erfolgt ist.

Der Betrachtungszeitraum reicht für gesicherte Aussagen zum Langzeitverhalten der Akustik nicht aus. Die Schienenoberfläche ist 15 Wochen nach dem Schleifen in einem optischen und sensorisch so guten Zustand gewesen, dass mit einer deutlichen Verringerung des Schallpegels zu rechnen wäre. Eine weitere Messung ist aufgrund von erneuten Instandhaltungsmaßnahmen auf dem ausgewerteten Gleis jedoch nicht mehr möglich.

Empfohlen wird, eine erneute Messung auf einem zu schleifenden Abschnitt durchzuführen. Die Erfahrungen der erfolgten Messung lassen auf eine längere Einfahrphase nach dem Schleifen schließen, die notwendig ist, um durch das Schleifen eingebrachte Aufrauungen wieder zu egalisieren. Es wird daher angeraten, akustische Messungen in Verbindung mit Messungen der Oberflächenrauhigkeit für einen Zeitraum von neun Monaten, idealerweise einem Jahr durchzuführen, um das Langzeitverhalten der Schienenfahrfläche nach dem HSG-Schleifen bewerten zu können.

Berlin, November 2007

Prof. Dr.- Ing. habil. J. Siegmann

Technische Universität Berlin

FAKULTÄT V
VERKEHRS- UND
MASCHINENSYSTEME

Institut für Land-
und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrwege
und Bahnbetrieb

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann

Forschungsvorhaben „Leiser Verkehr“

Bericht 204/07

vom August 2007

Entwicklung und Umsetzung des neuen, optimierten Schleifverfahrens HSG (High Speed Grinding) für Schienen

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 5: „Optimierung der Schleifstrategie“

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 6: „Erstellung LCC-Programm“

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 7: „LCC-Berechnung“

mit Förderung durch das

Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

TU Berlin

Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb

Forschungsvorhaben „Leiser Verkehr“

Bericht 204/07

vom August 2007

Entwicklung und Umsetzung des neuen, optimierten Schleifverfahrens HSG (High Speed Grinding) für Schienen

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 5: „Optimierung der Schleifstrategie“

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 6: „Erstellung LCC-Programm“

Bericht zum Arbeitspaket Nr. 7: „LCC-Berechnung“

mit Förderung durch das

Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Peter Danzer

Dipl.-Ing. Sven Heidmeier

Dipl.-Ing. Bodo Schlüter

Dipl.-Ing. Birgit Strehle

TU BERLIN • SCHIENENFAHRWEGE UND BAHNBETRIEB • Sekr. SG 18 • SALZUFER 17 - 19 • D-10587 BERLIN

☎(030) 314 23314 • FAX: (030) 314 25530 • EMAIL: Info@Railways.TU-Berlin.de • INTERNET: http://www.Railways.TU-Berlin.de

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1.	**Einleitung**	**5**
1.1.	Anlass	5
1.2.	Ziel der Untersuchung	6
2.	**Lärm**	**7**
2.1.	Wirkung von Lärm	7
2.2.	Quellen von Lärm an Schienenfahrwegen	9
2.3.	Entstehung des Rollgeräuschs	11
2.4.	Maßnahmen zur Minderung des Rollgeräuschs	13
2.5.	Maßnahmen zur Minderung der Schallausbreitung	15
2.6.	Rechtliche Grundlagen und Förderung von Schallschutzmaßnahmen	17
2.6.1.	Fahrzeuggrenzwerte	17
2.6.2.	Lärmschutz bei Neu- und Ausbau	17
2.6.3.	Lärmsanierung	18
2.6.4.	Nationales Verkehrslärmschutzpaket	19
3.	**Schienenschleifen als Maßnahme zur Lärmreduktion**	**21**
3.1.	Arten und Ursachen von Schienenfehlern	21
3.1.1.	Geometrische Schienenfehler	22
3.1.2.	Schienenfehler aufgrund von Veränderung der Materialstruktur	25
3.2.	Aufgaben des Schienenschleifens	28
3.3.	Arten des Schienenschleifens und spanabhebender Bearbeitung	30
3.4.	Schleifzyklen	34
4.	**Schleifstrategie**	**39**

4.1. Wachstum von Riffeln und Rissen 40

4.2. Schleifstrategie – akustisch 42

4.3. Schleifstrategie – Instandhaltung 43

4.4. Methoden der LCC 44

4.5. Investitionsrechenverfahren 46

4.5.1. Dynamische Investitionsrechenverfahren 46

4.5.2. Erträge 49

4.5.3. Abschreibung 49

4.5.4. Kalkulatorische Zinsen 50

4.6. LCC-Modell 52

5. LCC – Berechnung 54

6. Zusammenfassung 60

1 Einleitung

1.1 Anlass

Der Lärm ist eine bedeutende ökologische Schwachstelle des ansonsten als umweltfreundlich angesehenen Schienenverkehrs. Seine Beeinträchtigungen durch Lärm, liegen zwar oft deutlich unter denen des Straßenverkehrs, die auf die jeweiligen Verkehrsleistungen bezogenen Lärmbelastungen sind aber kaum geringer. Insbesondere der nächtliche Güterverkehr führt für relevante Teile der Bevölkerung zu Belastungen, die gesundheitsschädigende Ausmaße erreichen. Die Beeinträchtigungen durch Lärm sind deshalb auch ein wesentlicher Grund für den Widerstand der Bevölkerung gegen neue oder stärker belastete Trassen. Das umweltpolitische Ziel einer Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene wird dadurch in Frage gestellt.

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer großräumigen Betrachtungsweise die Maßnahmen an der Quelle, also am Ort der Lärmentstehung, zum besten Kosten-Nutzen-Verhältnis führen. Maßnahmen an der Lärmquelle beziehen sich auf:

- Rad-Schiene – Kontakt
- Bremsvorgänge
- Aerodynamische Vorgänge am Fahrzeugaufbau
- Lüftergeräusche des Triebfahrzeuges

Der Rad-Schiene-Kontakt nimmt dabei einen bedeutenden Teil bei der Lärmemission ein. Durch die Betriebsbelastung bilden sich auf der Schienenfahrfläche Riffel, kurze und lange Wellen. Insbesondere Riffel regen bei Zugüberfahrt die Schiene und die Räder zu Schwingungen an, deren Frequenzen im Hörbereich des Menschen hohe Amplituden erzeugen. Diese Riffel lassen sich durch Schleifen der Schienenoberfläche beseitigen.

Die z. Z. existierenden Schleifverfahren und Strategien weisen verschiedene Schwächen auf. Entscheidend ist die momentane Arbeitsgeschwindigkeit, die bei 4 – 5 km/h liegt und zwangsläufig zu Störungen im laufenden Betrieb führt. Um dem zu entgegnen hat RCN das Patent einer Schleiftechnik (HSG, High Speed Grinding) erworben. Die HSG- Methode ist gegenüber herkömmlicher Schleifverfahren mit 60 - 85 km/h bedeutend schneller und damit auch preisgünstiger, so dass eine vorbeugende Schleifstrategie möglich wird.

1.2 Ziel der Untersuchung

Die von der TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, zu bearbeitende Aufgabenstellung im Projekt „High Speed Grinding“ des Forschungsvorhabens „Leiser Verkehr“ umfasst im Wesentlichen 3 Arbeitsschwerpunkte:

- Aufstellen eines optimalen Schleifprogramms für das Hochgeschwindigkeitsschleifen,
- Erstellen eines LCC-Modells und
- Analyse und Prognose der Lebenszykluskosten.

Unter Betrachtung verschiedener Randbedingungen wird im Folgenden ein optimales Schleifprogramm für das Hochgeschwindigkeitsschleifen erstellt. Grundlage hierfür sind u.a. Schleifzyklen, Schienenzustände, Materialabtrag pro Schleifmaßnahme sowie Riffel- und Risswachtum.

Es wird des Weiteren ein LCC-Modell erstellt, das alle wesentlichen, d.h. kostenrelevanten Aspekte integriert und zueinander in Beziehung setzt.

Mit den Daten der schalltechnischen Untersuchungen und dem erstellten LCC-Modell wird im dritten Schritt eine Analyse und Prognose der Lebenszykluskosten vorgenommen. Neben den Kosten des Schleifverfahrens, sonstiger Instandhaltungskosten des Gleises (Durcharbeitung Schotter, Instandhaltung von Schienenbefestigungen) der Schienenerneuerung, werden hier ebenfalls die Kosten für den Lärmschutz betrachtet.

2 Lärm

2.1 Wirkung von Lärm

Verkehrslärm kann verschiedenste psychische und physische Auswirkungen auf den Menschen haben. Die beiden in der Literatur an häufigsten aufgeführten Schadenskategorien sind

a) Belästigungen

b) Gesundheitsschäden aufgrund von Lärm.

Erstere haben ihre Ursache tagsüber vor allem in Beeinträchtigungen von Konzentrationsfähigkeit und Kommunikation und nachts in Schlafstörungen. Ab welchen Geräuschniveaus Belästigungen auftreten, ist sehr subjektiv und u.a. altersabhängig[1]. Je höher die Lautstärke, desto einheitlicher ist eine Störwirkung zu beobachten[2].

Eindeutige gesundheitliche Folgen in Form von Hörschäden hat Lärm nur oberhalb einer Schwelle von ca. 85-90 dB(A). Derart hohe Schallpegel werden aber durch typischen Verkehrslärm nicht dauerhaft erreicht. Weniger eindeutig lassen sich andere lärmbedingte Gesundheitsschäden identifizieren, insbesondere kann nicht von einer typischen "Lärmkrankheit" gesprochen werden[3]. Untersucht wurden durch einschlägige epidemiologische Studien bisher Zusammenhänge von Verkehrslärm und dem Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen, der Ausschüttung von Stresshormonen und dem Bluthochdruckrisiko[4]. Während die Mehrzahl der Studien in die Richtung der vermuteten Gesundheitseffekte weisen[5], sind signifikante Ergebnisse bisher eine Ausnahme. Dennoch betrachten die Autoren signifikante Effekte für die anfälligsten Mitglieder der Bevölkerung als wissenschaftlich plausibel. Wichtigster Grund für die bisher mangelnde empirische Absicherung von Gesundheitsschäden durch Verkehrslärm dürfte deren schwierige Abgrenzung gegenüber anderen Ursachen sein. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass

---

[1] UMWELTBUNDESAMT, 2000 , S. 39.

[2] GEßNER, WEINREICH, 1998 , S. 4.

[3] SOMMER, SUTER, HÖIN, 1998 , S. 17.

[4] SOMMER, SUTER, HÖIN, 1998 , S 19ff.

[5] UMWELTBUNDESAMT, 2000 , S. 291.

die entstehenden Krankheitsbilder eher unspezifisch sind. Gerade den multikausalen Faktoren Stress und Schlafstörungen kommt bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Bluthochdruck eine zentrale Rolle zu[6]. Diese Einflussgrößen stehen auch bei der Entstehung von lärmbedingten Gesundheitsschäden an zentraler Stelle, wie die folgende Graphik aus Porter u.a. dokumentiert.

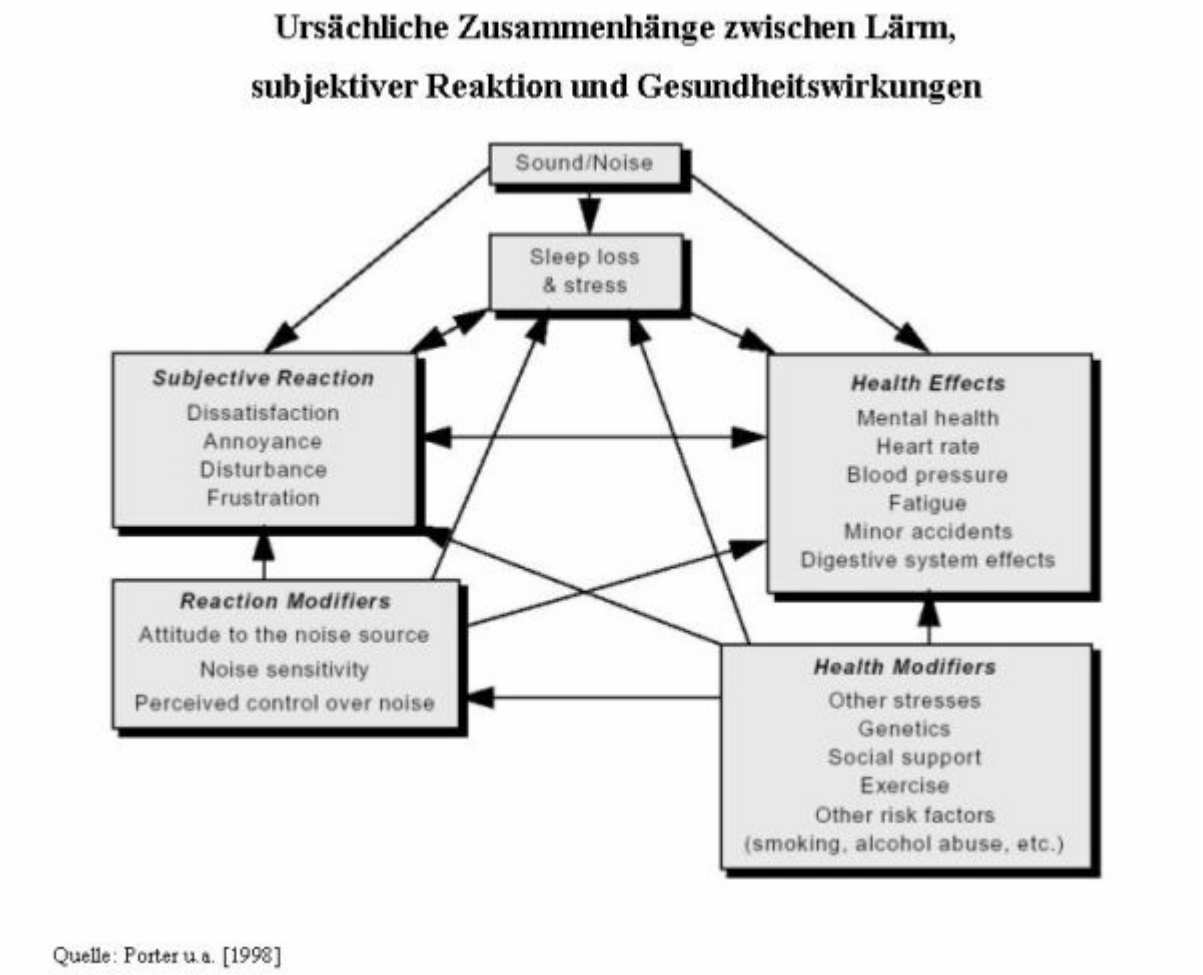


Abbildung 1: Wirkungszusammenhänge von Lärm und Gesundheit

Aus der Abbildung geht auch hervor, dass Lärm zwar ein Risikofaktor für Gesundheitsschäden ist, das tatsächliche individuelle Risiko für stressbedingte Erkrankungen jedoch von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen abhängt. Gleichfalls wird deutlich, dass bei den Beziehungen zwischen einzelnen Lärmwirkungen (Schlafstörungen und Stress, subjektive Belästigung, Erkran-

[6] SOMMER, SUTER, HÖIN, 1998 , S. 23.

kungen) keine einfachen Linearitäten existieren. Auch diese Interdependenzen erschweren die korrekte Einschätzung und Quantifizierung von Lärmwirkungen[7], die wichtige Voraussetzungen z.B. für eine Monetarisierung von Lärmschäden ist.

2.2 Quellen von Lärm an Schienenfahrwegen

Bei der Bewertung von Schienenverkehrslärm sind verschiedene Quellen von Lärmemissionen zu berücksichtigen:

- Geräusche des Antriebs und der Hilfsagreggate
- Rollgeräusche
- Aerodynamische Geräusche

Im Geschwindigkeitsspektrum von etwa 60 km/h bis 300 km/h ist das Rollgeräusch die dominierende Schallquelle. Unterhalb von 60 km/h wird das Geräusch durch die Antriebe dominiert, oberhalb von 300 km/h durch aerodynamische Einflüsse.[8]

Die Zuggeschwindigkeit ist ein wichtiger Parameter bei für den resultierenden Schallpegel. Die Antriebsgeräusche bestimmen die Emissionen bei langsamer Fahrt oder im Stand, z.B. im Bahnhofsbereich. In den meisten Betriebssituationen an der freien Strecke dominiert das Rollgeräusch. Aerodynamische Geräusche treten erst oberhalb von 200 km/h in den Vordergrund. Für den resultierenden Schallpegel gilt jedoch, dass die bei der betrachteten Geschwindigkeit dominierende Geräuschquelle völlig von der Stärke der jeweiligen Quellen abhängt.

[7] PORTER, u.a., 1998 , S. 18.

[8] WIEMERS, 2005 . S. 19.

