

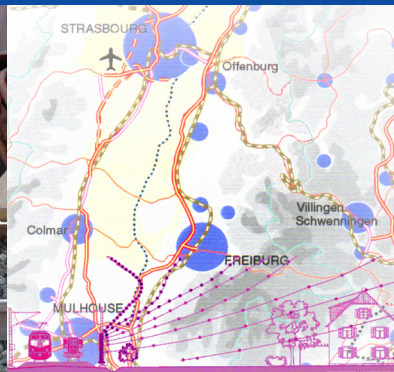
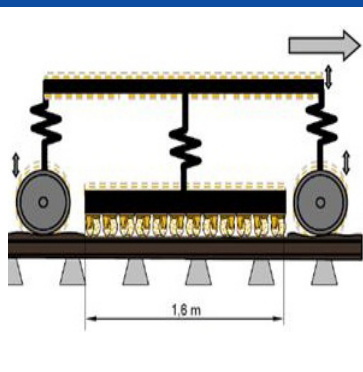


Regionalverband Südlicher Oberrhein

Planen. Beraten. Entwickeln.

Schienenlärm

Reduktion an der Quelle



Studie der **Technischen Universität Berlin**
Zusammenhang zwischen Schienenbearbeitung
und Lärm im Schienenverkehr

Schienenlärm

Reduktion an der Quelle

Studie der **Technischen Universität Berlin**
Zusammenhang zwischen Schienenbearbeitung
und Lärm im Schienenverkehr



Regionalverband Südlicher Oberrhein

Freiburg, Januar 2017

Herausgeber:

Regionalverband Südlicher Oberrhein

Reichsgrafenstr. 19

79102 Freiburg

Tel. +49(0)761-70327-0, Fax +49(0)761-70327-50

rvso@region-suedlicher-oberrhein.de

www.region-suedlicher-oberrhein.de

Januar 2017

© Regionalverband Südlicher Oberrhein 2017

erarbeitet

im Auftrag des

Regionalverbandes Südlicher Oberrhein

von



Technische Universität Berlin

FAKULTÄT V

Verkehrs- und Maschinensysteme

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Dipl.- Ing. Gernoth Götz

TEL.: +49 (0)30 314 25388

FAX: +49 (0)30 314 22529

E-MAIL: Gernoth.Goetz@TU-Berlin.de

bearbeitet von:

- Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
- Dipl.-Ing. Gernoth Götz
- Yasmin Baumgärtel, M.Sc.

Vorwort

*„Eines Tages wird der Mensch den Lärm
ebenso unerbittlich bekämpfen müssen
wie Cholera und die Pest“,*

äußerte sich bereits Nobelpreisträger Robert Koch, der Mitte des 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts lebte, nicht ahnend, wie adäquat er die Folgen der zivilisatorischen Entwicklung damit eines Tages beschreiben würde.

Zu lange wurde unterschätzt, wie Schienenlärm den Mensch belastet. Etwa ein Fünftel der deutschen Bevölkerung fühlt sich durch Schienenverkehrslärm gestört oder belästigt. Dabei wird Lärm – im Gegensatz zu anderen Umweltbelastungen – angesichts des anhaltenden Verkehrswachstums weiter zunehmen, und zwar zur empfindlichen Nachtzeit noch stärker als am Tag.

Die Lärmbetroffenen fordern spürbare Lärmverminderungen und Gesundheitsschutz. Die Akzeptanz sowohl von Neubaumaßnahmen als auch von Bestandsstrecken wird entscheidend davon abhängen, dass die Lärmbelastung reduziert wird.

Ausgehend von der sog. *Bad Krozinger-Erklärung* der Regionen am Oberrhein und Hochrhein im Jahr 2005, in der eine menschen- und umweltgerechte Aus- und Neubauplanung der Rheintalbahn gefordert wurde, hat der Regionalverband Südlicher Oberrhein eine Vielzahl fachlicher und politischer Impulse gesetzt. Dies geschah mit dem Ziel, dem Thema Lärm und seinen Auswirkungen auf den Raum die notwendige Berücksichtigung beizumessen.

So wurde im Rahmen des *Zweiten Schienenlärmkongresses* im April 2010 die vom Regionalverband Südlicher Oberrhein beim Universitätsklinikum Freiburg in Auftrag gegebene Studie* zum (weltweit) „anerkannten Erkenntnisstand der Lärmwirkungsforschung bei Schienenlärm“ der Öffentlichkeit vorgestellt. Unbestritten ist zwischenzeitlich: für Menschen, die nachts permanent hohen Schalleinwirkungen ausgesetzt werden, sind die Risiken gesundheitlicher Beeinträchtigungen signifikant erhöht. Danach war der für die Lärmschutzplanung bei Neubaumaßnahmen maßgebliche sog. Schienenbonus nicht mehr haltbar.

Vor diesem Hintergrund hat ihn der Deutsche Bundestag im Sommer 2013 abgeschafft. Für den Lärmschutz an Bestandsstrecken hat der Gesetzgeber bislang explizit keine verbindlichen Regelungen geschaffen. Er wird bislang als freiwillige Leistung des Bundes nach Haushaltsrecht gewährt.

Nach dem schwarz-roten Koalitionsvertrag 2013 soll durch die Umrüstung lauter Güterwagen mit sog. Verbundsohlen, einer stärkeren Spreizung des lärmabhängigen Trassenpreissystems sowie einer konsequenten Einführung des *Standes der Technik* zur Geräuschminderung in die Praxis deutschlandweit eine Halbierung des Schienenlärms (um 10 dB(A)) erreicht werden.

* Macht Schienenlärm krank?

Studie des Universitätsklinikums Freiburg zur Evaluierung der gesundheitlichen Wirkungen bei Exposition gegenüber Schienenlärm unter besonderer Berücksichtigung der DB-Trasse Basel-Offenburg (und der Haltbarkeit des Schienenbonus)

Anwohner von Bestandsstrecken beklagen zunehmend stark erhöhte Lärmemissionen von Schienenfahrzeugen nach Arbeiten zur Schieneninstandhaltung (sog. Reprofilierung). Aufgrund dessen beauftragte der Regionalverband Südlicher Oberrhein im April 2016 das *Institut für Land- und Seeverkehr* der Technischen Universität Berlin, mit der Erarbeitung einer Studie, die das Rad-Schienen-System als Gesamtkomplex, d. h. den Zusammenhang zwischen Schienenbearbeitung und Umrüstung des rollenden Materials im Gesamtkontext mit dem politischen Ziel der Halbierung des Schienenlärms darstellt.

Die Ergebnisse dieser Studie sollen neue politische wie auch fachliche Impulse für einen verbesserten Lärmschutz der Anwohner an Bestandsstrecken setzen und damit auch die für die weitere Modernisierung der Eisenbahninfrastruktur notwendige Akzeptanz schaffen.

Danken möchten wir dem Regionalverband Mittlerer Oberrhein, der sich angesichts der überregionalen Bedeutung des Themas „Schienenlärm an Eisenbahnstrecken“ an den Kosten des Gutachtens beteiligt hat.

Unser besonderer Dank gilt dem Direktor des Instituts für Land- und Seeverkehr der Technischen Universität Berlin, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht und seinen Mitarbeitern, durch deren Arbeit die Bedeutung der Schienenbearbeitung im Gesamtkontext mit dem Ziel der Reduktion des Bahnlärms an seiner Quelle dargestellt werden konnte.

Freiburg im Breisgau, im Januar 2017



Otto Neideck
Verbandsvorsitzender



Dr. Dieter Karlin
Verbandsdirektor

Inhaltsverzeichnis

II Abbildungsverzeichnis	9
III Tabellenverzeichnis	11
1 Zusammenfassung für den schnellen Leser	13
2 Ausgangslage.....	14
3 Lärm von Schienenfahrzeugen.....	16
3.1 Grundlagen der Akustik	17
3.2 Akustik im Schienenverkehr	18
3.3 Methoden zur Lärminderung des Schienenverkehrs.....	21
4 Verschleiß und Ermüdung von Eisenbahnschienen.....	25
4.1 Schäden durch Werkstoffumwandlung (Riffel)	27
4.2 Schäden durch Verschleiß (Schlupfwellen)	30
4.3 Rissartige Schäden (Rollkontaktermüdung).....	30
4.3.1 Head Checks	31
4.3.2 Shelling	33
4.3.3 Belgrospis	34
4.3.4 Squats.....	35
4.4 Singuläre Effekte	35
4.5 Schienenrauheiten	37
5 Strategien und Verfahren der Schienenbearbeitung.....	37
5.1 Strategien der Schienenbearbeitung	38
5.2 Verfahren der Schienenbearbeitung	42
5.2.1 Oszillierendes Schleifen	44
5.2.2 Rotierendes Schleifen mit Topfscheiben	45
5.2.3 Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG).....	46
5.2.4 Schienenfräsen	47
5.2.5 Schienenhobeln	49
6 Zusammenhang der Oberflächenbeschaffenheit von Rad und Schiene und Lärm von Schienenfahrzeugen	51
6.1 Rad- und Schienenrauheiten	51
6.2 Schienenfehler	55