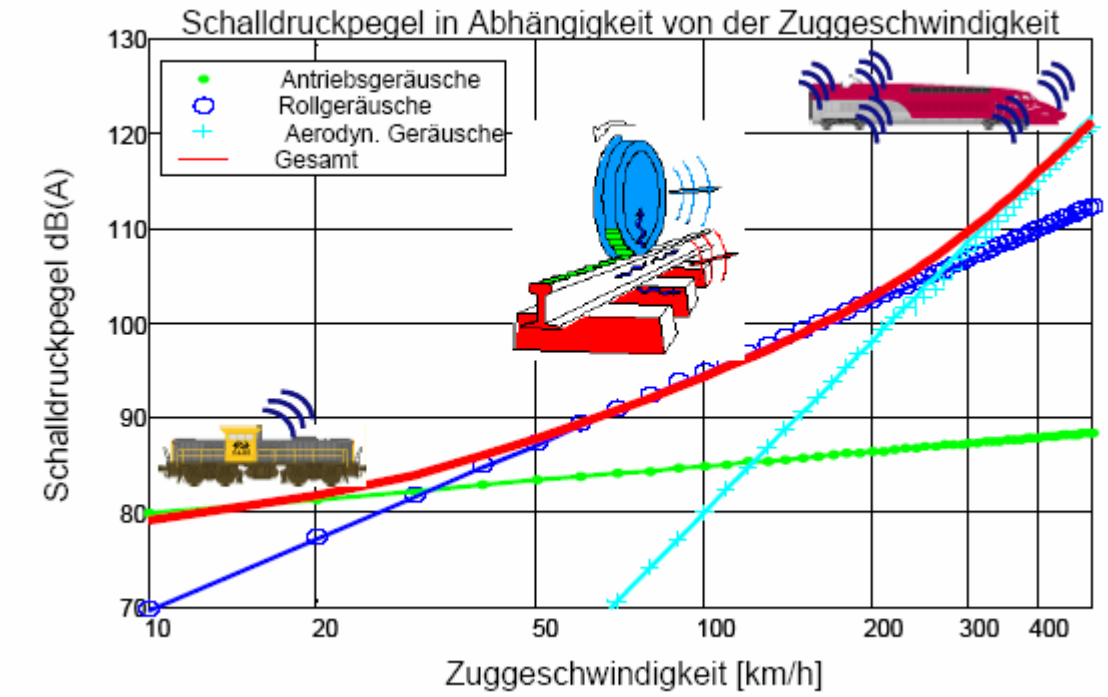


Abbildung 2: typischer Geschwindigkeitsabhängiger Einfluss der Schallquellen
Quelle: [EC, 2003 , S.19]

Wiemers[9] *sieht* im Falle Güterwagen den größten Anteil an der Entstehung von Schall bei der Schiene (30 – 50 %) und beim Rad (45 – 50 %). Beide Faktoren haben gleichzeitig auch die größte Spannbreite aller Einflussparameter.

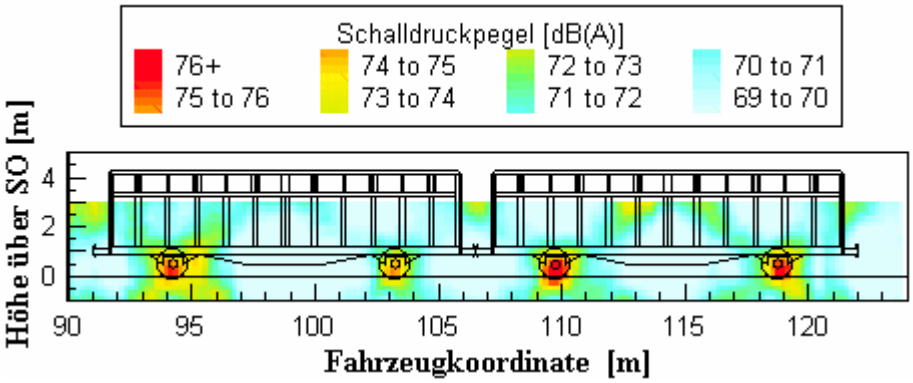


Abbildung 3: Schallquellen beim Güterwagen
Quelle: www.akustik-data.de

[9] WIEMERS, 2005.

2.3 Entstehung des Rollgeräuschs

Das Rollgeräusch wird maßgeblich beeinflusst durch die Bauform des Fahrwegs und die Beschaffenheit von Schiene und Rad. Dabei haben die Zuggeschwindigkeit und die Summenrauhigkeit von Schiene und Rad den größten Einfluss auf den resultierenden Schalldruckpegel. Vom Rad werden vor allem Frequenzen über 1000 Hz abgestrahlt. Die Schiene ist für das Spektrum unter 1000 Hz verantwortlich.[10]

Bedingt durch die Rauhigkeit von Rad und Schiene werden beide zu Schwingungen angeregt. Die Amplitude dieser Schwingungen hängt dabei von der Geometrie der auftretenden Störgrößen (Rauhigkeit, Oberflächenfehler) und der Geschwindigkeit, mit der die Strecke befahren wird, ab. Die auftretenden Störungen bewirken eine Beschleunigung in Vertikalrichtung, die mit den Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Kurzwellige Fehler haben dabei eine deutlich höhere Schwingungsanregung zur Folge.[11] (Abbildung 4)

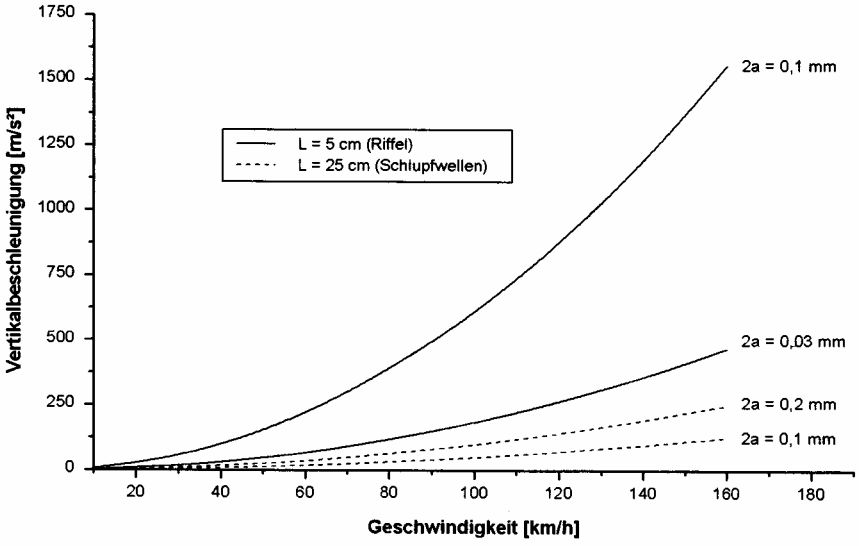


Abbildung 4: Schwingungsanregung in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Störgröße Quelle: [HEMPE, 2006, S 40]

[10] WIEMERS, 2005 , S. 19.

[11] HEMPE, 2006 , S. 37ff.

Die dergestalt in das System aus Rad und Schiene eingeleiteten Beschleunigungen erfahren in der Realität eine Dämpfung, insbesondere durch die elastische Lagerung der Schwellen. Diese wirkt in erster Linie in der Schiene. Das Rad erfährt durch den Kontakt ebenfalls eine Dämpfung, allerdings in geringerem Ausmaß[12]. In Abbildung 5 ist der berechnete Verlauf der resultierenden Vertikalkräfte (Q-Kräfte) dargestellt. Gut erkennbar ist der Dämpfende Anteil der Schwellenlagerung im Abstand von 0,6 m.

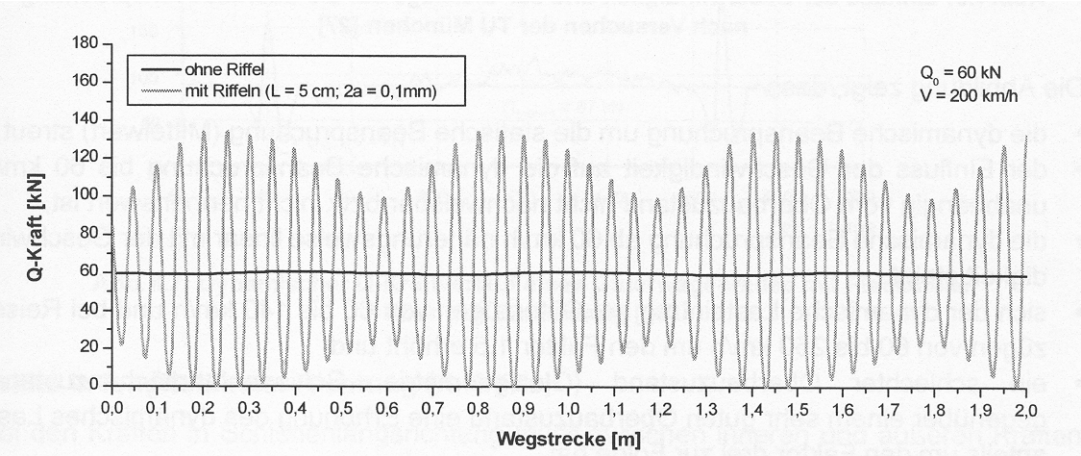


Abbildung 5: Vertikalkräfte auf das Rad auf veriffelter Fahrbahn
Quelle: [HEMPE, 2006, S. 41]

Die resultierende Schallabstrahlung wird also einerseits durch Amplitude und Frequenz der eingeleiteten Beschleunigungen bestimmt. Beim Rad entscheiden zusätzlich Bauform und Art im Wesentlichen über die Höhe und den Frequenzinhalt des abgestrahlten Schalls[13]. (Abbildung 6)

[12] WIEMERS, 2005 , S 23.

[13] WIEMERS, 2005 , S. 23.

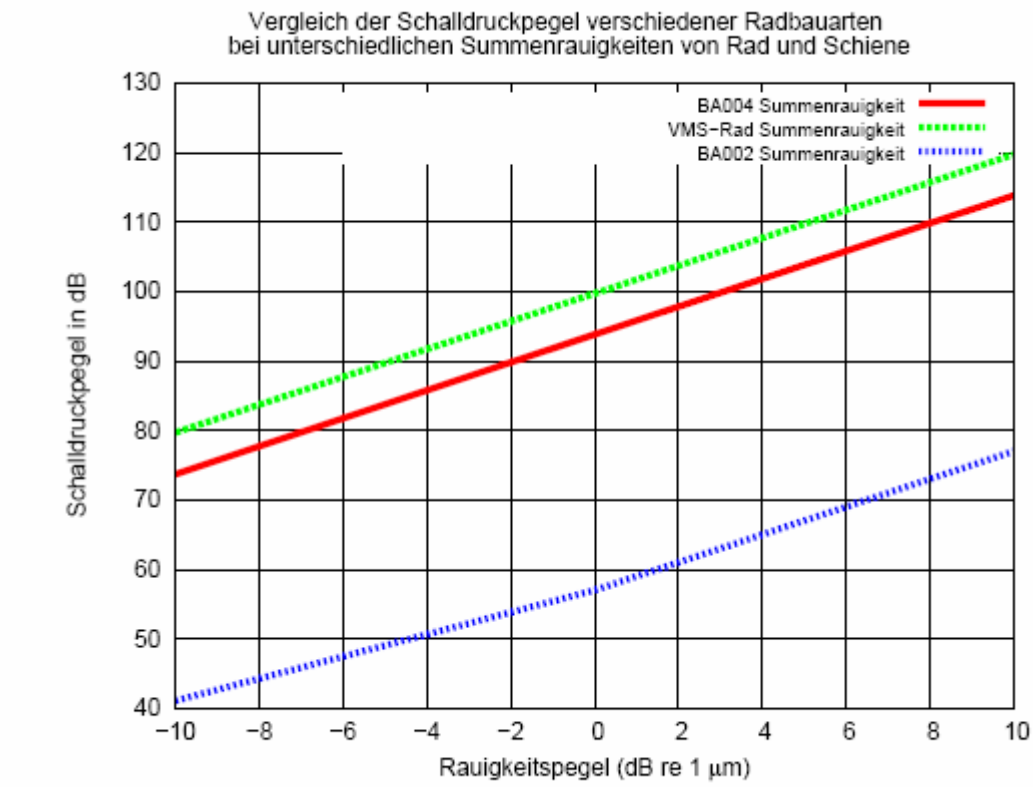


Abbildung 6: Einfluss von Rauhigkeit und Bauart des Rades auf den Schallpegel
Quelle: [WIEMERS, 2005 , S. 73]

2.4 Maßnahmen zur Minderung des Rollgeräuschs

Folgende Maßnahmen kommen in Betracht um das Rollgeräusch als maßgeblich Quelle von Schienenverkehrslärm zu reduzieren[14] (Abbildung 7):

[14] [lbrxID6] vgl für viele: GEßNER, 2002.

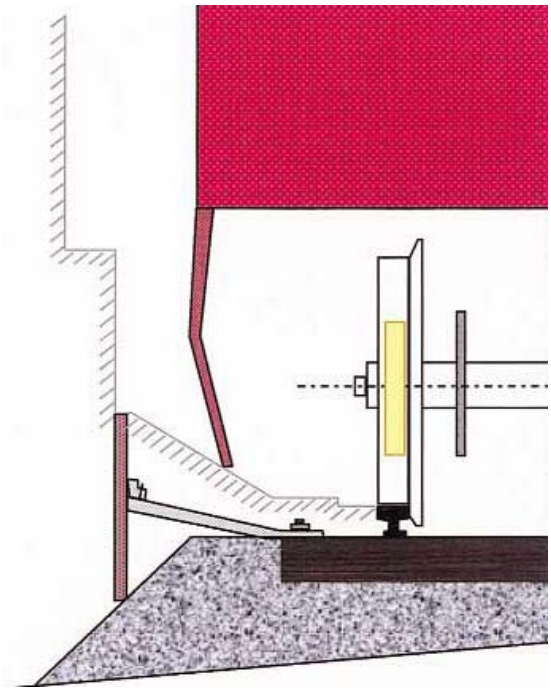


Abbildung 7: Mögliche Lärmreduktionsmaßnahmen am Fahrzeug und am Gleis
Quelle: [GEßNER, 2002 , S. 24]

- Schienenschleifen zur Reduktion der Rauigkeit
- Sicherstellung einer glatten Radlauffläche durch Einsatz von Verbundstoff-Bremssohlen (K- oder LL-Sohle) oder Scheibenbremsen
- Bedämpfung des Rades
- Reduktion der Körperschallübertragung vom Rad auf den Wagenkasten
- Einsatz lärmarmer, gleisschonender Drehgestelle insbesondere für den Güterverkehr
- Bedämpfung von Schiene und Fahrbahn

Als wirkungsvollste Maßnahme sieht Gessner[15] die Minderung der Schallentstehung durch Gewährleistung geringer Rauhigkeiten an Rad und Schiene an. Die glatte Schienenoberfläche wird durch regelmäßiges Schleifen gewährleistet. Raue Radlaufflächen treten insbesondere bei Güterwagen mit Klotzbremse und Grauguß-Bremssohlen (GG-Sohlen) auf. Der Einsatz von Ver-

[15] GEßNER, 2002.

bundstoff-Bremssohlen (K- oder LL-Sohlen) vermindert die Aufrauung der Räder. Gessner gibt eine mögliche Minderung der Schallemission von 7 – 9 dB(A) durch diese Maßnahmenkombination an. Es muss dabei sichergestellt werden, dass eine geringe Rauhigkeit von **Rad und Schiene** gewährleistet sind.[16] (Abbildung 8)

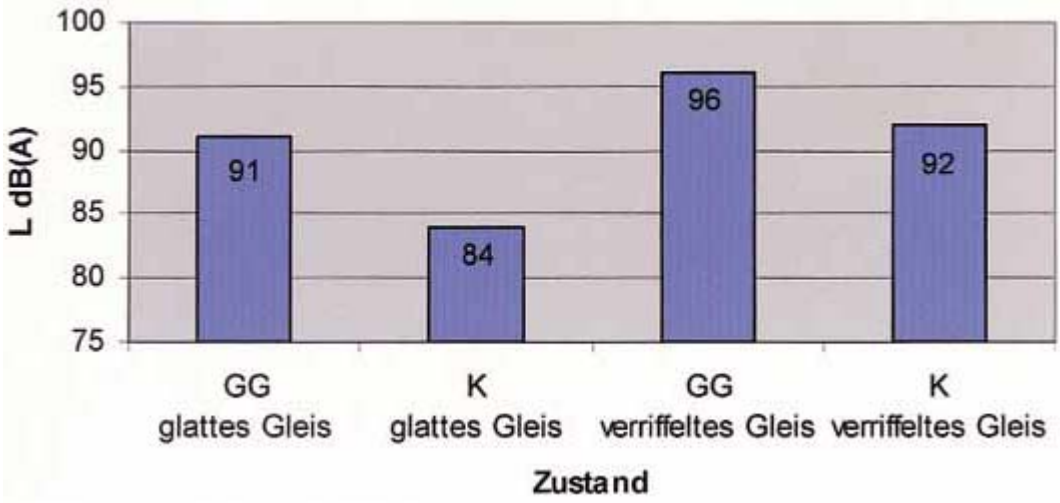


Abbildung 8: Schalldruckpegel bei unterschiedlichen Rauhigkeiten von Rad und Schiene (7,5 m Abstand von GM, V= 80 km/h, Güterwagen leer)
Quelle: [GEßNER, 2002, S. 24]

2.5 Maßnahmen zur Minderung der Schallausbreitung

Neben einer Minderung der Schallentstehung durch Maßnahmen am Fahrzeug und am Gleis, bestehen auch Möglichkeiten zur Minderung der Schallausbreitung. In Form von Schallschutzwänden oder Schallschutzfenstern ist dies die bislang am häufigsten angewandte Form des Lärmschutzes. Schallschutzwände sind mit hohen Kosten verbunden und aufgrund von optischer Wirkung und Trennfunktion raumordnerisch negativ zu beurteilen. Schallschutzfenster haben eine nur geringe Wirkung, insbesondere, da sie nur im geschlossenen Zustand und im Innenbereich wirken. Dass bislang trotzdem überwiegend diese Lärmschutzmaßnahmen zum Einsatz kamen, hat vorrangig folgende Gründe:

[16] GEßNER, 2002 , S. 24.

- Lärmschutzbestimmungen gelten bislang national. Auf die Beschaffenheit und damit die Lärmemissionen von ausländischen Fahrzeugen hatten die entsprechenden nationalen Behörden bislang keinen Einfluss.
- Grenzwerte für Fahrzeugemissionen gab es bislang nur in wenigen Ländern.
- Das Wissen über mögliche aktive Lärmminderungsmaßnahmen am Fahrzeug und Gleis und deren Kosten / Nutzen - Wirkungen ist erst in jüngerer Vergangenheit verfügbar und den Entscheidungsträgern bekannt. [17]

Die **Höhe von Schallschutzwänden** ist abhängig von dem jeweils zu vermindernden Schallpegel. Die durchschnittliche Höhe beträgt derzeit 3,50 m über SOK[18].

Der durch Schallschutzwände erzielbare Lärmschutz ist abhängig von

- der konstruktiven Gestaltung
- der Höhe
- dem Abstand vom Gleis
- der topographischen und baulichen Verhältnisse zwischen Emissions- und Immissionsort.

Das Umweltbundesamt hat in Zusammenarbeit mit der DB AG die Wirkung von gleisnahen Niedrig- (76 cm über SOK) und Niedrigstwänden (35 cm über SOK) getestet, wobei die Höhe durch das freizuhaltende Lichtraumprofil des Fahrwegs begrenzt wurde. Die Abschirmwirkung war jedoch bei zweigleisigen Strecken für das entfernt liegende Gleis aufgrund des großen Abstandes nur noch sehr gering. Für eine ausreichende Schalldämmung müssten demnach beide Gleise auf der zu schützenden Seite eine Niedrigwand erhalten, womit die Investitionskostenersparnis verloren geht. Niedrigstwände erzielten nur in **Kombination mit Radschürzen** an den Fahrzeugen die gewünschte Wirksamkeit. (Abbildung 7) Zudem hat der verringerte Abstand zwischen Schallschutzwand und Gleis Probleme bei der Unfallverhütung für Streckenwartungs-

[17] EC, 2003 , S. 24.

[18] DANZER, 2003 , S. 63.

personal, Transporten mit Lademaßüberschreitung und Oberbauinstandhaltungsarbeiten bei Schotteroberbau zur Folge.[19]

Schallschutzwälle schirmen bei grundsätzlich gleicher Wirkungsweise wie der von Schallschutzwänden den Schall schlechter ab, da die Wallkrone in größerer Entfernung zur Lärmquelle liegt. Im allgemeinen fügen sich Wälle allerdings besser in das Landschaftsbild ein.

Die **abschirmende Wirkung** von Schallschutzwänden oder -wällen wird nach der Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen[20] berechnet.

2.6 Rechtliche Grundlagen und Förderung von Schallschutzmaßnahmen

2.6.1 Fahrzeuggrenzwerte

Erst seit jüngster Vergangenheit existieren Regelungen, die den maximalen **Emissionspegel** von Eisenbahnfahrzeugen festlegen. Mit der TSI Lärm, die am 23.Juli 2006 in Kraft trat, wurden verbindliche Geräuschgrenzwerte verankert, welche für neuzugelassene und im internationalen Verkehr eingesetzte Fahrzeuge gelten. Für Güterwagen liegen die Grenzwerte für das Fahrgeräusch zwischen 82 und 87 dB(A), der Schallpegel für Diesellokomotiven bei 75 dB(A)[21]. Aufgrund der langen Lebenszeiten von Schienenfahrzeugen werden Lärm-Grenzwerte, die nur für Neufahrzeuge gelten, nur sehr langfristig zu einer Reduktion der heutigen Lärmbelastung führen.

2.6.2 Lärmschutz bei Neu- und Ausbau

Hinsichtlich der rechtlichen Situationen für **Immissionen** gelten in Deutschland die Vorgaben der 16. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) von 1990. Gemäß dieser gelten an **Neubaustrecken** und Strecken, an denen **wesentliche Änderungen** vorgenommen wurden, festgeschriebene Immissionsgrenzwerte, z.B. in reinen und allgemeinen Wohn- sowie in Kleinsiedlungsgebieten von tags 59 dB(A) und nachts 49 dB(A). "Diese Grenzwerte definieren Schalldruckpegel-Werte, die in der Umgebung der Verkehrswege, z.B. in angrenzenden Wohngebieten, im zeitlichen Mittel nicht überschritten werden dürfen. Dies bedeutet, einzelne Fahr-

[19] GEßNER, 2002 , S. 25.

[20] SCHALL03.

[21] SPIEGEL, GROOTINGS, 2006.

zeuge dürfen höhere Schalldruckpegel verursachen, wenn anschließend lange genug kein weiteres Fahrzeug vorbei fährt."[22]

Die Bundesimmissionsschutzverordnung enthält unter anderem die Rechenvorschrift (Beurteilungsverfahren) zur Ermittlung der betroffenen Gebäude an Schienenfahrwegen. Die Berechnung ist vom Gesetzgeber zwingend vorgeschrieben. Messungen sind dagegen nicht vorgesehen. Einfluss auf die berechnete Höhe der Immissionen haben insbesondere

- die Anzahl der Schienenfahrzeuge,
- die Art der Schienenfahrzeuge,
- die Geschwindigkeit,
- die Fahrbahnart (Schotteroberbau, Feste Fahrbahn etc.),
- der Abstand des Immissionsortes zum Schienenweg etc.

Überschreitet die errechnete Belastung die Immissionsgrenzwerte, sind seitens der Bahn Schallschutzmaßnahmen vorzusehen. Dabei haben bauliche Schallschutzmaßnahmen an der Eisenbahninfrastruktur (z.B. Schallschutzwände) Priorität. Liegen die Kosten für derartige Schutzmaßnahmen jedoch unverhältnismäßig hoch, muss auf passive Maßnahmen wie Schallschutzfenster und schallgedämpfte Permanentlüftungssysteme zurückgegriffen werden.

2.6.3 Lärmsanierung

Für **bestehende Anlagen** sind für die Eisenbahn in Deutschland dagegen keine Grenzwerte vorgegeben. Das 1999 gestartete Programm des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) für "Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen des Bundes" stellt Mittel für Lärmschutzmaßnahmen an bestehenden Strecken bereit. Im Rahmen einer mit der DB AG erstellten Gesamtkonzeption wurden dabei Streckenabschnitte identifiziert, an denen aufgrund der Schallemissionen Lärmschutzmaßnahmen prioritär umgesetzt werden sollen. Dabei sind folgende Maßnahmen – einzeln oder in Kombination – förderfähig:

„An der Entstehungsquelle (aktiver Lärmschutz) an Bahnanlagen wie z.B.

- Errichtung von Lärmschutzwänden oder -wällen,

[22] RATKA, SCHNEIDER, HACHMANN, 2003 , S. 706.

- Einbau von Spurkranzschmiereinrichtungen in engen Gleisbögen,
- Maßnahmen zur Lärmminderung an Brückenbauwerken, "Besonders überwachtes Gleis" mit frühzeitigem Schienenschleifen bzw.

an der Einwirkungsstelle (passiver Lärmschutz) an baulichen Anlagen wie z.B.

- Einbau von Schallschutzfenstern und Lüftungseinrichtungen.“ [23]

2.6.4 Nationales Verkehrslärmschutzpaket

Im Februar 2007 hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung ein nationales Verkehrslärmschutzpaket für alle Verkehrsbereiche vorgestellt, das neue und bereits laufende Maßnahmen zum Thema Lärmschutz bündelt.[24] Vorrangiges Ziel des Konzeptes ist eine **Vermeidung und Begrenzung von Lärm an der Quelle**.

Das BMVBS verfolgt im Verkehrslärmschutzpaket 3 Strategien. Diese werden im Folgenden für den Bereich Eisenbahn näher erläutert.

Planerische und administrative Lärmvorsorge

Neben der Verschärfung der Geräuschgrenzwerte für Fahrzeuge wird u.a. das Konzept eines Trassenpreissystems thematisiert, das höhere Trassenpreise für laute Fahrzeuge fordert. Dies könnte ein wirtschaftlicher Anreiz für eine schnelle Umrüstung alter Güterwagen auf die lärmreduzierende Verbundstoff-Bremssohle sein.

Lärmreduktion durch technische Innovationen und Forschung

Die Verkehrslärmforschung zielt vorrangig auf die Bereiche Lärmoptimierung von Fahrzeugen und die Wirkung von Verkehrslärm auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit.

Die Bundesregierung fördert in diesem Zusammenhang neben dem Projekt High Speed Grinding u.a. folgende Projekte:

- die Entwicklung eines lärmarmen Güterzuges,

---

[23] BMVBS: Lärmsanierungsprogramm des Ministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

[24] BMVBS, Nationales Verkehrslärmschutzpaket, 02.02.2007.

- die Erhöhung der Wirksamkeit von Lärmschutzwänden durch speziell geformte Oberkanten.

Lärmsanierung, Investitionen, Lärmaktionspläne

Für die Lärmsanierung an Schienenwegen stehen im Jahr 2007 100 Mio. Euro primär für Schallschutzwände zur Verfügung. Als Bedarf für die Gesamtkonzeption zur Lärmsanierung werden jedoch 2,5 Mrd. Euro geschätzt. Hohen Nachholbedarf an Lärmsanierungsmaßnahmen haben dabei die Schienenwege der Eisenbahnen des Bundes.

Weiterhin soll im Fahrzeugbereich die schnelle Umrüstung aller in Europa verkehrenden Güterwagen auf die lärmarme Bremssohle (K-Sohle) vorangetrieben werden.

3 Schienenschleifen als Maßnahme zur Lärmreduktion

3.1 Arten und Ursachen von Schienenfehlern

Schienen unterliegen im Laufe ihrer Nutzung materialseitigen Veränderungen. Dies können einerseits geometrische Schienenfehler sein, andererseits materialseitige Schädigungen.

Zur Gruppe der geometrischen Schienenfehler, auch als Fahrflächenfehler bezeichnet, zählen:

- Riffeln,
- Schlupfwellen,
- Proflilschädigungen,
- Schäden an Schweißnähten,
- u.a.

Schädigungen des Schienenwerkstoffs liegen vor bei:

- Head Checks,
- Belgrospis
- Squats,
- u.a..

Die Auswirkungen von Schienenfehlern können im schlimmsten Fall eine Gefährdung der Betriebssicherheit sein, wenn die Spurtreue nicht mehr gewährleistet ist, oder Fahrzeug und Fahrweg übermäßigen dynamischer Lasten ausgesetzt sind, die zu Materialermüdungen führen können. Des weiteren führen Schienenfehler zu Erschütterungen im Fahrzeug und mindern den Fahrkomfort. Wie bereits in (Kap. 2.3) erläutert, sind Schienenfehler auch die Ursache für eine erhöhte Lärmbelastung.

Besonders gefährlich sind durch Rollkontaktermüdung entstehende Fehler, die zu Rissen an der Schienenoberläche führen, wie z.B. Head Checks oder Sqats. Diese müssen frühzeitig behoben werden, um eine nachhaltige Schädigung des Schienenwerkstoffes zu verhindern.

Zur Erläuterung sollen im folgenden die wichtigsten Schienenfehler kurz dargestellt werden. Für Details zu Entstehung, Detektion und Auswirkungen sei z.B. auf [*LICHTBERGER, 2003]* verwiesen.

3.1.1 Geometrische Schienenfehler

Riffel

Riffel entstehen durch Reibung, Schlupf und Schwingungsvorgänge zwischen Rad und Schiene. Es handelt sich um kurzwellige Fahrflächenunebenheiten mit Wellenlängen von 20 – 100 mm und Riffeltiefen zwischen etwa bei 0,1 – 0,4 mm. Riffel entstehen hauptsächlich auf geraden Gleisen und in Bögen mit großem Halbmesser.

Riffel gefährden die Sicherheit des Betriebs nicht, führen jedoch einer erhöhten Lärmbelästigung. Durch erhöhte dynamische Belastung infolge von Riffeln kommt es zu höheren Instandhaltungsaufwendungen am Gleis, z.B. durch abgerissene Schienenbefestigungen.[25]

Abbildung 9: Riffel
Quelle: [HEYDER, 2002]

Schlupfwellen

Schlupfwellen entstehen durch Schlupf im Bogen. Es handelt sich um Fahrflächenunebenheiten mit Längen von 30 – 300 mm und einer Fehleramplitude von etwa 0,3 – 1 mm. Sie treten zumeist in Bögen mit engem Radius (< 500 m) auf und liegen zumeist an der bogeninneren Schie-

[25] LICHTBERGER, 2003 , S. 124 ff.

ne. Im Gleisbogen können bei kurzen Wellen Amplituden bis 0,3 mm toleriert werden. Ab diesem Wert drohen infolge dynamischer Beanspruchungen Gleislagefehler[26].

Abbildung 10: Schlupfwellen
Quelle: [HEYDER, 2002]

[26] LICHTBERGER, 2003 , S. 124.

Profilveränderungen

Abbildung 11: Profilverschleiß
Quelle: FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, S. Koch

Infolge der Fahrzeugeinwirkung bilden sich an der bogenäußeren Schiene Verschleißerscheinungen am seitlichen Profil durch Materialabrieb. Die bogeninnere Schiene verschleißt hingegen nur in der Höhe.

Der Höhenverschleiß in geraden Gleisen oder großen Bögen liegt bei etwa 0,7 – 1 mm je 100 Mio. Lasttonnen (Lt)[27]. Der seitlich Verschleiß in Abhängigkeit von Schienengüte und Bogenradius ist in Abbildung 12 dargestellt.

[27] LICHTBERGER, 2003 , S. 113.

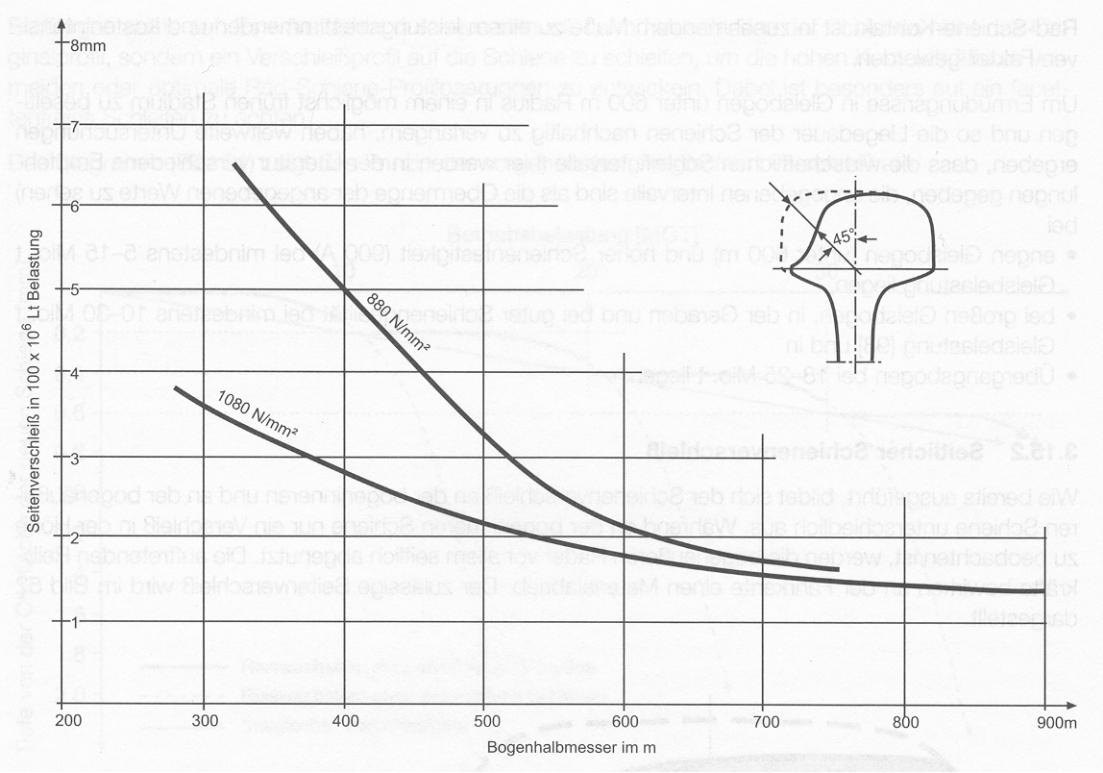


Abbildung 12: Seitliche Verschleißrate in Abhängigkeit vom Bogenradius
Quelle: [LICHTBERGER, 2003 , S. 114]

3.1.2 Schienenfehler aufgrund von Veränderung der Materialstruktur

Head Check

Head Checks sind eine Folge von Rollkontaktermüdungserscheinungen. Sie entstehen dort, wo die dynamische Beanspruchung der Schiene am größten ist:

- an der Fahrkante von bogenäußeren Schienen (R=400-1500m) und
- abwechselnd an beiden Schienen in geraden Gleisen.

Ursache für Head Checks sind Längsspannungen infolge von Schlupf der Räder. Die Folge sind plastische Verformungen, die zu Mikrorissen führen. Head Checks können gefährliche Ausbrüche oder Dauerbruch zur Folge haben.

Abbildung 13: Head Check
Quelle: FG Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, S. Koch

Belgrospis

Belgropsis treten nur im Zusammenhang mit Riffelschäden auf. Es handelt sich um Rissnester im Abstand von Riffelbergen (20 – 100mm) als Zeichen der Rollkontaktermüdung. Die Rissnester haben eine Ausdehnung von etwa 5 – 15 mm.

Ursache für Belgropsis sind hohe dynamische Lasten an verriffelter Schiene, die kurz vor dem Riffelberg zu einer Bildung der Rissnester führen. Sie treten überwiegend im HGV mit entsprechend hohen dynamischen Radlastschwankungen auf.