6.3	Schienenbearbeitung.....	56
6.3.1	Strategie der Schienenbearbeitung	56
6.3.2	Verfahren der Schienenbearbeitung.....	58
6.3.2.1	Rotatorisches Schleifen	60
6.3.2.2	Frästechnische Schienenbearbeitung/ rotierendes Schleifen mit oszillierendem Schleifen	65
6.3.2.3	Frästechnische Schienenbearbeitung mit Nachschliff	67
6.3.2.4	Hochgeschwindigkeitsschleifen	69
7	Messtechnische Erfassung und Beurteilung der Schienenbearbeitungsqualität...	71
7.1	Besonders überwachtetes Gleis BÜG	71
7.2	Messung Schienenrauheit nach Norm EN 13231-3:2012	72
7.3	Messung Schienenrauheit nach Norm DIN EN ISO 3095:2013-12	72
8	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	78
9	Literaturverzeichnis	82

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie [10].....	16
Abbildung 2: Subjektive Lärmbelästigung nach Lärmquellen in Deutschland [11]	17
Abbildung 3: Quellen der Geräuschemission in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit	21
Abbildung 4: Schwellenbesohlung [18]	22
Abbildung 5: Schienenstegdämpfer [18]	22
Abbildung 6: Schienenstegabschirmung [18]	23
Abbildung 7: Einflussgrößen auf Verschleiß und Ermüdung von Eisenbahnschienen [21]	25
Abbildung 8: Klassifizierung der Fahrflächenfehler an einer Eisenbahnschiene ([22] nach [23]).....	26
Abbildung 9: Klassifizierung Schienenfehler anhand der Wellenlänge [24]	27
Abbildung 10: Oberfläche einer verriffelten Schiene [27]	28
Abbildung 11: Rissnetz einer stark verriffelten Schiene – Magnetpulverprüfung mit UV-Licht [23].....	28
Abbildung 12: Riffeleinfluss auf dynamische Vertikalkräfte im Rad-Schiene-Kontakt [2]	28
Abbildung 13: Schallpegelzunahme in Funktion der Riffelhöhe [14].....	29
Abbildung 14: Oberfläche einer Eisenbahnschiene mit Schlupfwellen [13]	30
Abbildung 15: Oberfläche einer Eisenbahnschiene mit Schlupfwellen (Nahaufnahme) [23]	30
Abbildung 16: Head Check Risse in der Schienenfahrkante 69 [29]	31
Abbildung 17: Längsschnitt durch einen Head Check – ungeätzt [23]	31
Abbildung 18: Wahrscheinlichkeit der HeadCheck Entstehung in Funktion des Bogenradius (exemplarischer Verlauf auf Basis von Messungen) [28]	33
Abbildung 19: Darstellung von Shelling auf einer Eisenbahnschiene [32]	33
Abbildung 20: Darstellung des Ausbruchs von Schienenmaterial durch Risswachstum [31]	34
Abbildung 21 Belgrospis [30]	34
Abbildung 22: Belgrospi Rissnester [27]	34
Abbildung 23: Squats [30]	35
Abbildung 24: Squats [33]	35
Abbildung 25: Eindrückung einer Kugel in die Schienenoberfläche [32]	36
Abbildung 26: Schienendeformation nach Schleudervorgang eine E-Lok [32]	36
Abbildung 27: Gegenüberstellung und Vergleich Schienenrauheit (links) und Welligkeit (rechts) [2] ..	37
Abbildung 28: Zusammenhang von Schienenrauheit und Welligkeit [2]	37
Abbildung 29: Versprödete Oberflächenschicht einer Schiene mit bereits vorhandener Rissentwicklung und Wachstum in Richtung des Schienenkopfes [2]	38
Abbildung 30: Risswachstum ohne Schienenbearbeitung und mit präventiver Schienenbearbeitung [37]	39

Abbildung 31: Entwicklung der präventiven Schienenbearbeitung [35]	40
Abbildung 32: Zusammenhang Schleifstrategie und Schienenliegedauer [2].....	41
Abbildung 33: Schienenfehler und Schienenbearbeitungsverfahren [37]	43
Abbildung 34: Charakteristiken der verschiedenen Schienenbearbeitungsverfahren [2]	44
Abbildung 35: Schienenoberfläche nach oszillierender Schienenbearbeitung [45] und Schienenschleifmaschine mit oszillierendem Schleifverfahren [46]	45
Abbildung 36: Rotierendes Schleifen mit Topfscheiben [46].....	45
Abbildung 37: Prinzip des Hochgeschwindigkeitsschleifens (links und mittig: [31])	46
Abbildung 38: Kreuzschliffbild nach Hochgeschwindigkeitsschleifen (links: [31], rechts: [2]).....	47
Abbildung 39: Fräsraddurchmesser mit Werkzeugkassetten [48]	47
Abbildung 40: Raue Schienenoberflächen direkt nach Fräsen (links), glatte Schienenoberfläche nach Fräsen und Schleifen (mittig) und sehr glatte Schienenoberfläche nach Fräsen und Finishing-Technologie mit High Performance Milling Verfahren [38]	48
Abbildung 41: Restwelligkeiten nach frästechnischer Schienenbearbeitung (links: Konventional mit kleinem Fräsraddurchmesser, rechts: Großer Fräsraddurchmesser des High Performance Milling-Verfahrens) [38]	49
Abbildung 42: Schienenhobeln am Beispiel der Plasser & Theurer Maschine SBM 250 [50]	49
Abbildung 43: Schienenoberfläche nach Schienenbearbeitung mit Hobelmaschine [49].....	50
Abbildung 44: Darstellung der Geräuscentstehung bei rollendem auf der Schiene [51]	51
Abbildung 45: Zusammenhang der Rad-Schiene-Rauhauten und Lärm von Schienenfahrzeugen [55]	51
Abbildung 46: Änderung der Oberflächenbeschaffenheit (links: Grauguss, mittig: LL-Sohle, rechts: Scheibenbremse).....	53
Abbildung 47: Zusammenhang der Schienen und Radrauheit auf den Lärm von Schienenfahrzeugen [56] [57] [58]	54
Abbildung 48: Einfluss Schienen- Radrauheit auf den Lärm von Schienenfahrzeugen [59]	54
Abbildung 49: Zusammensetzung des (berechneten) Gesamtschalldruckpegels bezogen auf die Frequenz für einen Güterwagen bei 100 km/h auf einem Gleisabschnitt mit weichen Zwischenlagen (eigene Darstellung in Anlehnung an [51]	55
Abbildung 50: Körper- und Luftschallabstrahlung eines vorbeifahrenden Schienenfahrzeugs	56
Abbildung 51: Einfluss der Schienenbearbeitungsstrategien (links: präventiv, rechts: korrektiv) auf den Lärm von Schienenfahrzeugen [31].....	57
Abbildung 52: Zusammenhang Materialabtrag und Welligkeit der Schienenoberfläche [2]	58
Abbildung 53: Einfluss des normalen (nicht aggressiven) rotatorischen Schleifens auf den Lärm von Schienenfahrzeugen ([2], Vortrag Frau. Dr. Lange auf dem Iaf Kongress 2015 BahnBau)	61

Abbildung 54: Terzband-Wellenlängenspektrum der Schienenrauheit nach Einsatz des rotierendem Schleifen (Grenzkurve EN ISO 3095:2005) [2].....	62
Abbildung 55: Terzband-Wellenlängenspektrum der Schienenrauheit nach Einsatz des Hochgeschwindigkeitsschleifens (Grenzkurve EN ISO 3095:2005) [2].....	62
Abbildung 56: Schliffbild nach aggressiven rotatorischen Schleifen mit Blauschliff [2]	63
Abbildung 57: Schliffbild nach aggressiven rotatorischen Schleifen mit Ecken und Kanten [2]	63
Abbildung 58: Schienenoberfläche direkt nach Schienenbearbeitung mit rotatorischem Verfahren (links), mit zeitlichem Abstand zur Schienenbearbeitung (mittig) und nach 19 Monaten Betrieb der Strecke (rechts) (Charakteristik: Nahverkehr mit Fahrzeugen mit niedrigen Achslasten) [2]	64
Abbildung 59: Bearbeitungsbild einer gefrästen und oszillierend geschliffenen Schiene [37]	66
Abbildung 60: Vergleich Rauigkeitsprofil vor und nach Anwendung des oszillierenden Schleifens [28]	67
Abbildung 61: Schienenrauheitsentwicklung während fräs- und schleiftechnischer Schienenbearbeitung	68
Abbildung 62: Stabile Reihenaufhängung der Schleifsteine (HSG) [2]	69
Abbildung 63: Schallmesszug der DB Systemtechnik [44], drei Messwagen und hier nur eine, meist jedoch am jedem Ende eine Lok	72
Abbildung 64: Abnahmekriterien von reprofilierten Schienen im Gleis nach EN 13231-3:2012	73
Abbildung 65: Abnahmekriterien der Schienenbearbeitung nach EN 13231-3:2012 (Klasse 1) transformiert in Darstellung der Terzrauheitspegel der gemessenen Wellenlänge nach EN 15610:2009 (ISO 3095:2013)	73
Abbildung 66: Abnahmekriterien der Schienenbearbeitung nach EN 13231-3:2012 (Klasse 2) transformiert in Darstellung der Terzrauheitspegel der gemessenen Wellenlänge nach EN 15610:2009 (ISO 3095:2013)	74
Abbildung 67: Messung der Schienenrauheit mit TRM 01	75
Abbildung 68: Messung der Schienenrauheit mit RM 1200 digital [62]	75
Abbildung 69: Messung der Schienenrauheit mit m rail trolleys [61]	75
Abbildung 70: Messung der Schienenrauheit mit Rail Surface Analyser [63]	76
Abbildung 71: Einfluss der Oberbauerneuerung auf die Vorbeifahrtpegel von Reisezügen	76