Abbildung 14: Belgrospis
Quelle: [HEYDER, 2002]

Sqats

Sqats sind halbkreis- oder v-förmige, überwiegend zur Fahrkante hin offene Risse bei gleichzeitiger Einsenkung der Schienenkopfoberfläche. Squats bilden sich auf den stark beanspruchten Stellen der Fahrflächen gerader Schienen oder in großen Bögen hauptsächlich im HGV. Die Ursachen für Sqaus sind derzeit noch nicht vollständig bekannt.[28]

Abbildung 15: Sqat
Quelle: [HEYDER, 2002]

[28] LICHTBERGER, 2003 , S. 105.

3.2 Aufgaben des Schienenschleifens

Das Schleifen der Schienenoberfläche wird mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt:

Einerseits findet Schleifen zum Zweck der **Instandhaltung** statt. Darunter fallen:

- Die Wiederherstellung des Schienenprofils,
- die Beseitigung von Rissen an der Oberfläche zur Vermeidung von Folgeschäden,
- das Abschleifen von Bereichen der Rollkontaktermüdung und
- das Beseitigen von Riffeln zur Vermeidung von Folgeschäden.

Durch das Schleifen und Reprofilieren kann die Lebensdauer der Schienen um mindestens 100 Mio Lt verlängert werden. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit wird ein Schleifen am einer Riffelamplitude von 0,05 mm empfohlen. Ab 0,1 mm Amplitude droht eine Verschlechterung der Gleislage und Lockerung von Befestigungsmitteln.[29]

Des weiteren erfolgt das Schleifen von Schienen unter **akustischen** Gesichtspunkten. Zur Minderung des Schallpegels im Fahrzeug und an der Strecke wird typischerweise bei einer Wellentiefe von 0,05 – 0,07 mm und einer Wellenlänge unter 100 mm geschliffen.[30] (Abbildung 17) Ziel des akustischen Schleifens ist die Minimierung der Oberflächenrauhigkeit. Daher erfolgt das Schleifen derzeit üblicherweise in Längsrichtung.. (Abbildung 16) Falls ein größerer Materialabtrag erforderlich ist, werden in der Regel Kombinationen verschiedener Schleifverfahren mit einem abschließenden Längsschliff zum Egalisieren der Oberfläche angewandt

[29] LICHTBERGER, 2003 , S. 445.

[30] LICHTBERGER, 2003 , S. 447.

Abbildung 16: Akustisches Schleifen in Längsrichtung
Quelle: [EURAILNOISE, 2003]

Neben diesen beiden Hauptformen des Schienenschleifens gibt es noch weitere Anwendungen, z.B. zum Herstellen von Sonderprofilen im Weichenbereich und in engen Gleisbögen oder zur Beseitigung eingefahrener Schienenstöße.

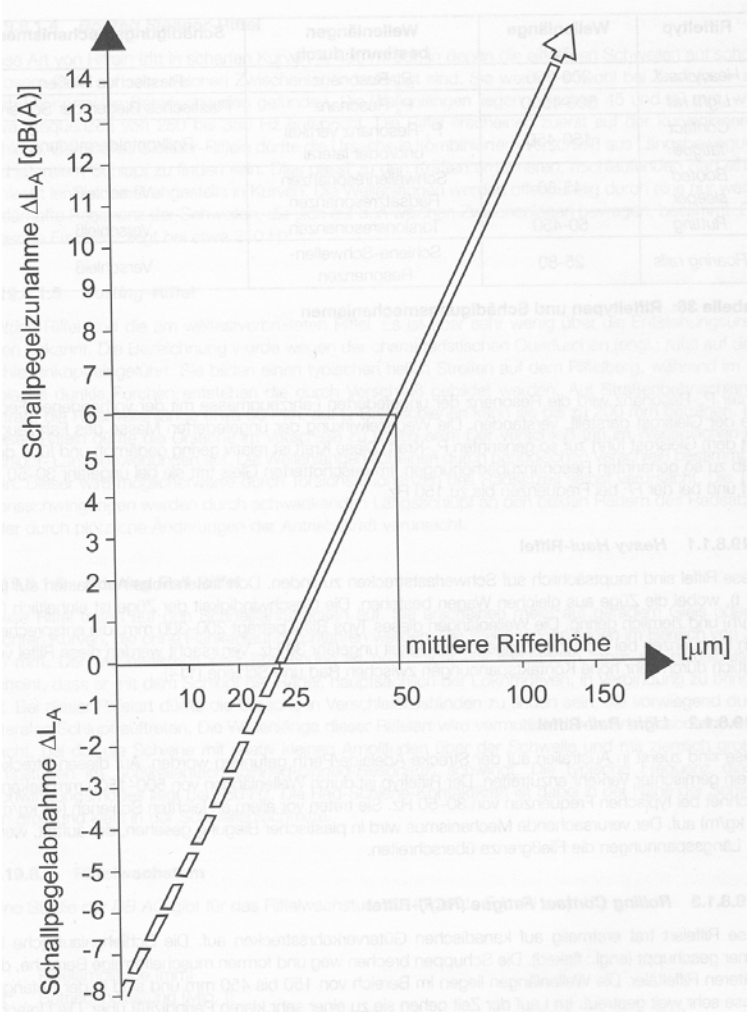


Abbildung 17: Schallpegelzunahme mit mittlerer Riffelhöhe
Quelle: [LICHTBERGER, 2003 , S. 125]

3.3 Arten des Schienenschleifens und spanabhebender Bearbeitung

Zur Beseitigung von Schienenfehlern werden verschiedene Verfahren der Oberflächenbearbeitung angewandt, die sich hinsichtlich des Materialabtragsleistung und der resultierenden Oberflächenbeschaffenheit unterscheiden.

Hobeln

Fehler ab ca 0,4 mm werden durch Hobeln des Schienenkopfes beseitigt. Dabei wird das Schienenprofil wieder hergestellt. Die Fertigmeterleistung ist abhängig von Fehlerart und -größe und der gewählten Schnitttiefe (von 0,2 mm bis 2,5 mm). Die Leistung wird mit 250-300 m Gleis/Stunde angegeben, bei reiner Fahrkantenbearbeitung mit 600-800 m Gleis/Stunde.

Schlupfwellen mit 0,5 mm Tiefe und Querprofilfehler bis 2,5 mm wurden mit 250 m Gleis/Stunde gehobelt.[31] Das Hobeln erzeugt eine sehr glatte Oberfläche mit Rauhigkeiten von weniger als 1 µ. Allerdings werden die im Sinne einer Lärmreduktion angestrebten niederigen Schallpegel nicht erreicht. Der Grund dafür wird in der entstehenden Polygonkontur im Bereich der Fahrfläche gesehen.[32]

Fräsen

Beim Schienenfräsen können je Arbeitsgang bis zu 1,5 mm bei einer Arbeitsgeschwindigkeit bis zu 1,5 km/h abgehoben werden. Der Einsatz der Schienenfräse ist für größere Schienenfehler gedacht, ferner für die separate Bearbeitung der Fahrkante (Herstellung der Geradlinigkeit der Schienen, Beseitigung von Head Checks, Spurverengungen, Umprofilierung eines bestehenden Schienenkopfprofils, Beseitigung von Entgratungen).

Die Fräsköpfe erzeugen jedoch eine relativ raue Oberfläche, so dass oft eine Kombination aus Fräs- und Schleifverfahren eingesetzt wird. Mittels nachlaufender Schleifsteine wird die beim Fräsen entstehende Facettenstruktur geglättet und so eine akustische sehr leises Fahrfläche erzeugt.[33]

Schleifen

Die traditionellen Schleifverfahren unterteilen sich in Verfahren mit rotierenden Topfscheiben und oszillierende/statische Verfahren mit axial bewegten Schleifsteinen.

Beim Schleifen mit **rotierenden Scheiben** können Oberflächenfehler beseitigt werden und das Schienenprofil innerhalb gewisser Grenzen wiederhergestellt werden. Pro Schleifdurchgang ist ein Materialabtrag von etwa 0,2 mm bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von etwa 6-7 km/h möglich.[34] Das Schleifen mit rotierenden Scheiben ist mit Funkenflug verbunden, was in brandgefährdeten Gebieten beachtet werden muss.

Das resultierende Schleifbild ist im Sinne der Instandhaltung von ausreichender Güte und weist eine Oberflächenrauhigkeit im Bereich der Fahrfläche von 4 – 6 µ auf. Zur Minimierung der

[31] Technische Angaben zur Maschinenleistung der Fa. Schweerbau, Stadthagen

[32] HARTLEBEN, 2003 , S. 24

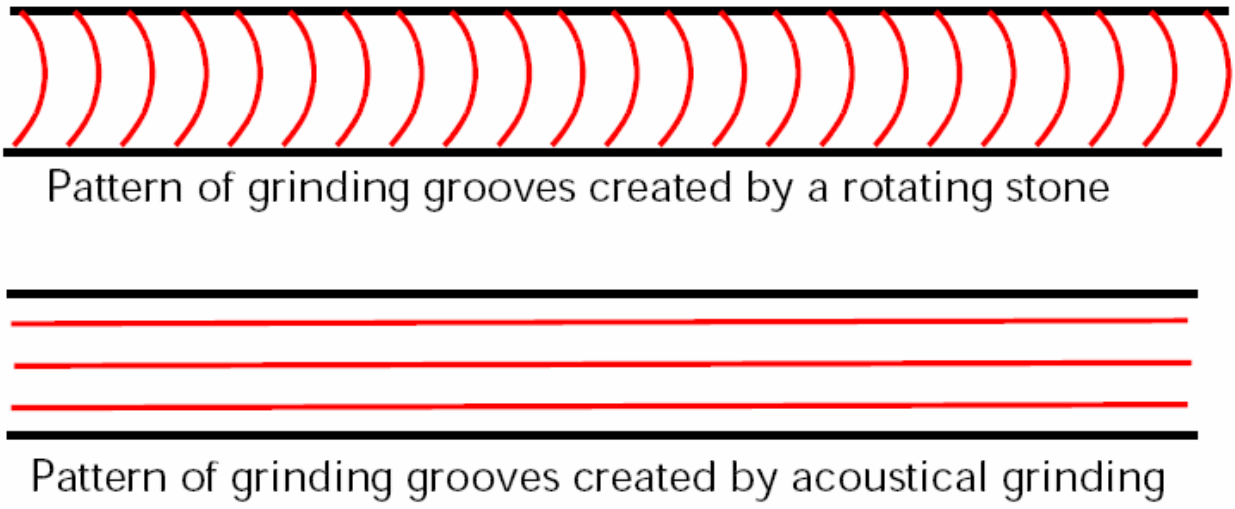
[33] HARTLEBEN, 2003 , S. 24

[34] LICHTBERGER, 2003 , S. 447 f.

Schallemission sollte die durch den Werkzeugeinsatz verbleibende Polygonkontur mittels einer nachlaufenden Schleifvorrichtung in Längsrichtung egalisiert werden.[35] (Abbildung 18)

Das Schleifen mit **oszillierenden Schleifsteinen** ermöglicht nur die Beseitigung von Oberflächenfehlern, jedoch keine Reprofilierung der Schienen. Der mögliche Materialabtrag liegt bei etwa 0,05 – 0,07 mm je Überfahrt.[36] Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt 1 -1,5 km/h. Durch die Vermeidung von Funkenflug ist das Verfahren auch in brandgefährdeten Gebieten und in Tunneln geeignet. Das resultierende Schleifbild ist geprägt von sehr geringen Rauhigkeiten insbesondere in Schienenquerrichtung. Daher ist das Verfahren auch unter Gesichtpunkten des Schallschutzes besonders geeignet zur Beseitigung von Riffeln und zum Präventivschleifen von Neuschienen.[37]

Abbildung 18: Schleifbilder von rotierenden Scheiben und Schleifsteinen



Quelle: [EURAILNOISE, 2003]

High-Speed Grinding HSG

Beim Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG – High Speed Grinding) wird bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h ein geringer Materialabtrag von etwa 0,05 mm realisiert. Das Verfahren der Fa. Stahlberg Roensch GmbH & Co KG basiert auf schräg angestellten rotationssysmetrischen Schleifkörpern, die durch den Schlupf zur Schiene in Drehung versetzt werden.

[35] HARTLEBEN, 2003 , S. 24.

[36] LICHTBERGER, 2003 , S. 449.

[37] LICHTBERGER, 2003 , s. 448 ff.

Abbildung 19) Bei diesem Schleifverfahren wird die Oberfläche entlang des Schienenprofils abgetragen. Eine Reprofilierung findet nicht statt.[38] Eine Nachbehandlung mit Schleifsteinen zur Erhöhung der Oberflächengüte ist möglich.[39]

Zielsetzung des HSG ist es, mit zyklischen, in den Regelbetrieb integrierten Schleiffahrten, Oberflächenfehler der Fahrbahn zu beseitigen. Projektiert wurde das HSG-Verfahren für „Präventives Schleifen (gegen Bildung von Rollkontaktschäden), Neulagenschleifen oder Maßnahmen zur Verringerung der Lärmemissionen (BÜG)“[40].

Beim HSG können sämtlich Gleise und Weichen befahren werden. Gleisschaltmittel, etc. müssen nicht demontiert werden.[41]

Die Arbeitsgeschwindigkeit von etwa 80 km/h erlaubt ein Integration in den Regelbetrieb. Insbesondere in den Nachtstunden, in denen überwiegend Güterverkehr mit einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 80 bis 120 km/h abgewickelt wird, entstehen so keine oder nur geringe Betriebsbehinderungen.

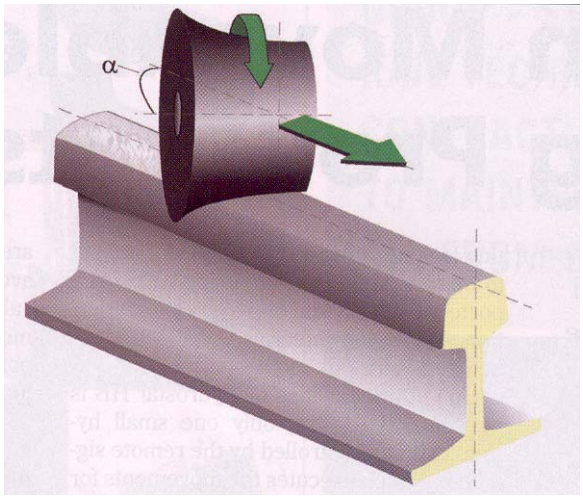


Abbildung 19: Prinzip des High-Speed Grinding
Quelle: [Taubert, 2005 , S. 41]

[38] TAUBERT, 2005 , S. 40

[39] TAUBERT, 2005 , S 41

[40] Eigendarstellung auf http://www.stahlberg-roensch.de, aufgerufen am 27.06.2007

[41] TAUBERT, 2005 , S. 41

3.4 Schleifzyklen

Es muss unterschieden werden in präventives und korrigierendes Schienenschleifen.

Präventives Schienenschleifen hat zum Ziel durch Vorhaltung einer möglichst optimalen Schienengeometrie und Oberflächenbeschaffenheit die Beanspruchung von Fahrzeug und Fahrweg zu minimieren und Folgeschäden zu vermeiden. Die Zielstellung des präventiven Schleifens folgt Aspekten der Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit, da durch die Vermeidung von Folgeschäden der Aufwand zur Erhaltung der Infrastruktur insgesamt minimiert wird. Präventives Schleifen kann prinzipiell zustandsabhängig oder fristabhängig geschehen. Für eine zustandsabhängige Durchführung muss die Beschaffenheit der Schienen ermittelt werden. Mit Hilfe von Oberflächenmesszügen kann z.B. der Abnutzungszustand des Schienenprofils während der Überfahrt festgestellt werden. Die Detektion von Rollkontaktermüdungsschäden ist jedoch bei gleisfahrbaren Inspektionsverfahren noch nicht zuverlässig möglich. Hier sind manuelle Verfahren, z.B. eine Ultraschallprüfung vom Hand notwendig.

Daher ist eine präventive Instandhaltung in der Regel nur durch kontinuierliche Schienenpflege zu realisieren. Die Schleifintervalle werden in Abhängigkeit des prognostizierten Fehlerwachstums und der tolerierten Fehlerausmaße zeit- bzw. belastungsabhängig festgelegt.[42] Für normale hoch beanspruchte Hauptgleise wird näherungsweise ein Schleifzyklus von 1 – 3 Jahren bzw 20 – 30 Mio. Lasttonnen (Lt) angegeben.[43] Für Gleisbögen werden Anhaltswerte von 5 – 15 Mio. Lt bei Radien < 600 m, 10 – 30 Mio. Lt bei großen Bögen und 18 – 25 Mio Lt in Übergangsbögen genannt.[44]

Als Richtwerte für eine Zustandsbezogene Instandhaltung gelten die in Abbildung 20 und Abbildung 21 angegebenen Werte für Oberflächenfehler und Schienenprofile:

[42] HEMPE, 2006 , S. 10f

[43] LICHTBERGER, 2003 , S. 350

[44] LICHTBERGER, 2003 , S. 113

v / Streckenart [km/h]	Fehlerart	Bereiche Wellenlänge [mm]	Instand-haltungs-richtwert [mm]	Max. zulässig [mm]
Lärmbegrenzung	Riffel	10-100	> 3 dbA[1)]	-
SFS / HAS			0,05	0,15
HAS / NFS			0,07	0,15
alle v	Kurze Wellen	100-300	0,1	0,3
v > 120	Lange Wellen	300-1000	0,5	-
v > 120		1000-3000	0,8	-
v > 140		300-3000	0,4	-

Abbildung 20: Instandhaltungsrichwerte für Oberflächenfehler
Quelle [LICHTBERGER, 2003 , S. 352]

v [km/h]	Zulässige radiale Abweichungen [mm]
120 < v ≤ 140	± 1,5
140 < v ≤ 160	± 0,7
v	± 0,5

Abbildung 21: Instandhaltungsrichtwerte Schienenprofil
Quelle: [LICHTBERGER, 2003 , S. 352]

Korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen setzen eine Überprüfung des Gleiszustandes voraus, die üblicherweise ebenfalls in regelmäßigen Abständen erfolgt. Der Übergang zwischen präventiver und korrigierender Instandhaltung ist deshalb fließend. Präventive Strategien arbeiten jedoch mit deutlich kleineren Eingreifwerten.[45]

Beim **Besonders überwachten Gleis (BüG)** erfolgen regelmäßige Überprüfungen des Fahrflächenzustands mit einem Schallmesswagen, anhand derer eine Schleifen geplant wird. Grundlagen für die Ermittlung der Geräuschimmission von Schienenwegen sind das Bundesimmissionsschutzgesetz (16. BimSchV). Das BimSchV sieht für Neu- und Ausbaustrecken einen Beurteilungspegel von Tag/Nacht 59/49 dB(A) vor. Entsprechend Abbildung 22 ist ein Schleifen der Oberfläche bei einer Schallpegelerhöhung von 3 dB(A) erforderlich. Da beim akustischen Schleifen eine besonders geringe Oberflächenrauhigkeit insbesondere in Schienenquerrichtung hergestellt wird, können deutliche geringere Schallpegel als beim Instandhaltungsschleifen realisiert werden.

[45] HEMPE, 2006 , S. 10

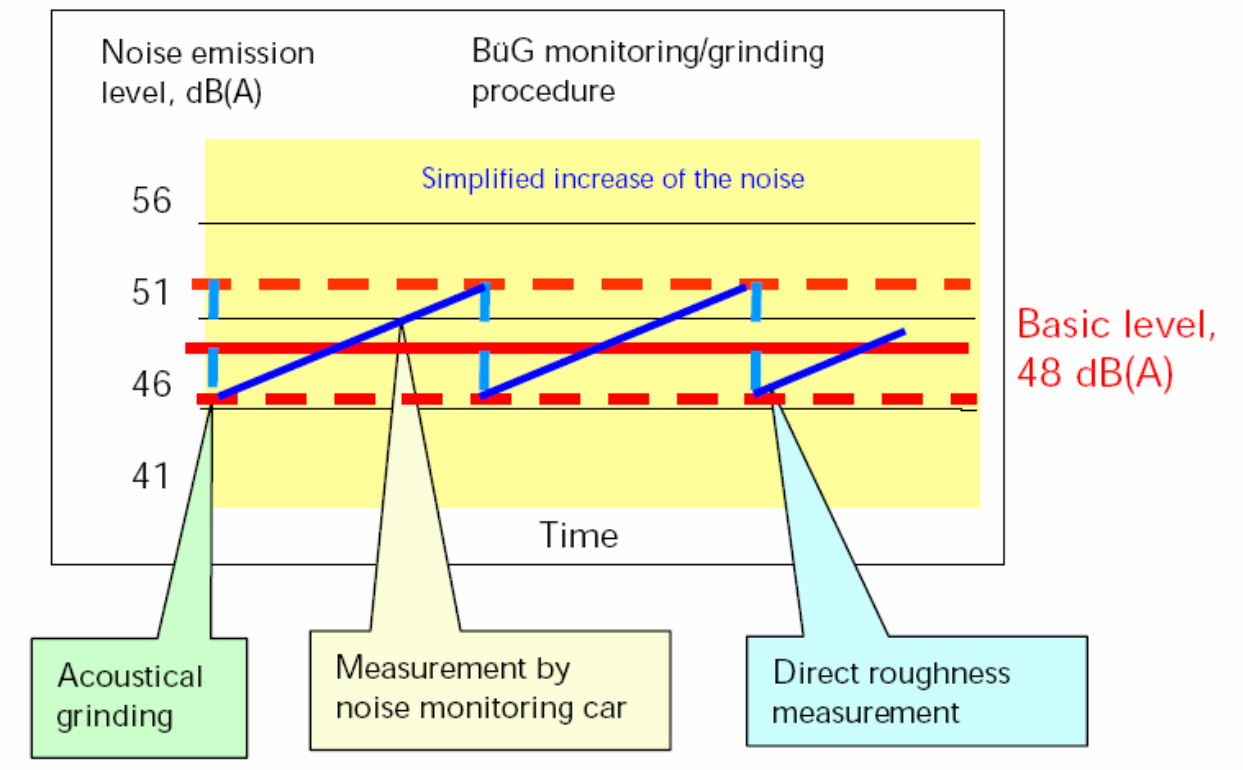


Abbildung 22: Akustisches Schleifen beim besonders überwachten Gleis
Quelle: [EURAILNOISE, 2003]

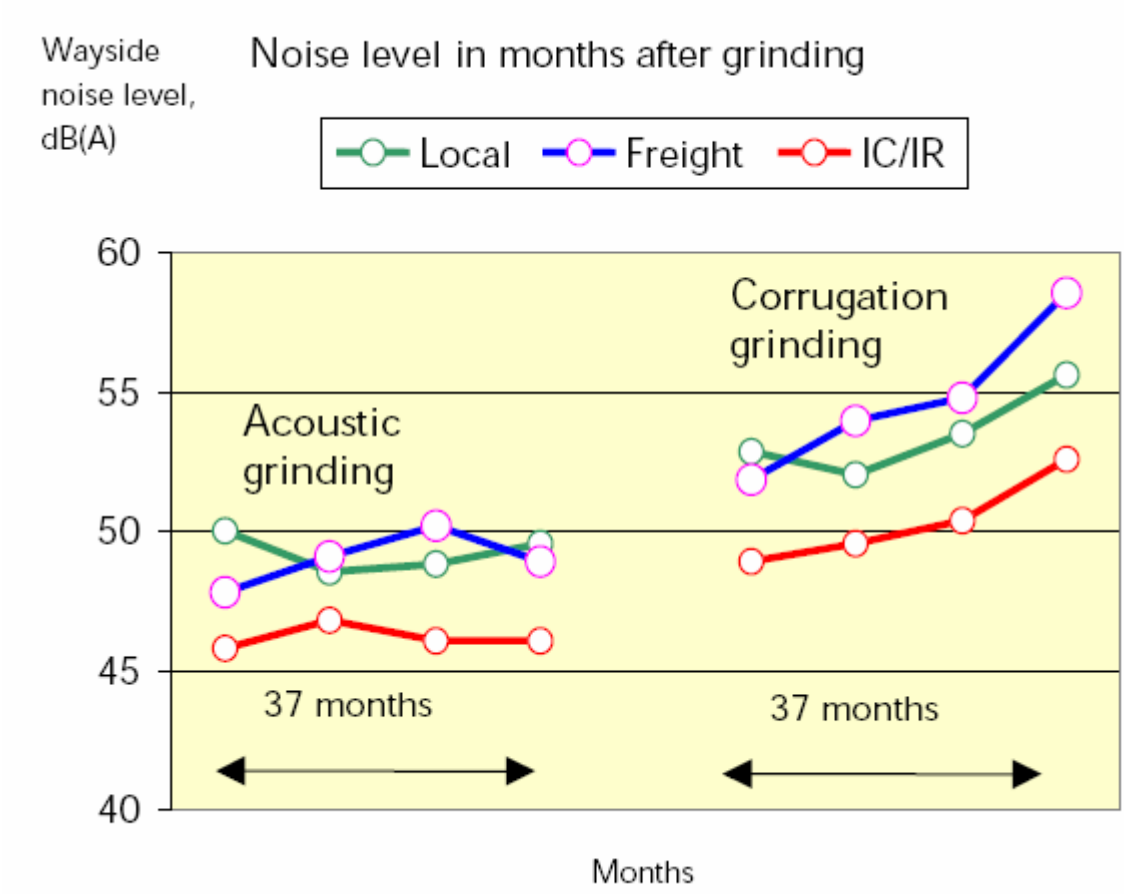


Abbildung 23: Schallpegel nach akustischem und konventionellem Schleifen
Quelle: [EURAILNOISE, 2003]

Neben der Gewährleistung der Sicherheit des Fahrwegs wird der optimale Schleifzeitpunkt insbesondere durch wirschaftliche Überlegungen bestimmt. Ziel ist es, die Aufwendungen für das Schleifen und die erzielbare Lebensdauer der Schienen so aufeinander abzustimmen, dass ein Kostenminimum erzielt wird (= minimierte Lebenszykluskosten, LCC). Diesem Aspekt kommt insbesondere bei der Beseitigung von Rollkontaktermüdungsschäden eine hohe Bedeutung zu. Rechtzeitiges Schleifen verhindert hier das Risswachstum und führt zu einer deutlich erhöhten Liegedauer der Schiene. (Abbildung 24) Präventives Schleifen bei einer Risstiefe von nicht mehr als 0,2 mm überführt die Schiene in einen quasi neuen Zustand und erhöht die Lebensdauer wesentlich.[46]

[46] LICHTBERGER, 2003 , S. 111 f.

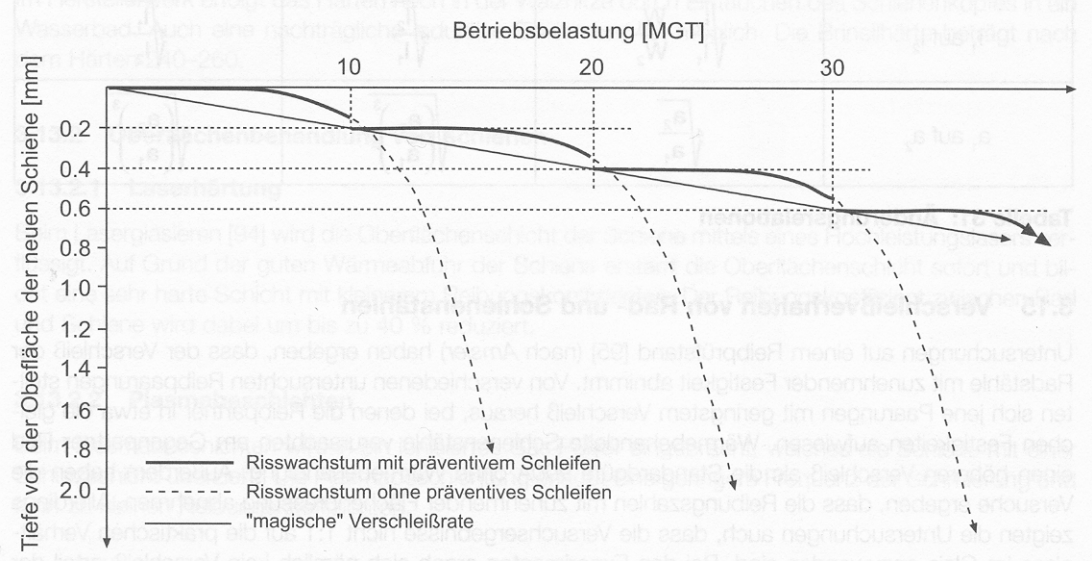


Abbildung 24: Das Prinzip der "magischen" Verschleißrate

Quelle: [LICHTBERGER, 2003 , S. 112]

4 Schleifstrategie

Das Schleifen der Schienenoberfläche wird, wie bereits in vorangegangenen Kapiteln erläutert, mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt. Eine optimale Schleifstrategie muss deshalb einerseits akustische, aber auch Gesichtspunkte der Instandhaltung beinhalten.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten akustischen Messungen konnten nicht zweifelsfrei die Lärmminderungswirkung des HSG-Schleifverfahrens nachweisen, da die Ergebnisse der Akustikmessungen durch unerwartet durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen (Schotterstopfen) am Messquerschnitt verfälscht wurden. (vgl. Arbeitspaket 3) Da innerhalb der Projektlaufzeit keine erneuten Schleiffahrten und Akustikmessungen an einem anderen Querschnitt möglich waren, werden im folgenden Schleifstrategien auf Basis von theoretisch gewonnenen Annahmen zur akustischen Wirksamkeit des HSG-Schleifens entwickelt. Dabei werden folgende Hypothesen aufgestellt und bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten des Fahrwegs untersucht:

Hypothese 1.: Das HSG-Schleifen bewirkt keine Lärmminderung an der Strecke. HSG wird zum präventiven Schienenschleifen, d.h. zur Vermeidung von Folgeschäden durch Schädigungen der Schienenfahrfläche eingesetzt. Die Veränderung der LCC beruht auf einer Verlängerung der Lebensdauer des Fahrweges durch regelmäßiges präventives Schleifen.

Hypothese 2.: Das HSG-Schleifen bewirkt eine Lärmminderung, die den heute eingesetzten Schleifverfahren beim „Besonders überwachten Gleis (BÜG)“ entspricht. Damit ermöglicht das HSG-Schleifen den Verzicht auf bauliche Lärmschutzmaßnahmen an der Strecke (z.B. Lärmschutzwände). Die Auswirkungen auf die LCC des Fahrwegs werden untersucht. Es sei darauf hingewiesen, dass die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse nicht für eine derart effektive Lärmminderung durch HSG sprechen. Insbesondere zeigten sich unmittelbar nach dem Schleifen Aufrauungen der Schienenfahrfläche, die erst nach einigen Wochen egalisiert waren. Die Akustische Wirksamkeit von HSG ist aus genannten Gründen im erneuten Langzeitversuch zu verifizieren und ggf. das Verfahren weiter zu optimieren.

4.1 Wachstum von Riffeln und Rissen

Oberflächenfehler in Form von Riffeln sind maßgeblich verantwortlich für eine erhöhte Lärmbelastung durch das Rollgeräusch der Züge. Die Lebensdauer der Schiene hingegen wird durch die Bildung von Rissen in Folge von Head Checks beeinflusst.

Hempe gibt für das Wachstum von **Riffeln** auf Grundlage von Untersuchungen eine Spannbreite von 0,005 bis 0,02 mm je 10 Mio. Lt an (Hempe, S. 144). Im folgenden soll von der pessimistischen Annahme von 0,02 mm je 10 Mio t ausgegangen werden.

Zum Wachstumsverlauf von **Rissen** infolge von Head Checks existieren derzeit keine gesicherten Erkenntnisse, die eine genaue Prognose der Wachstumsgeschwindigkeit zulassen. Hempe hat folgende Wachstumsfunktion entwickelt, die es erlaubt durch Annahme von Schadenskoeffizienten die in der Praxis vorgefundenen Wachstumsverläufe mathematisch nachzubilden. Abbildung 25 zeigt beispielhaft den Schadensverlauf mit verschiedenen Koeffizienten, die die Spannbreite des in der Praxis vorgefundenen Risswachstums wiederspiegeln.

Formel 4-1

$$z(x) = \alpha * e^{\beta x} - \alpha$$

mit:

z: Schädigungstiefe [mm]

α, β: Schadenskoeffizienten

x: Betriebsbelastung [Lt]

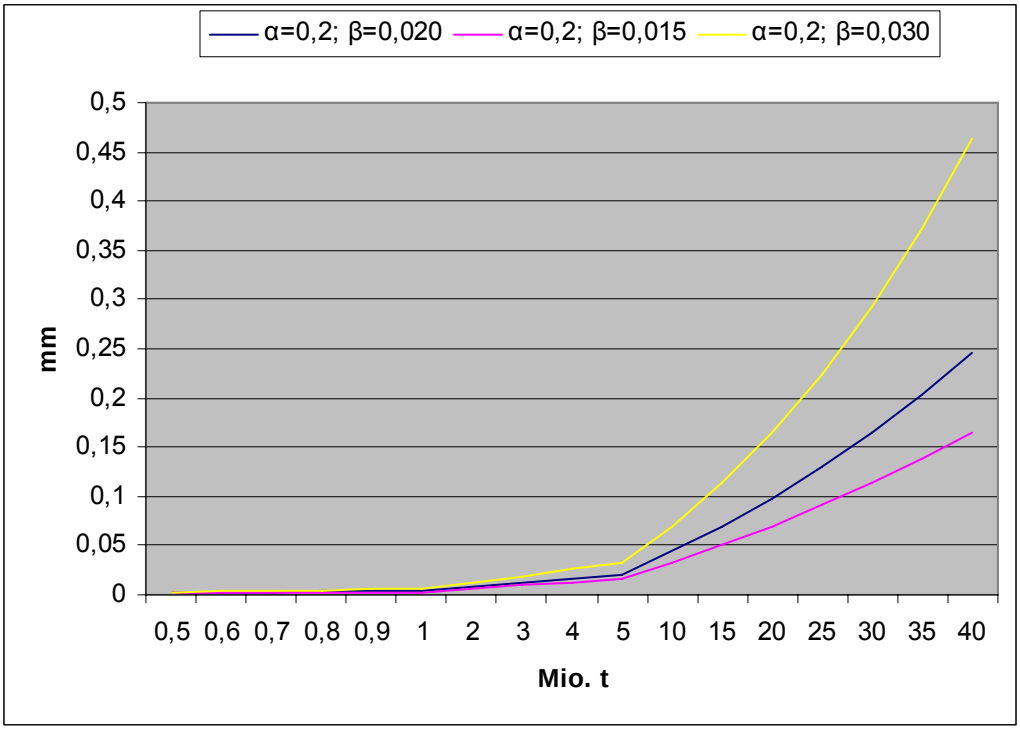


Abbildung 25: Beispielhafte Ausbreitung von Head Check-Rissen nach Hempe

Kennzeichnend für den Schädigungsverlauf ist das zunächst relativ langsame Risswachsum, dass nach einer bestimmten Lastgrenze sprunghaft zunimmt. Da in der Forschung bislang keine gesicherten Erkenntnisse über den detaillierten Schädigungsverlauf von Rissen vorliegen, kann hier nur anhand von Praxiserfahrungen und Literaturempfehlungen eine Eingreifschwelle für präventives Schleifen abgeschätzt werden.