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakteristik von Ausbrüchen an Schienen	32
Tabelle 2: Übersicht Maschinen zur Schienenbearbeitung	42
Tabelle 3: Zuordnung Verfahren und Strategie der Schienenbearbeitung [43]	44
Tabelle 4: Unterschiedliche Schliffbilder nach Schienenbearbeitung mit rotierendem Schleifen [47] ..	46

Tabelle 5: Charakteristische Oberflächenbeschaffenheiten nach schleif- und/oder frästechnischer Schienenbearbeitung	59
Tabelle 6: Typische Wellenlängen von Unebenheiten nach dem Schleifen in Abhängigkeit von der Schleifgeschwindigkeit [47]	61
Tabelle 7: Ausgewählte (am Markt verfügbare) Messgeräte für Schienenrauheitsmessung	75

1 Zusammenfassung für den schnellen Leser

Die Lärmbelastung der Anwohner durch rau geschliffene Schienen hat in den letzten Jahren stark zugenommen und wird ohne Gegenmaßnahmen noch weiter zunehmen. Das hat mehrere Ursachen. Heute müssen die Schienen sehr viel häufiger (weit über 10 mal so häufig) als früher geschliffen werden, da Schäden der Schienenoberfläche wie Risse auf den stark belasteten Magistralen sehr viel häufiger als früher auftreten und keine anderen wirk-samen Abhilfemaßnahmen als Schleifen bekannt sind.

Das Schleifergebnis wird hinsichtlich maximal erreichbarem Abtrag definiert und nur auf Ab-schnitten mit „Besonders überwachtem Gleis“ (BüG), das sind etwa 900 km von 8000 km Problemgleis, hinsichtlich der Oberflächengüte spezifiziert. Allerdings ist die Methode „Be-sonders überwachtes Gleis“ technisch sehr veraltet und sehr teuer. DB Netz wehrt sich des-halb sehr gegen die Ausweitung der nach diesem Verfahren zu bearbeitenden Strecken. Die Prüfung erfolgt wegen der Kompliziertheit der Methode oft erst viele Monate nach dem Schleifen, sodass selbst dort Probleme nicht auszuschließen sind. Es sollte deshalb durch effizientere Verfahren ersetzt werden.

Das Schleifergebnis verursacht bei vielen Verfahren bei starkem Materialabtrag durch perio-dische Unebenheit ein stark tonhaltiges Geräusch, das in seiner Störwirkung sehr viel größer als ein breitbandiges Geräusch ist. Der Nutzen der Umrüstung von Güterwagen mit Grau-gussbremssohlen zu Verbundbremssohlen (allein 2016 wird der Bestand der Verbundsoh-lengüterwagen in Deutschland von 20 auf 51% anwachsen und 2020 sollen nur noch mit Verbundsohlen gebremste Wagen vorhanden sein [4]) wird so ins Gegenteil verkehrt, da die Graugussbremsen breitbandiges Rauschen verursachen und so den tonhaltigen Lärm des Schienenschleifens zumindest teilweise überdecken. Dass selbst bei graugussgebremsten Wagen die Tonhaltigkeit der rauen Schleifung hörbar ist, zeigt die vorliegende dramatische Situation. Diese Überdeckung fällt nun zunehmend weg, sodass trotz leisen Schienenfahr-zeugen die Belästigung für die Anwohner nicht in dem Maße sinkt wie es möglich wäre.

Dringend notwendig ist die Rauheit direkt nach dem Schleifvorgang zu begrenzen. Da die Abnahmelärmmessungen der Fahrzeuge mit einem rauheitsbegrenzten Prüfgleis erfolgen, wird empfohlen, diese Rauheitsgrenze auch für die Abnahme der Schleifarbeiten zu definie-ren und messtechnisch zu überprüfen. Wenn dies nicht erfolgt, ist die Lärmbegrenzung der Fahrzeuge wertlos. Nur durch die Festlegung maximal zugelassener Rauheitsgrenzen kann unnötige extreme Lärmbelastung vermieden werden.

2 Ausgangslage

Seit den Anfängen des Eisenbahnzeitalters haben sich die Radsatzlast und die betriebliche Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge sukzessive erhöht, um die Leistungsfähigkeit des Verkehrsmittels zu stärken. Schrittweise stiegen damit die Beanspruchungen im Rad-Schiene-Kontakt an und vermehrt traten Ausprägungen des Verschleißes und/oder von Ermüdungsschäden an Rad- und Schiene auf.¹ Der Walzvorgang des Stahlrads auf der Stahlschiene führt mit der Zeit zu einer aufgehärteten Randschicht der Schienenoberfläche durch Kaltverformung (Dicke: 0,1 mm) [2]. Ein regelmäßiger Abtrag dieser hauchdünnen Materialschicht ist notwendig, da die geschwächte Materialschicht Ausgangslage für die Rissentstehung ist und ohne Materialabtrag die Risse in den Schienenkopf wachsen können. Eine mangelhafte oder ausbleibende Schienenbearbeitung kann im schlimmsten Fall zu einem Verlust der Schienenfunktion führen, da zu dem tragischen Eisenbahnunfall in Hatfield im Jahr 2000 geführt hat [3]. Die Schienen werden heutzutage mit verschiedenen Verfahren der Schienenbearbeitung und in unterschiedlichen Strategien regelmäßig bearbeitet, damit die Schienenqualität trotz der hohen betrieblichen Beanspruchungen möglichst konstant hoch bleibt und die Schienenliegezeit damit maximal ist. Jedes Verfahren hinterlässt jedoch ein charakteristisches Bearbeitungsbild auf der Schiene, das fahrzeug- und fahrwegseitige Komponenten stärker zum Schwingen anregen kann. Eine stärkere Schwingung von Gleis und Fahrzeug kann zu einer höheren Luftschallabstrahlung führen. Das Schleifbild kann auch eine stärkere tonale Komponente des Rollgeräusches verursachen, die die Lästigkeit erhöht.² Der Zeitraum der erhöhten Lärmbelästigung nach der Schienenbearbeitung kann variieren (Tage, Woche oder Monate). Zwar glättet jede Überfahrt durch Walzvorgang des Rades auf der Schiene die Schienenoberfläche etwas, jedoch hängt die zeitliche Dauer, bis das Bearbeitungsbild den Lärm nicht mehr beeinflusst, sowohl vom Bearbeitungsbild an sich als auch von Parametern des Eisenbahnbetriebs auf der Strecke ab. Anwohner von Strecken beklagen sich nach der Schienenbearbeitung über erhöhten Lärm oder veränderten (und damit störenden) Lärm von Schienenfahrzeugen [2]. Die Umrüstung der Güterwagen von Grauguss auf Verbundbremssohlen, kann das Problem noch verstärken. Allein 2016 stieg der Anteil der Verbundsohlengüterwagen von 20% am 1.1.2016 auf 51% am 31.12.2016 [4]. Tonhaltige Geräusche, die durch das Schleifen verursacht werden können, werden nun nicht mehr durch den breitbandigen Lärm verdeckt, der durch die Rauheit der graugussgebrems-ten Güterwagen verursacht wird.

¹ Die Ermüdung und der Verschleiß am Eisenbahnrad werden an dieser Stelle nur erwähnt. Beides ist nicht Gegenstand dieser Studie ist.

² Ein tonales Geräusch wird als deutlich störender wahrgenommen, als ein breitbandiges Geräusch wie Rauschen. Das bedeutet, dass selbst bei gleichbleibendem Schallpegel die Störwirkung im Vergleich zu einem nicht tonalen Geräusch größer sein kann (Lärm ist störender als zuvor, obwohl es nicht lauter geworden ist).

Gegenstand der Studie ist die Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Schienenbearbeitung und der Entstehung von Lärm im Schienenverkehr. Ausgehend von den Grundlagen zur Lärmentstehung und der Klassifizierung von Schienenfehlern werden verschiedene Strategien und Verfahren der Schienenbearbeitung vorgestellt und erläutert. Anschließend wird der Zusammenhang zwischen der Schienenbearbeitung und Lärm von Schienenfahrzeugen hergestellt. Die Studie endet mit Empfehlungen, um die notwendige Schienenbearbeitung in den Einklang mit dem Lärmschutz von Anwohner zu bringen.

3 Lärm von Schienenfahrzeugen

Obwohl der elektrische Eisenbahnbetrieb aus erneuerbaren Energien nachhaltig und ökologisch ist, haftet dem Eisenbahnbetrieb mit dem vor allem zu hohem Lärm von Güterzügen ein negatives Image an [4] [5] [6] [7] [8]. Aktuelle Statistiken des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2016 zeigen, dass sich in der Nacht rund 5 Mio. Menschen vom Eisenbahnlärm gestört fühlen resp. Lärm oberhalb von 55 dB(A) ausgesetzt sind.

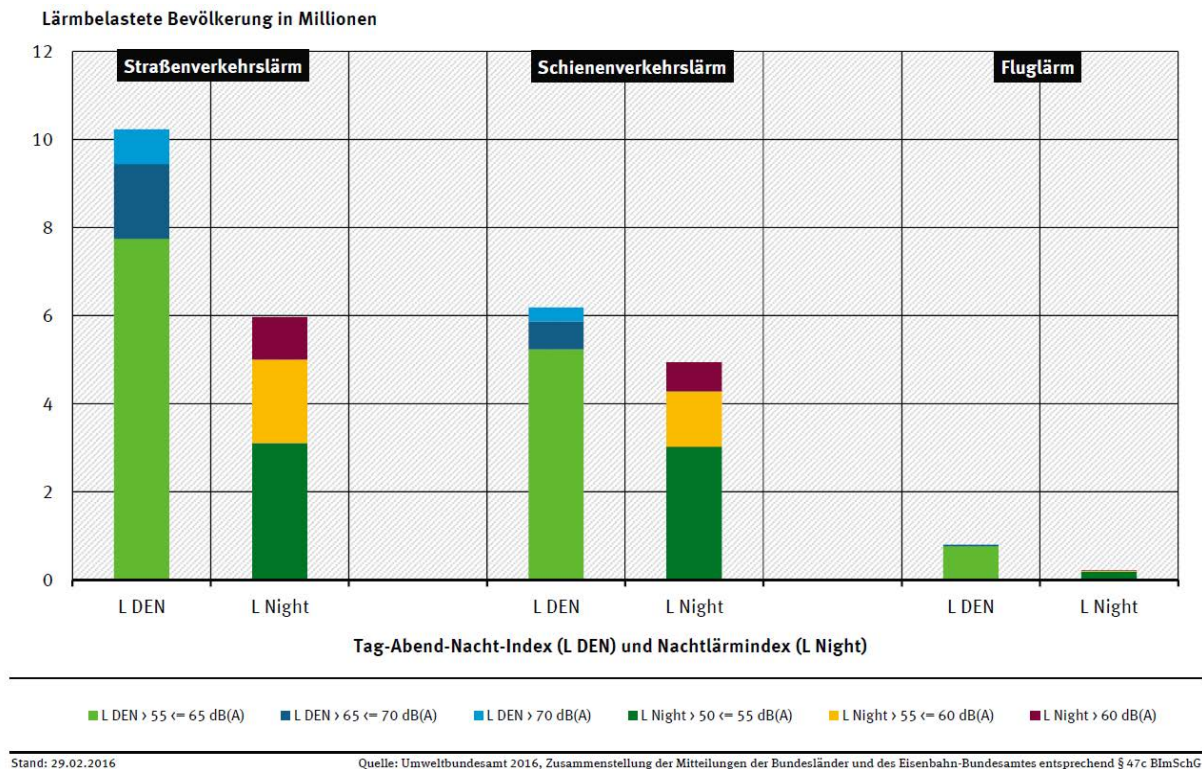


Abbildung 1: Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach Umgebungslärmrichtlinie [9]

„Repräsentative Befragungen, durchgeführt durch das Umweltbundesamt (UBA) belegen darüber hinaus, dass sich gut jeder fünfzigste Deutsche sogar stark vom Schienenverkehrslärm in den letzten Jahren zunehmend belästigt fühlt. Auffällig ist, dass der Flug- sowie Straßenverkehrslärm in den letzten Jahren zunehmend schwächer wahrgenommen wird. Damit rückt der Schienenverkehrslärm verstärkt in den Fokus.“ [11]

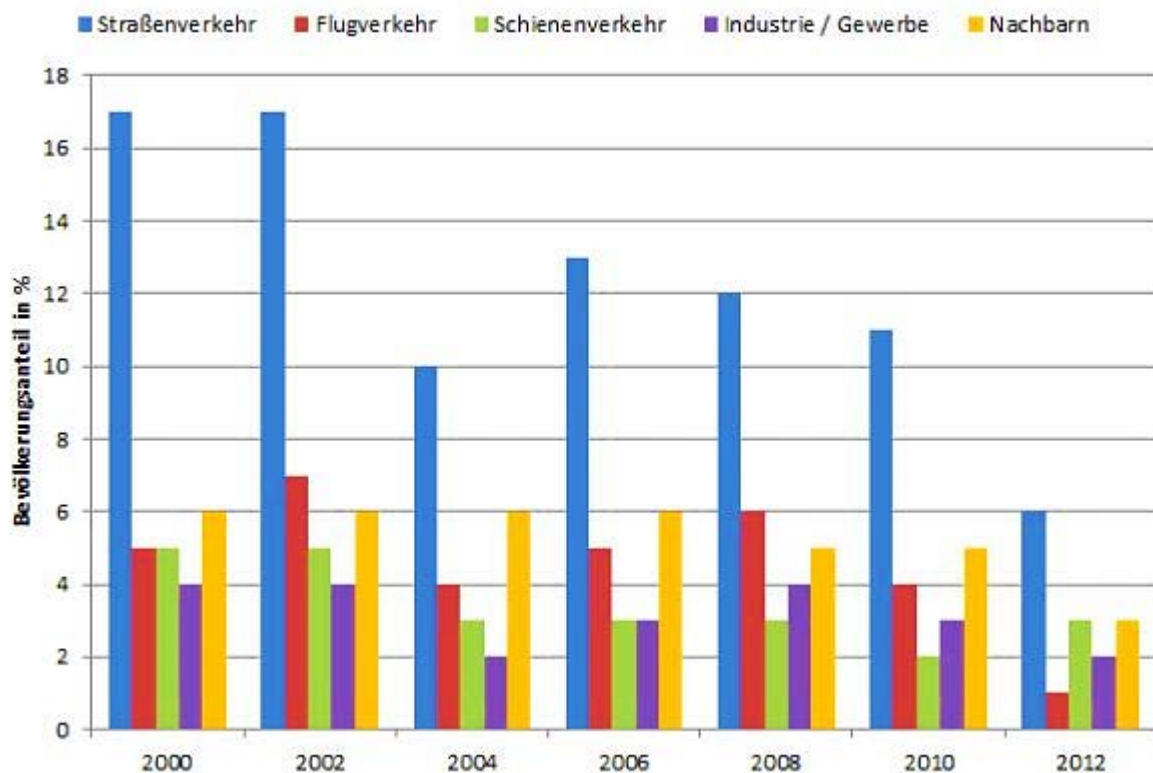


Abbildung 2: Subjektive Lärmbelästigung nach Lärmquellen in Deutschland [11]

Darüber hinaus spielt die Nähe der Anwohner zur Strecke eine entscheidende Rolle, denn je näher die Häuser an Gleisen und allgemeinen Eisenbahninfrastrukturanlagen stehen, desto größer werden die Beeinträchtigungen und Störungen. Neben den ansteigenden Immissionsbelastungen wirken auch nachteilige Effekte der Zugvorbeifahrt (Erschütterungen oder Staubaufwirbelungen). Darüber hinaus können auch Maßnahmen von Instandhaltungsmaßnahmen stärker wahrgenommen werden [11].