- Eine Langzeitbeobachtung des holländischen Netzbetreibers ProRail[47] zeigt die in Abbildung 26 dargestellte Verschleißrate (Bogenradius 2275m, v=140 km/h). Nach anfänglichem Wachstum zeigt sich zunächst eine weitestgehende Stagnation der Risstiefe, die nach etwa 15 Mio Lt wieder in sprunghaftes Wachstum übergeht.
- Die „magische Verschleißrate“ (vgl. Abbildung 24) unterstellt eine sprunghafte Schädigungszunahme ab einer Risstiefe von 0,2 mm nach einer Betriebsbelastung von 10 Mio Lt.

[47] HEMPE, 2006, S. 74

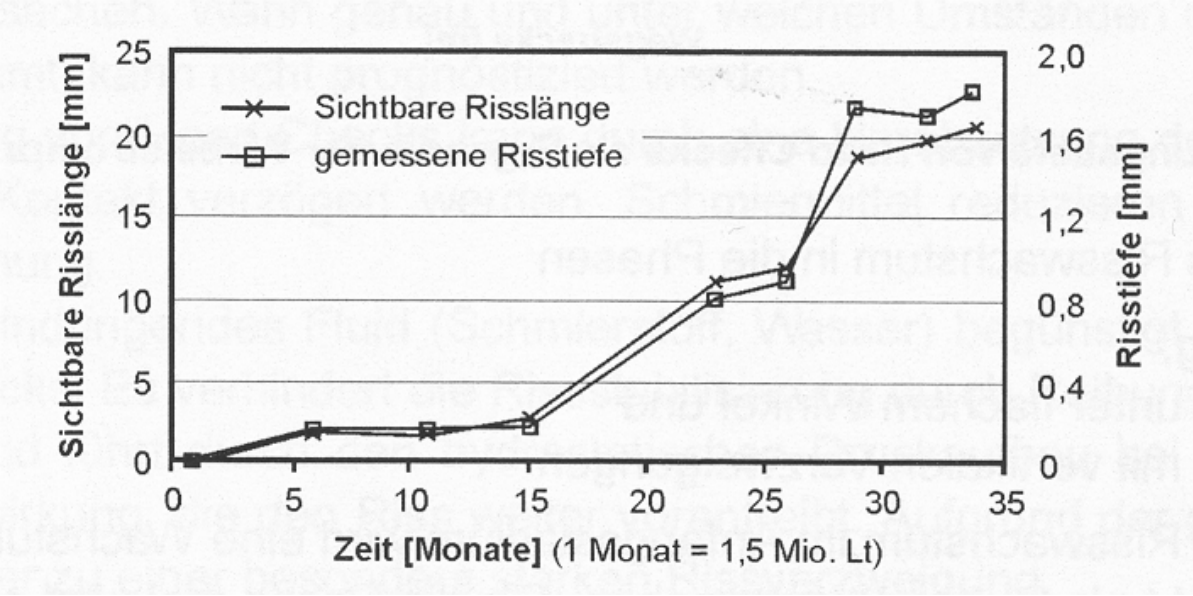


Abbildung 26:Gemessener Wachstumsverlauf von Head Check Rissen
Quelle: Hempe, 2006, S. 74

4.2 Schleifstrategie – akustisch

Wie bereits erwähnt sind besonders Riffel für eine erhöhte Lärmbelästigung verantwortlich.

Da – wie oben erläutert - im Laufe des Projektes aufgrund des zeitlich befristeten Messzeitraums keine erkennbaren akustischen Auswirkungen des HSG aufgezeigt werden konnten, wird der Schleifstrategie im Folgenden das „besonders überwachten Gleis“ (BÜG) zugrunde gelegt. Beim BÜG-Schleifen wird der Fahrflächenzustand in regelmäßigen Intervallen durch einen Schallmesswagen kontrolliert. Bei Überschreitung des Grenzwertes, wird innerhalb von 2 Monaten das Gleis geschliffen. Gleise mit der Kennzeichnung BÜG kann ein Abschlag von 3 dB(A) bei der Berechnung der Schallemissionen zu Grunde gelegt werden[48].

Abbildung 17 zeigt die Abhängigkeit des Lärmpegels von der Riffelhöhe. Eine Änderung des Schallpegels um 6 dB(A) entsteht dabei durch eine Riffelhöhe von 0,05 mm. Das Riffelwachstum lässt sich entsprechend Kapitel 4.1 bestimmen. Legt man beim High Speed Grinding die Schallpegelminderung des Besonders überwachten Gleis (BÜG) zu Grunde, d.h. eine Änderung von 6 dB(A), wird bei einer pessimistischen Annahme des Riffelwachstums nach einer Belastung von **25 Mio. Lt** ein Eingriff notwendig.

[48] FIEDLER, 2005 , S. 444.

Beim Schleifen von Riffeln ist sicherzustellen, dass neben der Beseitigung der Wellenberge auch in den Wellentälern Material abgenommen wird, um oberflächennahe Aufhärtungen zu beseitigen.[49] Dies wird sichergestellt durch eine Abtragstiefe von 0,1 mm bei einer Riffelhöhe von 0,05 mm. Zur Bestimmung des Schleifzyklus sollen im weiteren drei Lastfälle betrachtet werden:

1. Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV),

   Betriebsbelastung 30.000t täglich (beispielhaft Strecke Köln Rhein/Main[50])

2. Mischverkehr (MV)

   Betriebsbelastung 49.000 t täglich (beispielhaft wurde die Strecke Hamburg-Pinneberg (akustische Messungen ausgewertet)

3. Regionalverkehr (RV)

   Betriebsbelastung 5.500 t täglich (Annahme 2 Regionalexpress-Züge stündlich)

Anhand dieser 3 Betriebsbelastungen ergeben sich die folgenden Schleifzyklen aufbauend auf die Vorgaben des BÜG.

	HGV	Mischverkehr	Reginalverkehr
Betriebsbelastung in Mio. t	Monate	Monate	Monate
25.000.000	28	17	152

4.3 Schleifstrategie – Instandhaltung

Wie unter 4.2. werden 3 Lastfälle für die Schleifstrategie zu Grunde gelegt – Hochgeschwindigkeitsverkehr, Mischverkehr und Regionalverkehr. Bei einer Risstiefe von 0,1 mm findet präventives Schienenschleifen statt. Das Risswachstum wird mit der Wachstumsfunktion von Hempe für den pessimistischen Ansatz bestimmt. Auf Basis dieser Kriterien wird das Schleifen nach ei-

[49] vgl. z.B. HEMPE, 2006, S. 79

[50] KOCAN, 2005

ner Betriebsbelastung von 13,5 Mio. t notwendig Es ergeben sich Schleifintervalle von 15 Monaten im HGV, 9 Monaten im Mischverkehr und 82 Monaten im Regionalverkehr.

	HGV	Mischverkehr	Regionalverkehr
Betriebsbelastung in Mio. t	Monate	Monate	Monate
13.500.000	15	9	82

5 Life Cycle Costs (LCC)

5.1 Methoden der LCC

Mit der Methode der LCC (Life Cycle Costs / Lebenszykluskosten) werden alle Kosten und Erträge in ihrem zeitlichen Auftreten erfasst, die ein Objekt während seiner gesamten Lebensdauer verursacht bzw. verursachen wird. Die Methode der LCC ist ein wichtiges Hilfsmittel für strategische Unternehmensentscheidungen.

Die LCC umfassen alle Kosten, die im Zusammenhang des Betrachtungsobjektes anfallen. Für viele Entscheider ist auch noch heute der alleinige Vergleich der Beschaffungskosten das ausschlaggebende Kriterium bei einer Investitionsentscheidung. Instandhaltungs- und Betriebskosten sowie der Einfluss des Zinssatzes werden zu oft noch außer Acht gelassen. Dies erschwert das Erkennen von Kostentreibern und das Ergreifen gezielter Maßnahmen zur Kostenreduktion. Lebenszykluskosten sind als Methode für die Analyse wie für die Prognose der Kosten eines Objektes gleichermaßen verwendbar.

LCC-Analyse

Die LCC-Analyse ist eine nachgelagerte Analyse. Mit ihr können auf Basis der Erkenntnisse älterer, ähnlicher Objekte wichtige Erkenntnisse für neu zu entwickelnde Objekte erforscht werden. Mit zunehmender Breite der verfügbaren Datenbasis erhöht sich die Kenntnis über das betrachtete Objekt, dessen Nutzungsintensität, Verschleißfunktionen, Instandsetzbarkeit, Lebensdauer und Schwachstellen. Neue Objekte werden meist nach dem neuesten Stand der Technik erstellt, mit neuartigen Werkstoffen, Herstellungsverfahren und gänzlich anderen Komponenten.

Durch solche Neuentwicklungen sowie veränderten Einsatzbedingungen ist eine einfache Fortschreibung der Kosten des Vorgängermodells nicht sinnvoll.

LCC-Prognose

Mit einer LCC-Prognose werden die zukünftigen Kosten eines neu entwickelten, bzw. unter veränderten Bedingungen eingesetzten Objektes geschätzt. Die Ergebnisse sind weniger belastbar als die einer reinen LCC-Analyse. Die LCC-Prognose kann sich dabei auf Ergebnisse von LCC-Analysen ähnlicher Objekte stützen, die unter vergleichbaren Bedingungen eingesetzt wurden.

Oft werden LCC als Kombination der Analyse und Prognose berechnet, bis zum Betrachtungszeitpunkt als LCC-Analyse, ab dem Betrachtungszeitpunkt als LCC-Prognose. Mit zunehmendem Erreichen des Endes der Lebensdauer können die LCC mit wachsendem Genauigkeitsgrad angegeben werden. Gleichzeitig kann die Prognosegenauigkeit überprüft und optimiert werden.

LCC als Vertragsbestandteil

Bei dem Neubau von Fahrwegen verlangt der Betreiber immer öfter die Angabe von LCC, die zum Teil vertraglich geregelt wird. Garantien der Hersteller gegenüber dem Betreiber verstärken den Druck auf den Hersteller, über die reinen Herstellungskosten auch die Kosten des Betriebs zu ermitteln. Schwierigkeiten bereitet die vertragliche Festlegung der Kostenziele, was für den Hersteller das Risiko der Pönalisierung bei Nichterfüllung einbringt. Der Hersteller ist auf Daten des Betreibers bzgl. der Art des Betriebseinsatzes und auch der Qualität der Instandhaltung angewiesen. Die Zusammenarbeit von Hersteller und Betreiber bringt beiden Seiten Vorteile, der Hersteller erkennt Kostentreiber und Schwachstellen, der Betreiber kann bei Neubeschaffungen statt der Investitionskosten die LCC verschiedener Angebote vergleichen und davon ausgehen, dass die Berechnungen auf realen Begebenheiten basieren. Die vertraglichen Risiken für beide Parteien sprechen eindeutig für eine Zusammenarbeit im Bereich der Datenerhebung und -auswertung.

5.2 Investitionsrechenverfahren

5.2.1 Dynamische Investitionsrechenverfahren

Für die Ermittlung der LCC ist ein dynamisches Investitionsrechenverfahren erforderlich. Jeder Periode der Zahlungsreihe werden die entsprechenden Ein- und Auszahlungen zugewiesen. Für den Vergleich von zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Kosten werden diese auf einen Bezugszeitpunkt bezogen und aufsummiert. Die übliche Praxis ist die Diskontierung der Beträge mit dem Barwertfaktor.

Kosten können sowohl für sich alleine, als auch zusammen mit den Erträgen betrachtet werden. Bei einem Vergleich verschiedener Investitionsobjekte ist die ausschließliche Betrachtung von Kosten möglich, wenn die Erträge unabhängig des gewählten Investitionsobjektes gleich bleiben. In diesem Fall ist nur ein Zinssatz erforderlich, man spricht von einem Ein-Zins-Modell. Bei der Betrachtung von Kosten und Erlösen mit einem Ein-Zins-Modell wird ein einheitlicher Zinssatz gleichermaßen für die Aufnahme von Investitionsmitteln vom Kapitalmarkt und für die Kapitalanlage verwendet, was den realen Bedingungen des Marktes nicht entspricht. Diese Vorgehensweise führt zu verfälschten Ergebnissen, Haben- und Sollzinssatz sind in der Praxis praktisch nie gleich hoch. Durch einen festen Kalkulationszinssatz wird über die Laufzeit des Projektes ein vollkommener Kapitalmarkt unterstellt, d.h., ein Unternehmen kann unbegrenzt viel Kapital zum gleichen Zinssatz aufnehmen, bzw. am Kapitalmarkt anlegen. Diese Vereinfachung wird in der Praxis sowohl bei Ein-Zins-Modellen, als auch bei Mehr-Zins-Modellen angenommen.

Mehr-Zins-Modelle berücksichtigen unterschiedliche Zinsen für Einnahmen (bzw. Kapitalanlage) und für Ausgaben (bzw. Kapitalaufnahme). Das mit verschiedenen Zinssätzen einher gehende unterschiedlich schnelle Aufzinsungstempo erfordert die Berechnung des Endwertes (Askontierung der Beträge) statt des Barwertes (Diskontierung der Beträge). Unabhängig davon, ob die Beträge diskontiert oder askontiert werden gilt, dass Einzahlungen (Erlöse) so früh wie möglich und Auszahlungen (Kosten) so spät wie möglich erfolgen sollten.

Kapitalwertmethode

Mit dem berechneten Kapitalwert einer Investition kann die Vorteilhaftigkeit einer Investition zu Beginn der Nutzungszeit bestimmt werden. Die Kapitalwertmethode gehört zu den Sollzinssatzmethoden, das heißt, es wird vor Beginn der Berechnung ein Kalkulationszinssatz bestimmt.

Mit der Kapitalwertmethode wird der Barwert einer Investition ermittelt, indem alle Zahlungen durch Multiplikation mit dem Barwertfaktor auf den Bezugszeitpunkt (T = 0) abgezinst und addiert werden. Der sich daraus ergebende Barwert (auch: Kapitalwert) ermöglicht einen Vergleich mehrerer alternativer Investitionen. Der Barwert ist der heutige Wert für erst in der Zukunft fällig werdende Zahlungen bzw. Einnahmen.

$$Barwert = \sum_{t=0}^{n} \left(Einzahlung_{Periode\ t} - Auszahlung_{Periode\ t} \right) * \frac{1}{(1 + Zinssatz)^{Periode\ t}}$$

Der Barwert einer Investition ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Barwert der Einnahmen und dem Barwert der Ausgaben. Ein positiver Barwert (Kapitalwert) steht für eine relativ vorteilhafte Investition, ein negativer Barwert für eine relativ unvorteilhafte Investition. Weiterhin können verschiedene Investitionsalternativen miteinander verglichen werden. Beim Vergleich verschiedener Investitionsalternativen ist allerdings darauf zu achten, dass diese sich gegenseitig nicht ausschließen und dass diese auch gleiche Nutzungsdauern aufweisen.

Unterschiedliche Nutzungsdauern:

Unterschiedliche Nutzungsdauern, wie es z.B. beim Vergleich von Fahrwegen mit stark unterschiedlichen Nutzungsintensitäten (z.B. Hochgeschwindigkeitsverkehr und Regionalverkehr) der Fall ist, müssen in der Kostenrechnung berücksichtigt werden. Dies kann über einen fiktiven Betrachtungszeitraum erfolgen, der die Lebensdauern der zu vergleichenden Investitionsobjekte als ganzen Teiler aufweist. Andererseits besteht die weitaus praxisbezogenere Methode der Verrechnung von Restwerten. Der Betrachtungszeitraum entspricht der Lebensdauer des am längsten nutzbaren Investitionsobjektes (Objekt A). Mit dem Ende der Lebensdauer der anderen Objekte (Objekt B, C) wird eine erneute Investition fällig (hier: Gleisumbau). Bei Erreichen des Endes des Betrachtungszeitraums fallen entsprechend der noch nicht verbrauchten „Lebensdauer“ von „B“ und „C“ Restwerte an, die als Einnahmen verrechnet werden. Bei alleiniger Betrachtung der Kosten werden lediglich die „verbrauchten Kosten“ berücksichtigt (=Investitionskosten – Restwert). Dadurch wird der Barwert verringert und die Vorteilhaftigkeit relativ zu den anderen Investitionsalternativen erhöht.

Der Barwert kann für Ausgaben, Einnahmen (Rückflüsse) und für Liquidationserlöse getrennt berechnet werden. Wird nur der Barwert der Ausgaben betrachtet, so kann das negative Vorzeichen weggelassen werden. Auf diese Art erhält man einen positiven Betrag, der mit denen anderer Investitionsalternativen verglichen werden kann. Hierbei ist allerdings die Investition die günstigste, die den geringsten (Ausgaben-) Barwert repräsentiert. Es handelt sich lediglich um eine andere Darstellungsweise.

Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode baut auf der Kapitalwertmethode auf und gehört deshalb ebenfalls zu der Gruppe der Sollzinssatzmethoden. Dabei wird der Barwert der Kapitalwertmethode durch Multiplikation mit dem Wiedergewinnungsfaktor in äquivalente, äquidistante Zahlungen (Annuitäten) umgewandelt.

$$Annuität = Barwert * \frac{(1+Zinssatz)^{Periode\ t} * Zinssatz}{(1+Zinssatz)^{Periode\ t} - Zinssatz}$$

Der Praxis, in der mit jährlichen Zahlungen oder Gewinnen gerechnet wird, kommt diese Darstellung entgegen. Im Gegensatz zum Kapitalwert ist die Annuität für den Praktiker einfacher und geläufiger. Wie bei der Berechnung des Barwertes für die Kapitalwertmethode kann auch die Annuität für Ausgaben, Einnahmen und Liquidationserlöse getrennt ermittelt werden. Die Annuität ist ein Durchschnittswert über die gesamte Laufzeit des Projektes, bei Betrachtung von Einnahmen und Ausgaben sind keine Rückschlüsse auf zeitweise verlustreiche Perioden möglich. Wird nur die Annuität der Ausgaben berechnet, so entfällt der Nachteil der Durchschnittsbetrachtung.