3.1 Grundlagen der Akustik

Das Themengebiet Akustik beschäftigt sich mit der Entstehung, der Ausbreitung und dem Einfluss vom Schall auf die Umgebung. Dem atmosphärischen Ruhedruck überlagerten kleinen Druckschwankungen werden als Schalldruck bezeichnet. Diese kleinen Druckschwankungen werden von einer Schallquelle verursacht. Der Schalldruck ist eine orts- und zeitabhängige physikalische Größe. In einem massebehafteten und elastisch deformierbaren Medium findet eine Wanderbewegung des Schalldrucks in Form einer Schallwelle statt. Eine Schallwelle transportiert Energie. Ein Schallereignis besitzt zwei wesentliche Eigenschaften: Während der Schalldruck ein Maß für die Schallstärke ist, ist die Frequenz ein Maß für die Klangfarbe. Physikalisch beschreibt die Frequenz die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit. Sie wird in der Einheit Hz (sprich Hertz) angegeben. 1 Hz entspricht einer Schwingung pro Sekunde. Der Hörbereich des Menschen reicht etwa von 16 Hz bis 20 kHz. Am empfind-

lichsten ist das Ohr bei 3-4 kHz. Das menschliche Ohr reagiert auf den Schalldruck logarithmisch. Dies bedeutet, dass eine Verzehnfachung des Schalldrucks als eine Verdoppelung dieser Größe wahrgenommen wird. Daher ist es legitim, für die Lautstärke eine logarithmische Größe einzuführen, den Schalldruckpegel:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} .$$

Dabei ist p der gemessene Schalldruck in Pascal und $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ ungefähr die Hörschwelle des Menschen in Pascal. Es ist üblich den Schalldruckpegel mit einem A-Bewertungsfilter zu versehen, der die Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs bei Lautstärken zwischen 50 dB und 60 dB nachbildet. Allerdings führt die international etablierte A-Bewertung bei höherem Schalldruckpegel zu einer zu starken Abschwächung des tieffrequenten Bereichs. [12]

3.2 Akustik im Schienenverkehr

Störender Schall wird als Lärm bezeichnet. Ein zu hoher Schalldruckpegel schädigt das Gehör unmittelbar, aber auch eine dauerhafte Lärmbelastung bei über 45 dB(A) birgt Risiken für die Gesundheit [13]. Als Schienenverkehrslärm wird der durch den Betrieb von Fahrzeugen auf Schienenwegen (Schienenwege der Eisenbahnen und Straßenbahnen, auch Rangier- und Umschlagbahnhöfe) entstehender Lärm bezeichnet. Derzeit sind Werte bei ca. 75 dB(A) an Bahnlinien zu verzeichnen, in seltenen Fällen bis zu 85 dB(A). Weitere typische Schalldruckpegel sind beispielsweise 50 dB(A) im Fahrzeug bei Stillstand, 70 dB(A) in Straßenbahnen bei v-max und 100 dB(A) bei einem lauten Güterzug. An der Typhonöffnung können Schalldruckpegel von 140 dB(A) erreicht werden, wobei die Schmerzschwelle bei Menschen bei 120-130 dB(A) liegt und eine normale Unterhaltung Werte zwischen 40 dB(A) und 60 dB(A) annehmen kann [14]. Bei hohem Schalldruckpegel besteht auch das Problem der Akzeptanz in der Bevölkerung. Das der Schienenverkehr eine ansonsten wenig umweltschädigende Transportart ist, hilft dabei nicht. Dies zeigt die Notwendigkeit der Konzipierung und die der Umsetzung von Lärminderungsmaßnahmen am Gesamtsystem Schiene und Fahrzeug auf.

Üblicherweise wird zur Beurteilung von emittiertem Schall der äquivalente A-gewichtete Mittelungspegel (auch A-bewerteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel) $L_{pAeq,T}$ über die Vorbeifahrtdauer T_p gebildet:

$$L_{pAeq,T} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T_p} \cdot \int_0^T \left[\frac{p_A(t)}{p_0}\right]^2 dt\right).$$

Gemessen wird über einen Zeitraum $T > T_p$, der die gesamte akustische Energie des Ereignisses beinhaltet.

Die Schallwellenlänge und die Frequenz sind über die Schallgeschwindigkeit miteinander verbunden. Leiser Eisenbahnlärm ist in einem Spektrum zwischen 100 Hz und 800 Hz und lauter Eisenbahnlärm zwischen 200 Hz und 1400 Hz vorzufinden [14]. Besondere Phänomene, so wie das bekannte Kurvenkreischen, können Frequenzen bis zu 10 kHz aufweisen. Die Wellenlänge beträgt bei einer Schallgeschwindigkeit von $c=344$ m/s für $f=100$ Hz, $\lambda=3,44$ m und bei einer Frequenz von $f=1400$ Hz, $\lambda=25$ cm. In der großen Bandbreite bezüglich der Wellenlänge liegt die Herausforderung bei der Minderung der unerwünschten Schallwellen begründet. Diese werden meist von unabhängigen Quellen abgestrahlt.

Die Akustik der Schienenfahrzeuge ist in Außenraum-Akustik und Innenraum-Akustik zu unterteilen. Die erstere beeinträchtigt die Anwohner, Reisende und Betriebspersonal, während es sich im zweiten Fall, um den Komfort und Arbeitssicherheit der Fahrgäste und des Zugpersonals handelt. Mit Ausnahme von Warneinrichtungen geht es bei der Außenraum-Akustik im Schienenfahrzeugbau allein um die Pegelminderung und nicht um die Klanggestaltung, wie es beispielsweise bei Kraftfahrzeugen der Fall ist.

Bei der Entstehung von Schall ist zwischen der direkten Anregung der Luftmoleküle und deren indirekten Anregung zu unterscheiden. Die erstere wird als Luftschallanregung und die letztere als Körperschallanregung bezeichnet. Während bei der direkten Luftschallanregung die Luftmoleküle unmittelbar von der Quelle angeregt werden, findet bei der indirekten Anregung dieser Vorgang über eine schwingende Fläche statt. Dies ist bereits in für Politiker verständlicher Sprache im EU-Projekt STAIRRS 2003 veröffentlicht worden [15].

Maßnahmen zur Reduzierung der Entstehung von Lärm greifen in der Anregung oder in der Übertragung ein. Effiziente Lärminderung geschieht direkt an der Schallquelle Fahrzeug und Gleis und nicht erst am Empfangsorts resp. entlang des Ausbreitungsweges.

Ein sauberer Sinuslauf und Spurführung auf der Strecke auf einem Gleis in einem guten Zustand mit guten Rädern, einem guten Querprofil und sauber verlegte und gestopfte Schwellen führen zunächst zur Entstehung des geringsten Lärms. Geometrische Abweichungen in Längsrichtung der fahrenden Räder sind akustisch betrachtet entscheidend, da an der Stelle

des Rad-/Schienenkontakts zusätzlicher Lärm entsteht. Dieser muss dort direkt vor der Ausbreitung und der nicht Beherrschbarkeit bekämpft werden [14].

Schienenoberflächenfehler (Einzelfehler oder zyklische Fehler) üben weitreichende auslösende Faktoren auf das komplette Befestigungssystem und den Oberbau aus, da deren Impulse das Befestigungssystem in Schwingungen versetzen. Die Komponenten des Oberbaus werden dahingehend beschädigt, dass die Vorspannung ermüdet, die Befestigungsmittel versagen, die Schiene sich bis in die Schwelle einarbeitet und Auswirkungen auf die Schwellen und ihren Schotter haben, da dieser häufiger gestopft und werden muss und sich insgesamt durch den gesamten Prozess die Lebensdauer drastisch reduziert [14].

Das gleiche gilt für das unterschiedliche, von Firmen verschieden hergestellte Rollmaterial, welches von einigen Betreibern regelmäßiger als von anderen gewartet wird. Einzelfehler, wie klassische Flachstellen führen zudem zu erheblichen Lärm [14].

Allerdings ist es so, dass die zusätzliche Lärmbelastung früher als die problematische Zerstörung des Materials beginnt. Die Eingriffsgrenzen müssen aus Lärmgründen somit verringert werden.

Die Geräuschemission ist vor allem vom Betriebszustand und der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig, siehe **Abbildung 3** (siehe auch [16]). Während bei niedrigeren Geschwindigkeiten das Antriebsgeräusch dominant ist, spielen die Rollgeräusche bei mittleren Geschwindigkeiten und die aerodynamischen Geräusche bei höheren Geschwindigkeiten eine zentrale Rolle. Die Stärke der Schallemission und der genaue Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und dem emittierten Geräuschanteil sind vom Fahrzeugtyp und Gleistyp einschließlich Rauheit von Rad und Schiene abhängig. Das Gesamtgeräusch setzt sich aus den verschiedenen Geräuscharten zusammen und wächst mit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Eine Geschwindigkeitsverdoppelung führt zu einer Erhöhung des Antriebsgeräusches um 3 dB, zu einer Erhöhung des Rollgeräuschs um 9 dB und zu einer Erhöhung des aerodynamischen Geräuschs um 18 dB. Wenn lediglich am Antrieb Lärminderungsmaßnahmen ergriffen werden, führt dies dazu, dass der Geschwindigkeitsbereich in dem der Antrieb die dominante Rolle spielt verkleinert wird und dafür der Einfluss des Rollgeräuschs in einem größeren Geschwindigkeitsbereich dominiert.

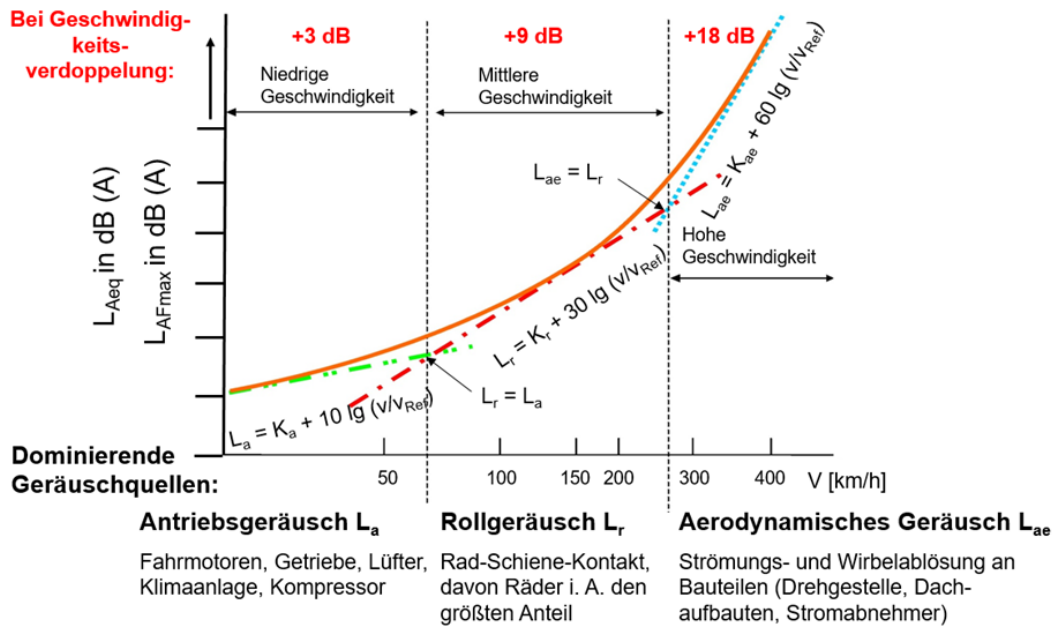


Abbildung 3: Quellen der Geräuschemission in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit

3.3 Methoden zur Lärminderung des Schienenverkehrs

Im Hochbau werden akustische Maßnahmen oft durch Erhöhung von Masse durchgeführt. Im Fahrzeugbau sind jedoch leichte Strukturen notwendig. Daher können nicht alle akustische Maßnahmen, die beispielsweise in einem Gebäude eingesetzt werden, im Fahrzeugbau verwendet werden. Nachfolgend sind einige bewährte Methoden zur Lärminderung im Schienenverkehr aufgelistet (siehe auch [17] [19] [20]):

1. Durch zweischalige Strukturen werden große Dämmwirkungen im Innenraum des Fahrzeugs erzielt. Auf diese wird jedoch verzichtet, wenn die Fahrzeuge nicht tunneltauglich sein müssen [18].
2. Der Einsatz von Absorptionsmaterial im Innenraum bietet eine höhere Aufenthaltsqualität, steht aber im Konflikt mit Reinigung und Vandalismus [18].
3. Zur Minderung der Anregung von Körperschall ist es zweckmäßig, die unabgefederten Massen so klein wie möglich zu halten und die Masse des Fahrwerkrahmens möglichst weich in alle Raumrichtungen an die Radsatzlager anzukoppeln [18].
4. Schwellenbesohlung: Das Besohlungsmaterial führt zu einer größeren Kontaktfläche zwischen Schwelle und Schotter. Dadurch wird eine erhöhte Stabilität des Gleisbettes gewährleistet und führt damit zu einer Verschleißreduzierung am Gleis. Die Elastizität der Sohle verringert die Weiterleitung von Erschütterungen. Allerdings vergrößert der vermiedene Abfluss von Schwingungsenergie den Luftschall. Der Lärm nimmt also zu, die Erschütterung der angrenzenden Gebäude ab [18].



Abbildung 4: Schwellenbesohlung [18]

5. Schallschutzwand (SSW, Gabionenwand, nSSW (niedrige SSW)): Das Minderungspotenzial einer Schallschutzwand (SSW) ist abhängig von der Höhe und der Lage der Schallschutzwand, dem Abstand zwischen Emissionsort und Schallschutzwand sowie dem Abstand zwischen Schallschutzwand und Immissionsort.

Mit Schallschutzwänden werden vor allem tieffrequente Signalanteile wie z.B. Rollgeräusche am Immissionsort minimiert. Diese haben weniger einen Einfluss auf hochfrequente Signalanteile wie z.B. Lüfter-, Antrieb- und Klimaanlagegeräusche. [18]

6. Schienenstegdämpfer: Durch den Einsatz von Schienenstegdämpfer kann eine Lärminderung bis zu 3 dB(A) in Abhängigkeit des Gleiszustandes (Track Decay Rate und Schienenrauheit) erzielt werden. Schienenstegdämpfer erhöhen die Schienenabklingrate und mindern damit die Schallabstrahlung der Schiene. [18]



Abbildung 5: Schienenstegdämpfer [18]

7. Schienenstegabschirmung: Es werden Metallbleche direkt an den Schienensteg montiert. Diese können als Schirme möglichst nah an der Schallquelle wirken. Die Schienenabschirmung mindert nur die Abstrahlung des Luftschalls und wandelt nicht, wie bei Schienenstegdämpfern, die Schwingungsenergie in Wärmeenergie um. Auch hier ist die Lärminderung auf wenige dB begrenzt [18].



Abbildung 6: Schienenstegabschirmung [18]

8. Lüftergeräusche setzen sich vor allem aus Strömungsgeräuschen und dem Schaufeldrehklang zusammen. Diese können durch den Einsatz von großen langsam laufenden Lüfter minimiert werden, die allerdings oft einen hohen Platzbedarf aufweisen und zu teuer sind. Alternativ wird auf den Einsatz von Schalldämpfern zurückgegriffen. Minderungen bis 10 dB(A), in Sonderfällen 15 dB(A) sind möglich [18].
9. Das Quergleiten des starren führenden Radsatzes kann abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit von Rad und Schiene und Umgebungsbedingungen zu einem Kurvenkreischen oder zu einem tieffrequenten Grummeln führen. Die Entstehung des Kurvenkreischens kann u.a. durch radialeinstellende Achsen minimiert werden. Schmiermittel auf der Fahrfläche der Innenschiene hemmen teilweise die Entstehung von Schlupfwellen und verhindern weitgehend das Kurvenkreischen [18].
10. In Europa existieren keine Anforderungen bezüglich des von Stromabnehmer emittierten Schalls. In der Konsequenz werden hohe Schallschutzwände am Immissionsort angebracht, um die Anwohner zu schützen. In Japan werden um bis zu 20 dB(A) leisere Stromabnehmer verwendet [18].
11. Durch den Einbau von Schallschürzen am Drehgestell und/oder am Radsatz kann eine Schallpegelminimierung um wenige dB(A) erzielt werden [18].
12. Bei Lärminderungsmaßnahmen zur Minimierung des Rollgeräusches ist das Rad-Schiene-System als Gesamtkomplex zu betrachten. Zu diesem Zweck muss die Rauheit der Fahrflächen von Rad sowie die der Schiene klein gehalten werden, da wie schon erwähnt, die Stärke der Anregung von der Gesamt-Rauheit abhängt. Die

Bremstechnik beeinflusst die Radrauheit. Durch den Austausch der GG-Bremssohlen (Grauguss) durch LL-Bremssohlen (Low Noise, Low friction) wird das Rollgeräusch auf glatten Schienen um bis zu 10 dB(A) gemindert. Bei rauen Schienen ist die Minderung deutlich geringer. Die Umrüstung von GG auf LL-/K-Sohle ist also nur dann erfolgreich, wenn das Gleis auch glatt ist. Die möglichst geringe Rauheit des Gleises beim Bau muss auch bei der Instandhaltung beibehalten werden. Zur Fahrflächenfehlerbehebung werden Methoden wie Schleifen, Fräsen und Hobeln eingesetzt. Je nach Grad des Fahrflächenfehlers wird entschieden, welche Methode geeigneter wäre, die wiederum die Höhe des Materialabtrags beeinflusst. Abhängig von der verwendeten Methode und dessen Einsatzbedingungen, siehe Kapitel 4, ändert sich das Oberflächenprofil, das seinerseits entscheidend für die Entstehung des Schalls ist. Die Verringerung der Schwingungsdauer wird durch die Optimierung des Abklingverhaltens erzielt. Dabei wird oft versucht die Körperschallschwingungen durch gezielte Dämpfung wie z.B. mit Hilfe der bereits erwähnten Radschallabsorber oder Schienenstegabsorber zu minimieren [18].

4 Verschleiß und Ermüdung von Eisenbahnschienen

Der Stahl auf Stahl Kontakt des Rad-Schiene-Kontakts führt während des Eisenbahnbetriebs zu Materialabnutzungen (Verschleiß) und/ oder Ermüdungsschäden an Rad und Schiene. Dies ist eine Konsequenz von vielen Einflussgrößen, siehe **Abbildung 7**. Das ursprüngliche Schienenprofil ist komplexen Beanspruchungen ausgesetzt, welche aus der Fahrzeug-Fahrweg-Interaktion resultieren. Einerseits wird die Kontaktmechanik und Anregung von Komponenten des Schienenfahrzeugs durch fahrzeugspezifische Parameter wie beispielsweise Geschwindigkeit, Radsatzlast, Kontaktwinkel, Schlüpfе, Querprofilform und den Aufbau der Primärfederstufe beeinflusst. Andererseits hat aber auch der Oberbau, welcher über Steifigkeiten, Dämpfungen und Materialeigenschaften charakterisiert ist, seinen Einfluss an der entstehenden Anregung und Kontaktmechanik. Aus der Vielzahl an komplexen Einflussgrößen entsteht durch die vorhandene Reibleistung im Rad-Schiene-Kontakt in Funktion einer Vielzahl von Überrollvorgängen ein Schädigungsprozess an der Schiene, der über Verschleiß und/oder Ermüdungsschäden charakterisiert werden kann. Mit jedem Überrollvorgang wird das Schienenprofil (das Schienenmaterial) neu beansprucht, was mit der Zeit zu einer Veränderung des Schienenprofils führt.