Methode des internen Zinssatzes

Der interne Zinsfuß ist der Zinssatz, zu dem sich eine Investition selbst verzinst. Berechnet wird der interne Zinssatz mit der gleichen Formel, die für die Kapitalwertmethode angewendet wird, wobei der Kapitalwert gleich Null gesetzt und die Formel nach dem „Zinssatz“ aufgelöst wird. Die sich ergebende Gleichung n-ten Grades ist nicht ohne Weiteres lösbar, so dass in der Praxis meist mit so genannten Versuchszinssätzen und anschließender Interpolation gearbeitet wird.

5.2.2 Erträge

Die Erträge einer Strecke können nur mit höheren Beförderungsleistungen erreicht werden, also längeren Zügen oder einem dichteren Fahrplan. Die Verdichtung des Fahrplans wird durch die Verfügbarkeit der Strecke begrenzt. Je geringer die Anzahl und die Dauer der Sperrpausen, desto höher ist die Verfügbarkeit, die mit der Verdichtung des Fahrplans zu höheren Erträgen führt.

Für die Untersuchung werden keine Erträge in Form von Trassenpreisen berücksichtigt. Zum einen ist das Trassenpreissystem nicht transparent genug, um einem bestimmten Zug einen Trassenpreis zuzuschreiben, zum anderen ist eine Aufteilung auf einzelne Anlagenteile (Leit- und Sicherungstechnik, Brücken, Fahrbahn,...) derzeit noch nicht möglich.

5.2.3 Abschreibung

Der planmäßige Werteverzehr des Anlagevermögens wird in der Kostenrechnung als kalkulatorische Abschreibung bezeichnet, wobei für jede Planungsperiode möglichst der verursachungsgerechte Werteverzehr (durch Verschleiß) zu ermitteln ist. Für die Berechnung der Kosten des Schienenfahrwegs wird vereinfachend mit der kalkulatorischen Abschreibung gearbeitet.

Unfälle mit einem vorzeitigen Zerstören eines Teils der Anlage tauchen nicht in der Abschreibung auf, deren Erfassung erfolgt über Kosten der Instandsetzung. Andere außerplanmäßige, außergewöhnliche Wertminderungen, wie z.B. eine vorzeitige Stilllegung der Strecke, werden nicht betrachtet. Im Folgenden wird für die kalkulatorische Abschreibung vereinfachend der Begriff der Abschreibung verwendet.

Die Abschreibung erfolgt in dieser Untersuchung auf Grundlage von Herstellkosten und nicht nach Wiederbeschaffungswerten. Aufgrund der langen Liegedauer der Fahrbahn ist einerseits keine sinnvolle Prognose zukünftiger Erstellungskosten möglich, andererseits aber auch keine Prognose der Herstellkosten aufgrund des technischen Fortschritts in der Fahrbahnbautechnologie. Als Abschreibungsmethode wird die lineare Abschreibung gewählt. Der jährlich abzuschreibende Betrag ergibt sich vereinfachend aus der Division der Herstellungskosten (Verfahrens- und Materialkosten) durch die Nutzungsdauer. Die Aufwendungen für die Instandhaltung der Fahrbahn werden dagegen periodengenau in der Zeitreihe berücksichtigt.

Eine Fahrbahn wird, nicht zuletzt aufgrund der zu erwartenden Betriebsbehinderungen, erst nach Erreichen des technischen Nutzungsendes umgebaut. Die Festlegung der technischen Nutzungsdauer richtet sich nicht nach bilanztechnischen Gesichtspunkten, sondern nach der gegen Ende

der Nutzungszeit verminderten Verfügbarkeit und den ansteigenden Kosten der Instandsetzung. Bei Verwendung der technischen Lebensdauer bleibt der Oberbau so lange liegen, bis die Kosten der Instandhaltung die Kapitalkosten und Instandhaltungskosten eines neuen Oberbaus gerade noch nicht überschreiten. Die Bestimmung der technischen Nutzungsdauer wird allerdings durch vorgenommene Instandsetzungen etwas verlängert. Dabei ist zu beachten, dass eine Instandsetzung sich nur auf wenige Komponenten beschränkt. Würde sich die Nutzungsdauer der gesamten Anlage alleine nach der zuerst verschlissenen Komponente richten, müssten die anderen Komponenten vorzeitig ersetzt werden.

5.2.4 Kalkulatorische Zinsen

Kalkulatorische Zinsen werden auf die gesamten investierten Mittel bezogen, unabhängig von der Herkunft der Mittel (Eigenkapital, Darlehen, etc.). Auch wenn auf das Eigenkapital keine Zinszahlungen erhoben werden, muss der Tatsache Rechnung getragen werden, dass diese Mittel für die betreffende Investition gebunden sind und somit einer anderen Verwendung nicht mehr zur Verfügung stehen. Man spricht in diesem Fall von Opportunitätskosten, das sind Kosten, die z.B. durch entgangene Gewinne bei einer anderen Verwendung der Mittel entstehen. Dies betrifft auch staatliche Mittel, die nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. Die öffentliche Hand muss sich bei der Realisierung verschiedener Projekte oft entscheiden, welche zurück gestellt oder gar nicht realisiert werden. Der Ansatz von Opportunitätskosten ist auch bei der Wahl zwischen mehreren Projekten gerechtfertigt. Aus diesen Gründen werden die gesamten Herstellungskosten, als auch die Kosten durch Instandhaltung und des Rückbaus, mit Zinsen belegt.

Mit der Verzinsung des investierten Kapitals werden Investitionen in den ersten Perioden ungünstiger bewertet als Investition zum Ende des Betrachtungszeitraumes. Hohe Investitionen können also nur dann als vorteilhaft gelten, wenn sie gegenüber Alternativen mit geringeren Anfangsinvestitionen wenig Folgekosten (Instandsetzung, Wartung) und eine verlängerte Lebensdauer garantieren.

Neben der Finanzierung der Schieneninfrastruktur der DB AG durch die öffentliche Hand (Baukostenzuschüsse, Investitionszuschüsse) und der Eigenfinanzierung durch die DB Netz AG selbst sind auch Mischfinanzierungen möglich. Über den Lebenszyklus betrachtet, handelt es sich immer um Mischfinanzierungen, da reguläre Instandhaltungsmaßnahmen von der DB Netz AG selbst aufgebracht werden müssen, Investition dagegen zum größten Teil von der öffent-

lichen Hand. Unabhängig von der Finanzierungsform werden die eingesetzten Mittel gleichermaßen verzinst.

Steuerliche Aspekte werden nicht berücksichtigt. Aufgrund ihrer Komplexität können sie mit gängigen Kostenrechnungsmodellen nur ungenügend erfasst werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn unklar ist, inwieweit der Aufwand für Investitionen bzw. Instandhaltungsmaßnahmen die globale Steuerlast des Netzbetreibers beeinflusst.

5.3 LCC-Modell

Die Wirtschaftlichkeit wird mit dem am Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb der TU Berlin entwickelten Programm zur Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) untersucht. Vor der Berechnung der LCC wird ein Modell erstellt, das alle wesentlichen, d.h. kostenrelevanten Aspekte integriert und zueinander in Beziehung setzt. Dieses Modell wird anschließend in das LCC-Programm implementiert.

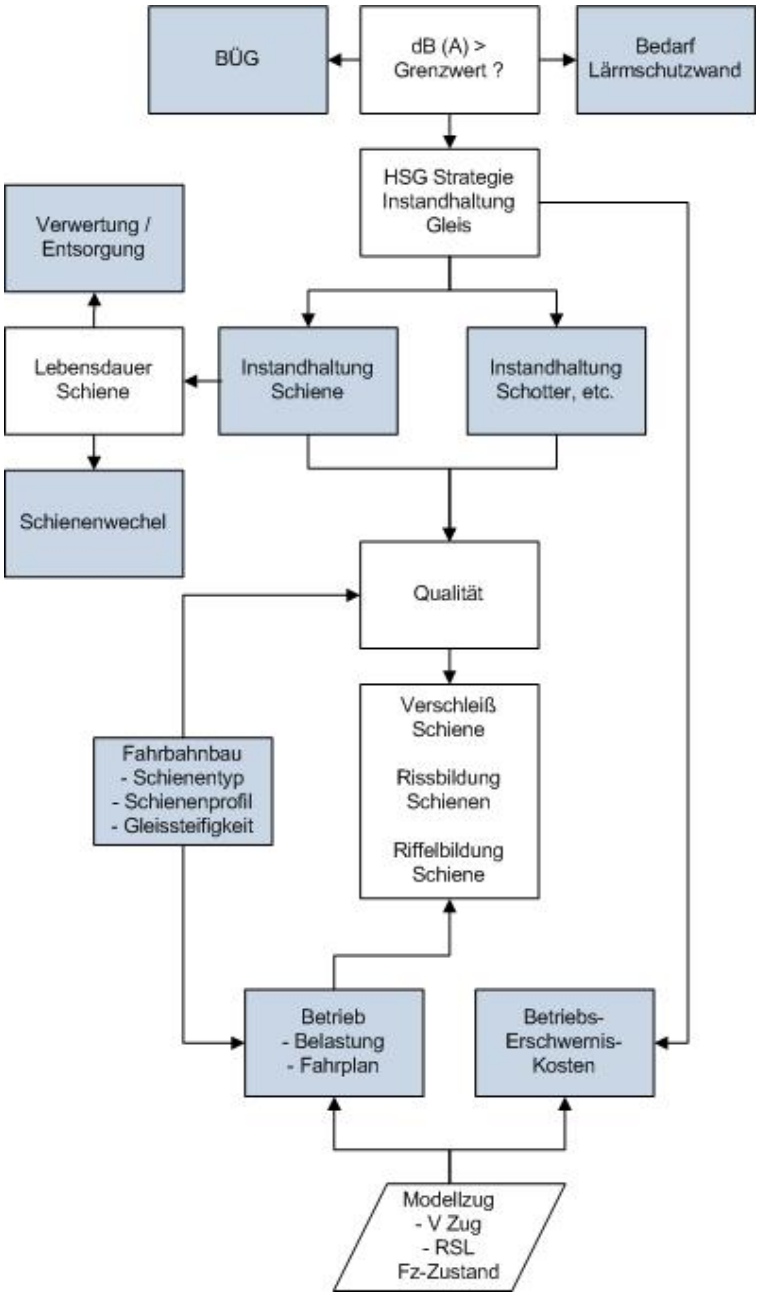


Abbildung 27: LCC-Modell

Die Berechnung der LCC basiert auf periodischen Ein- und Auszahlungen mit der Periodendauer von einem Jahr. Auszahlungen werden untergliedert in:

- Investitionskosten: Fahrbahn (Oberbau, Unterbau, Untergrund), Schallschutz, ggf. Erschütterungsschutz
- Instandhaltung (Inspektion, Wartung, Instandsetzung)
- Rückbau und Entsorgung / Weiterverwendung
- Betriebserschwerniskosten

6 LCC – Berechnung

Wie bereits in Kapitel 4 erläutert werden die Lebenszykluskosten für zwei Hypothesen berechnet:

Hypothese 1.: Das HSG-Schleifen bewirkt keine Lärmminderung an der Strecke. HSG wird zum präventiven Schienenschleifen, d.h. zur Vermeidung von Folgeschäden durch Schädigungen der Schienenfahrfläche eingesetzt. Die Veränderung der LCC beruht auf einer Verlängerung der Lebensdauer des Fahrweges durch regelmäßiges präventives Schleifen.

Hypothese 2.: Das HSG-Schleifen bewirkt eine Lärmminderung, die den heute eingesetzten Schleifverfahren beim „Besonders überwachten Gleis (BÜG)“ entspricht. Damit ermöglicht das HSG-Schleifen den Verzicht auf bauliche Lärmschutzmaßnahmen an der Strecke (z.B. Lärmschutzwände). Die Auswirkungen auf die LCC des Fahrwegs werden untersucht. Es sei darauf hingewiesen, dass die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse nicht für eine derart effektive Lärmminderung durch HSG sprechen. Insbesondere zeigten sich unmittelbar nach dem Schleifen Aufrauungen der Schienenfahrfläche, die erst nach einigen Wochen egalisiert waren. Die Akustische Wirksamkeit von HSG ist aus genannten Gründen im erneuten Langzeitversuch zu verifizieren und ggf. das Verfahren weiter zu optimieren.

Dabei werden jeweils drei Betriebsfälle (Hochgeschwindigkeitsverkehr, Mischverkehr und Regionalverkehr) untersucht. Diese Betriebsfälle repräsentieren sowohl unterschiedliche Betriebslasten als auch unterschiedliche Referenz-Instandhaltungszyklen der konventionellen Instandhaltung. So wird für die Hochgeschwindigkeits- und Mischverkehrsstrecken ein konventioneller Schleifzyklus von 48 Monaten angesetzt. Für Regionalstrecken wird entsprechend der niederigen Belastung angenommen, dass ein Schienenschleifen nicht durchgeführt wird. Dem gegenübergestellt werden die in Kapitel 4 bestimmten Schleifzyklen des HSG-Verfahrens.

Die Lebensdauer des Oberbaus wird mit 25 Jahren für hoch belastete Strecken und 40 Jahren für Regionalverkehrsstrecken angenommen. Abhängig von der Belastung kann innerhalb dieser Le-

bensdauer ein Wechsel der Schienen erforderlich werden. Bei Hochgeschwindigkeitsstrecken kann es durch Rollkontaktermüdungsschäden zu Rissen kommen. Die Maximal tolerierbare Schädigungstiefe solcher Risse wird von der DB AG mit 2,7 mm angegeben[54]. Beim hier angenommenen Schädigungsverlauf entspricht das einer Liegedauer von 8 Jahren auf Hochgeschwindigkeitsstrecken ohne präventives Schienenschleifen. Auf Mischverkehrsstrecken wird von einer Liegedauer der Schienen von 12,5 Jahren ausgegangen. Auf gering belasteten Regionalstrecken ist innerhalb der Lebensdauer des Oberbaus von 40 Jahren kein Schienenwechsel erforderlich.

Zur Verlängerung der Schienenliegedauer durch präventives Schleifen existieren derzeit noch keine gesicherten übertragbaren Erkenntnisse. Nach Hempe[55] wird die Liegedauer bei kontinuierlicher Beseitigung des ermüdeten Materials nur noch durch die Schienenkopfabnutzung bestimmt. Bei einem angenommenen natürlichen vertikalen Verschleiß von 1,0 mm je 100 Mio Lt und dem geringen Schleifabtrag von 0,1 mm des HSG-Schleifens ergibt sich der in Abbildung 28 dargestellte Verlauf. Alle Verschleißwerte liegen deutlich unterhalb der zulässigen vertikalen Abnutzungsgrenze von 14 mm für UIC 60 Schienen. Vereinfachend wird daher angenommen, dass sich die Liegedauer der Schiene durch präventives Schleifen von Rollkontaktermüdungsschäden bis mindestens auf die angenommene Lebensdauer des Oberbaus erhöhen lässt.

[54] HEMPE, 2006 , S. 74.

[55] HEMPE, 2006 , S. 81.

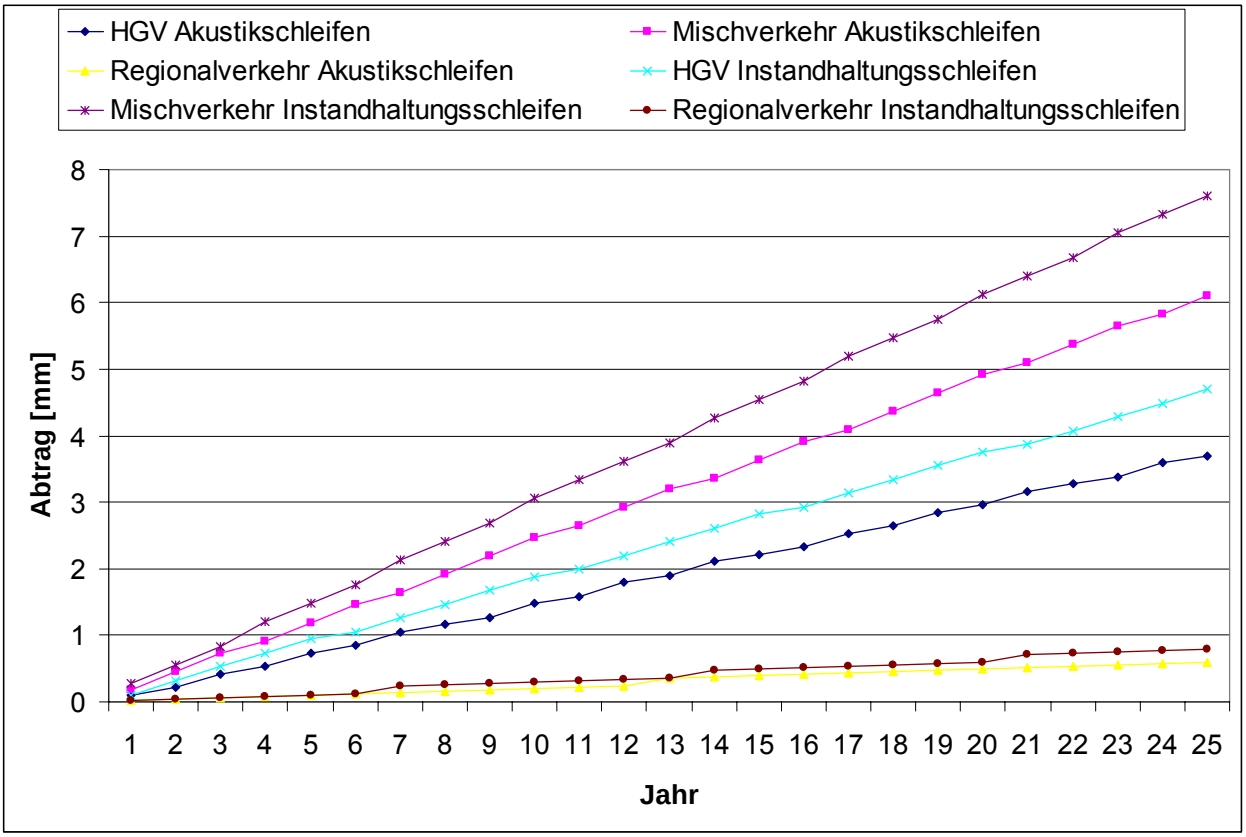


Abbildung 28: Abnutzung durch Verschleiß und Schienenschleifen

Folgende Übersicht fasst die gewählten Eingangsgrößen zusammen. Unter diesen Annahmen wurden die in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellten LCC bestimmt.