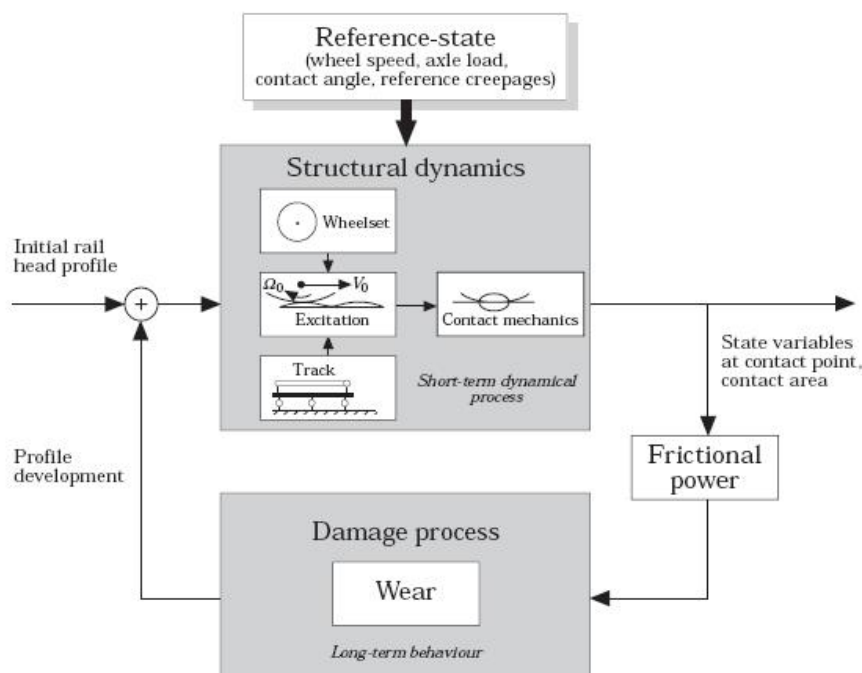


Abbildung 7: Einflussgrößen auf Verschleiß und Ermüdung von Eisenbahnschienen [21]

Neben dem Materialabtrag an Schienen (Verschleiß, üblicherweise an bogenäußeren Schienen in engen Bögen an der Schienenkopfflanke) treten heutzutage vermehrt auch Fahrflä-

chenschäden an den Schienen auf. Fahrflächenschäden können anhand einer Werkstoffumwandlung sowie anhand von Rissen und Verschleiß charakterisiert werden (**Abbildung 8**). In die Kategorie Schäden durch Werkstoffumwandlung können Riffel eingeordnet werden. Bei Schäden durch Verschleiß werden üblicherweise Schlupfwellen genannt. In die Kategorie rissartige Schäden wird meist die Rollkontaktermüdung mit der Vielzahl Ihrer Ausprägungen zusammengefasst. Darüber hinaus gibt es noch Schienenrauheiten und singuläre Effekte/ Besonderheiten des Gleisbaus, die der Vollständigkeit halber genannt sind. Beide stellen zwar keine klassische Schädigung an der Schiene dar, jedoch haben beide einen Einfluss auf den Lärm von Schienenfahrzeugen und sind somit für weiteren Verlauf der Studie von Bedeutung.



Abbildung 8: Klassifizierung der Fahrflächenfehler an einer Eisenbahnschiene ([22] nach [22])

Die Klassifizierung der Fahrflächenfehler erfolgt anhand der Wellenlänge, siehe **Abbildung 9**. Beispielsweise liegen Rauheiten in einem Wellenlängenbereich von 1 bis 10mm.

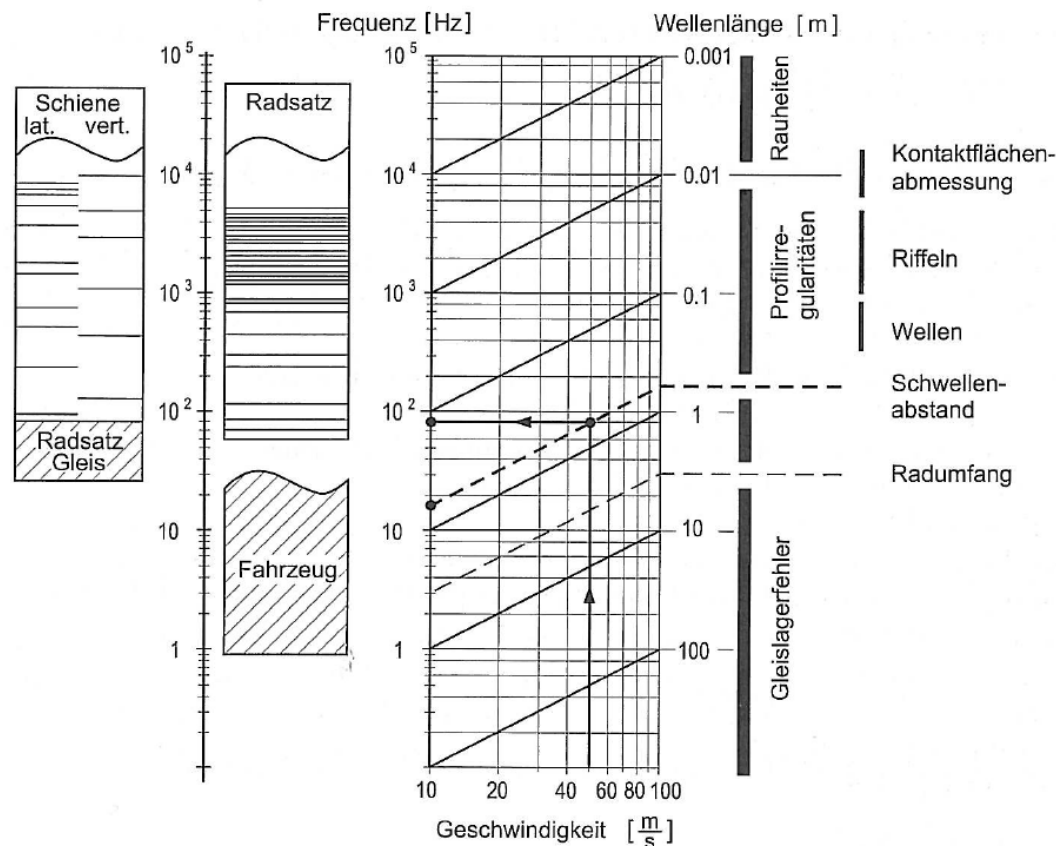


Abbildung 9: Klassifizierung Schienenfehler anhand der Wellenlänge [23]

4.1 Schäden durch Werkstoffumwandlung (Riffel)

Riffel sind periodische Fahrflächenirregularitäten, siehe **Abbildung 10** und **Abbildung 11**. Riffel entstehen aufgrund hoher dynamischer Beanspruchungen in Verbindung mit Werkstoffumwandlung und Verschleiß und treten üblicherweise auf der Schienenoberfläche in geraden Gleisabschnitten oder Bögen mit größeren Radien auf [10]. Der Wellenlängenbereich liegt zwischen 2 und 10 cm bei einer Tiefe von 0,01 bis 0,4 mm [10]. Verriffelte Schienen werden anhand von sich abwechselnden hellglänzenden Bergen (verfestigte Oberflächenschichten mit teils um Faktor drei erhöhter Härte im Vergleich zum Ausgangswerkstoff) und dunklen Tälern (verformte Oberflächenschicht, Korrosion) charakterisiert [10]. Riffel verursachen höhere dynamische Kräfte im Rad-Schiene-Kontakt, siehe **Abbildung 12**. Dies erhöht die Schwingungen von Rad, Schiene und Schwelle, die wiederum mehr Körper- und Luftschallabstrahlen und damit den Lärm von Schienenfahrzeugen erhöhen. Üblicherweise entstehen „heulende“ Geräusche und oftmals wird in diesem Zusammenhang die „heulende Schiene“ genannt (engl.: Roaring rails) [24] [25].