LCC berechnet für	**Akustisches Schleifen**	**Präventives Instandhaltungs-schleifen**
Betriebsfälle	Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV), Mischverkehr (MV), Regionalverkehr (RV)	HGV, MV, RV
Lebensdauer Oberbau	HGV, MV: 25 a RV: 40 a	HGV, MV: 25 a RV: 40 a
Lebensdauer Schiene bei konventioneller Instandhaltung	HGV: 8 a MV: 12,5 a RV: 40 a	HGV: 8 a MV: 12,5 a RV: 40 a
Lebensdauer Schiene bei HSG-Schleifen	HGV: 8 a MV: 12,5 a RV: 40 a	HGV: 25 a MV: 25 a RV: 40 a
Schleifintervall konventionell	HGV: 48 Monate MV: 48 Monate RV: /	HGV: 48 Monate MV: 48 Monate RV: /
Schleifintervall HSG	HGV: 28 Monate MV: 17 Monate RV: 152 Monate	HGV: 15 Monate MV: 9 Monate RV: 82 Monate
Schallschutzwand (SSW)	Aluminium, Höhe 3m auf 26 % der Streckenlänge	

In Bezug auf die aufgestellten Hypothesen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

Hypothese 1.: Das HSG-Schleifen bewirkt keine Lärmminderung an der Strecke. HSG wird zum präventiven Schienenschleifen, d.h. zur Vermeidung von Folgeschäden durch Schädigungen der Schienenfahrfläche eingesetzt. Die Veränderung der LCC beruht auf einer Verlängerung der Lebensdauer des Fahrweges durch regelmäßiges präventives Schleifen.

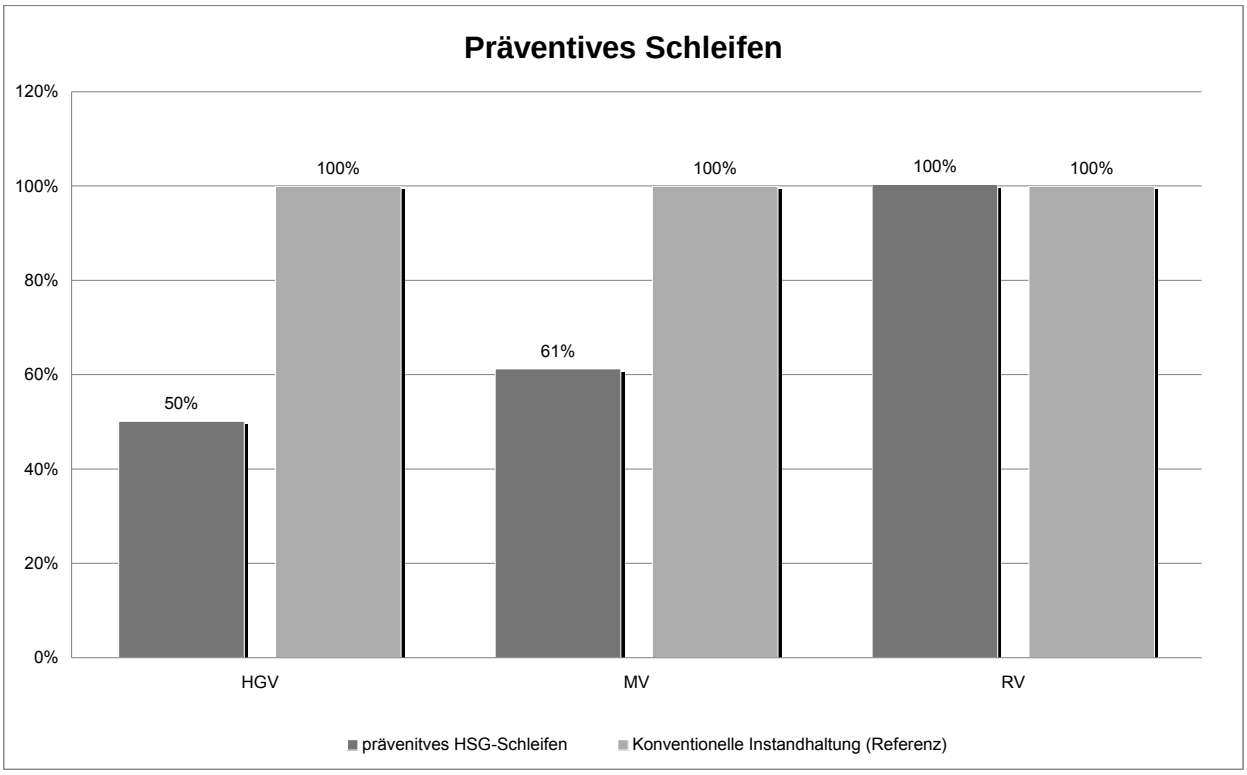


Abbildung 29: Lebenszykluskosten bei präventivem HSG-Schleifen

Es konnte ein positiver Einfluss des präventiven Schienenschleifens auf die LCC bestätigt werden. Durch regelmäßiges präventives Schleifen von Oberflächenverfestigungen reduzieren sich die Lebenszykluskosten der stark belasteten HGV und MV-Strecken auf 50 % bzw. 61 % des konventionellen Vergleichsfalls. Diese deutliche Reduktion der LCC wird zum einen durch die Verlängerung der Schienenlebensdauer beim präventiven HSG-Schleifen bestimmt. Durch die deutlich geringeren Fertigungskosten des HSG-Schleifens gegenüber den konventionellen Schleifverfahren ergibt sich eine insgesamt sehr positive Bilanz der verkürzten Schleifintervalle.[56]

Auf den schwach belasteten Regionalverkehrsstrecken sind keine Auswirkungen des präventiven Schienenschleifens auf die Schienenliegedauer zu erwarten. Lebensdauerverkürzungen der Schienen treten bei den hier vorherrschenden geringen Verkehrslasten und Geschwindigkeiten

[56] Zu beachten ist, dass hier im Sinne allgemeingültiger Aussagen von einer gleichmäßigen Schädigung beider Schienen über den gesamten Streckenverlauf ausgegangen wird. Im realen Schädigungsverlauf können sich abhängig von den Trassierungsparametern abweichende Wechselintervalle der beiden Schienen im Streckenverlauf ergeben.

nicht auf. Aufgrund der geringen Fertigungskosten des HSG-Schleifens ergeben sich aber auch bei präventiver Oberflächenpflege durch das HSG-Schleifen nur minimal erhöhte LCC.

Hypothese 2.: Das HSG-Schleifen bewirkt eine Lärmminderung, die den heute eingesetzten Schleifverfahren beim „Besonders überwachten Gleis (BÜG)“ entspricht. Damit ermöglicht das HSG-Schleifen den Verzicht auf bauliche Lärmschutzmaßnahmen an der Strecke (z.B. Lärmschutzwände). Die Auswirkungen auf die LCC des Fahrwegs werden untersucht. Es sei darauf hingewiesen, dass die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse nicht für eine derart effektive Lärmminderung durch HSG sprechen. Insbesondere zeigten sich unmittelbar nach dem Schleifen Aufrauungen der Schienenfahrfläche, die erst nach einigen Wochen egalisiert waren. Die Akustische Wirksamkeit von HSG ist aus genannten Gründen im erneuten Langzeitversuch zu verifizieren und ggf. das Verfahren weiter zu optimieren.

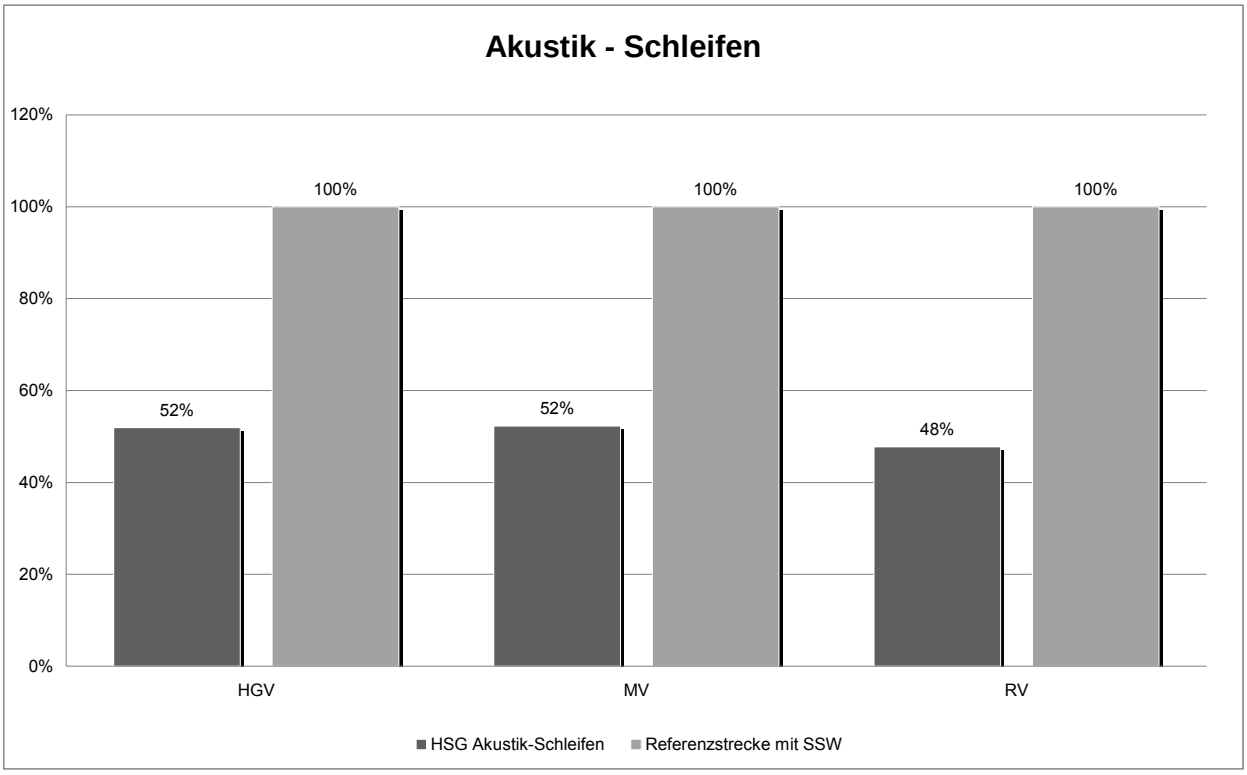


Abbildung 30: Lebenszykluskosten bei akustischem HSG-Schleifen

Unter der Annahme der akustischen Wirksamkeit des HSG-Schleifens zeigen sich deutliche Reduktionen der LCC bei regelmäßigem akustischem Schleifen und dem damit möglichen Verzicht auf Schallschutzwände. Positiv ins Gewicht fallen hierbei die gesparten Kosten für Bau und Instandhaltung der Schallschutzwände sowie die geringen Fertigungskosten des HSG-Schleifens.

7 Zusammenfassung

Sowohl unter Gesichtspunkten der präventiven Instandhaltung zur Vermeidung von Folgeschäden durch Oberflächenverfestigungen als auch beim akustischen Schleifen können für das HSG-Schleifverfahren deutlich reduzierte Lebenszykluskosten nachgewiesen werden. Die günstige Bilanz wird jeweils maßgeblich beeinflusst durch die geringen Fertigungskosten des HSG-Schleifverfahrens. Hier kommt auch die hohe Arbeitsgeschwindigkeit zum Tragen, die eine effektive Nutzung der Maschinen zulässt.

Auf Basis der Lebenszyklusbetrachtung scheint der Einsatz des HSG-Schleifens als Präventivmaßnahme zur Vermeidung von Folgeschäden von Head Checks und anderen Oberflächenverfestigungen auf hoch belasteten Strecken empfehlenswert.

Unterstellt man eine akustische Wirksamkeit des HSG-Schleifens, die vergleichbar ist mit den konventionellen akustischen Schleifverfahren, so zeigt sich auch hier eine positive Bilanz der LCC. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass die akustische Wirksamkeit des HSG-Schleifens im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte. Der Betrachtungszeitraum reicht für gesicherte Aussagen zum Langzeitverhalten der Akustik nicht aus. Die Schienenoberfläche ist 15 Wochen nach dem Schleifen in einem optischen und sensorisch so guten Zustand gewesen, dass mit einer deutlichen Verringerung des Schallpegels zu rechnen wäre. Eine weitere Messung ist aufgrund von erneuten Instandhaltungsmaßnahmen auf dem ausgewerteten Gleis jedoch nicht mehr möglich. Hier sind noch ergänzende Untersuchungen notwendig, um die erwarteten Effekte zu verifizieren.

Berlin, November 07

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann

Literaturverzeichnis

BMVBS, 2007	BMVBS, Nationales Verkehrslärmschutzpaket, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), 02.02.2007
DANZER, 2003	Danzer, Peter, Arbeitspaket 410 - Life Cycle Costs (LCC), Entwicklung eines leichten und lärmarmen Güterwagen-Drehgestells - LEILA-DG , BMBF, Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), 2003
EC, 2003	EC, Arbeitsgruppe "Schienenverkehrslärm" der Europäischen Kommission, Positionspapier über die europäischen Strategien und Prioritäten zur Bekämpfung des Schienenverkehrslärms, Version 19403, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, 2003
EURAILNOISE, 2003	Eurailnoise, Noise as part of the European rail grinding strategy - Main Report, Project performed for the EU Commission DG TREN, EU Commission DG TREN (Hrsg.), Copenhagen, 2003
FIEDLER, 2005	Fiedler, Joachim, Bahnwesen, Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S - , U - , Stadt - und Straßenbahnen, Verlag Werner, Neuwied, 2005
GEßNER, 1998	Geßner, C. ; Weinreich, Sigurd, Externe Kosten des Straßen- und Schienenverkehrslärms am Beispiel der Strecke Frankfurt-Basel, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) (Hrsg.), Mannheim, 1998
GEßNER, 2002	Geßner, Rolf, Schienenverkehrslärm – Senkung der Rad/Schiene-Geräusche, EI – Eisenbahningenieur, 6 / 2002
HARTLEBEN, 2003	Hartleben, Dieter, Schienenschleifen als Maßnahme der Lärmvorsorge und Lärmsanierung, EI - Eisenbahningenieur, Tetzlaff Verlag, 8 / 2003
HEMPE, 2006	Hempe, Thomas, Ein LVV-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen, Wissenschaftliche Arbeit Nr. 67 des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb der Universität Hannover, Eurailpress Tetzlaff-Hestra, Hamburg, 2006
HEYDER, 2002	Heyder, Rene, Die wichtigsten Schienenfehler, Eisenbahningenieurkalender 2002, VDEI (Hrsg.), 2002
KOCAN, 2005	Kocan, Denis, Betriebserfahrungen, Erfahrung mit der Fahrbahn der SFS Köln-Rhein/Main nach drei Jahren Betrieb, EI - Eisenbahningenieur, 11 / 2005

LICHTBERGER, 2003	Lichtberger, Bernhard, Handbuch Gleis, Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2003
PORTER, 1998	Porter; u.a. Health Effect Based Noise Assessment Methods: A Review and Feasibility Study, National Physical Laboratory (NPL) (Hrsg.), Teddington, U.K., 1998
RATKA, 2003	Ratka, Andreas; Schneider, Norbert; Hachmann Schallberechnungen zur akustischen Auslegung von Schienenfahrzeugen, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, 11 / 2003
SCHALL03	Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen, Anlage 2 zur 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV)
SOMMER, 1998	Sommer, Heini; Suter, Stefan; Höin, Reto, Externe Lärmkosten des Verkehrs, Schlussbericht Vorstudie I, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie u. Kommunikation (Hrsg.), Bern, 1998
SPIEGEL, 2006	Spiegel, Andreas; Grootings, Robert-Andre, TSI Lärm - ein wichtiger Schritt zur Reduzierung von Bahnlärm, ZEV rail - Glasers Annalen, Sonderheft Nachhaltigkeit – Energieeffizienz – Umweltschutz, Georg Siemens Verlag GmbH, Berlin, 12 / 2006
TAUBERT, 2005	Taubert, Marcel, High-Speed Grinding, International Railway Journal, Simmons-Boardman Publishing Corporation, UK, 12 / 2005
UMWELTBUNDESAMT	Umweltbundesamt, Daten zur Umwelt- Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000, Erich Schmidt Verlag / Berlin, Bielefeld, München, 2000
WIEMERS, 2005	Wiemers, Marc, Einfluss von Steifigkeit und Dämpfung bei Eisenbahnrädern, insbesondere von Güterwagenrädern, auf die Schallabstrahlung, Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Fakultät V, Institut für Land- und Seeverkehr, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Berlin, 2005