Abbildung 10: Oberfläche einer verriffelten Schiene [26]



Abbildung 11: Rissnetz einer stark verriffelten Schiene – Magnetpulverprüfung mit UV-Licht [22]

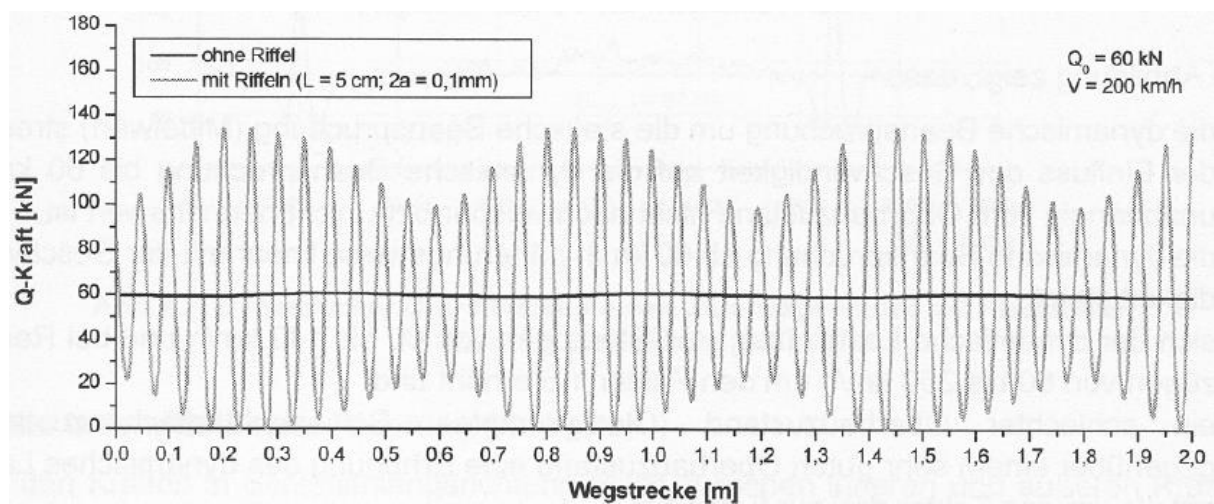


Abbildung 12: Riffeinfluss auf dynamische Vertikalkräfte im Rad-Schiene-Kontakt [2]

Abbildung 13 zeigt die Schallpegelzunahme in Funktion der Riffelhöhe. Der Schallpegel wird nahezu linear durch die mittlere Riffelhöhe beeinflusst und bereits bei einer mittleren Riffelhöhe von 0,25 mm entsteht eine Schallpegelzunahme. Der Lärm des Schienenfahrzeugs wird erhöht. Aufgrund der Komplexität des modernen Eisenbahnbetriebs und der Vielzahl an wirkenden Einflussgrößen konnten bisher genaue Ursache zur Riffelentstehung noch nicht eindeutig ermittelt werden, so dass die Entstehung derzeit nicht vollumfänglich vermieden werden kann [10] [27].

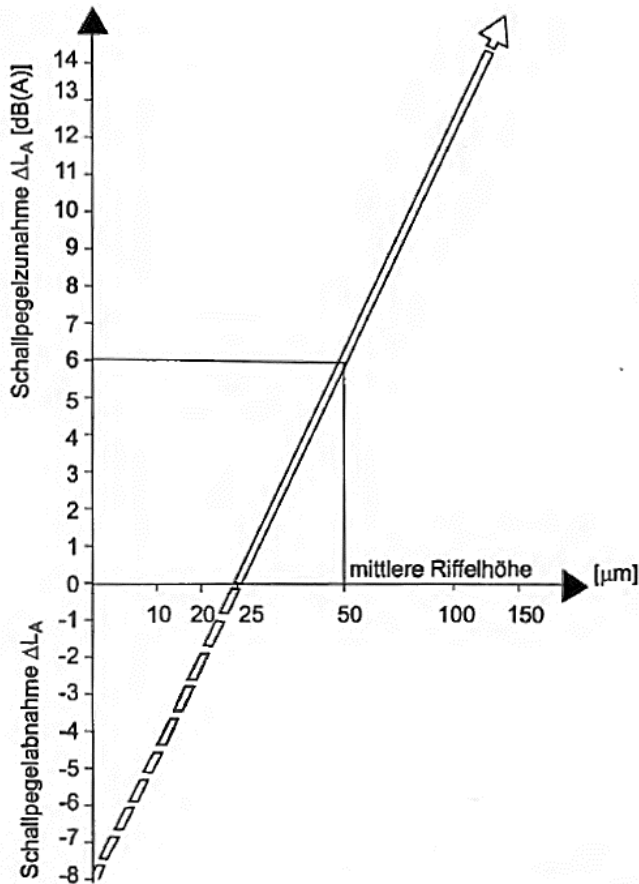


Abbildung 13: Schallpegelzunahme in Funktion der Riffelhöhe [14]

4.2 Schäden durch Verschleiß (Schlupfwellen)

Schlupfwellen sind periodische Fahrflächenirregularitäten auf der Schienenoberfläche und werden charakterisiert über plastische Deformationen und flache Oberflächenrisse (im Vergleich zu Riffeln entwickeln sich jedoch keine hellglänzenden Berge), siehe **Abbildung 14** und **Abbildung 15** [10]. Üblicherweise treten Schlupfwellen an der bogeninneren Schiene in engen Bögen mit Radien $R \leq 800$ m auf [10]. Der Wellenlängenbereich liegt zwischen 5 bis 30 cm bei einer Tiefe von 0,1 bis 1 mm [10]. Schlupfwellen entstehen durch einen Verschleißvorgang, der durch die Relativbewegung zwischen innerem und äußerem Rad in der Kurve entsteht [10]. Bogenaußen läuft der Radsatz im Bereich des Spurkranzes an und zwingt dem Radsatz seine Umfangsgeschwindigkeit auf. Aufgrund der unterschiedlichen Radien an der bogeninneren und bogenäußeren Schiene entsteht im bogeninneren Rad-Schiene-Kontakt Schlupf. Dies führt zu einer erhöhten Oberbaubeanspruchung und der Ausprägung von Schlupfwellen. Schlupfwellen erhöhen den Lärm von Schienenfahrzeuge und senken den Fahrgastkomfort.



Abbildung 14: Oberfläche einer Eisenbahnschiene mit Schlupfwellen [13]

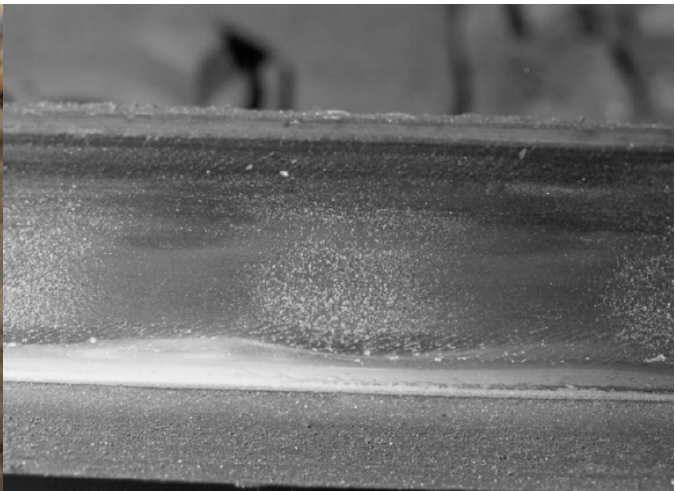


Abbildung 15: Oberfläche einer Eisenbahnschiene mit Schlupfwellen (Nahaufnahme) [22]

4.3 Rissartige Schäden (Rollkontaktermüdung)

Rollkontaktermüdungsschäden entstehen durch ein Dauerfestigkeitsversagen der Schienenoberfläche aufgrund hoher dynamischer Beanspruchungen im Rad-Schiene-Kontakt. Zwar entsteht aufgrund des Sinuslaufs ein Bereich auf der Schiene, in denen die Kontaktpunkte liegen können, jedoch ändert sich dieser bei geringem Verschleiß und ähnlichen Rad-Schiene-Profilen nur unwesentlich. Der kontinuierliche Walzvorgang von Stahl auf Stahl auf einer nahezu gleichen geometrischen Position führt mit der Zeit zur Entstehung von Mikrorissen, wenn der Verschleiß zu wenig Material abträgt. Verschleiß und Risse stehen in Wechselbeziehung, denn ein hoher Verschleiß trägt ermüdetes rissanfälliges Material ab. Geringer

Verschleiß führt zu ermüdetes rissanfälliges Material. In dieser geschwächten Materialschicht können Risse entstehen und weiter in den Schienenkopf wachsen [22]. In die Gruppe der Rollkontaktermüdungsschäden werden verschiedene Ausprägungen wie beispielsweise HeadChecks, Shelling, Belgrospis oder Squats zusammengefasst, die ausgewählt nachfolgend erläutert werden [22].

4.3.1 Head Checks

Head Checks sind feine, schräg verlaufende Risse auf dem Schienenkopf, siehe **Abbildung 16** und **Abbildung 17**. Die Risse treten üblicherweise an der Schienenkopfflanke in Bögen an der bogenäußeren Schiene mit Radien im Radienbereich von $400 \text{ m} \leq R \leq 1200 \text{ m}$ auf [22]. Die Angaben hierzu variieren in der Literatur [28] und eigene Erkenntnisse der TU Berlin bestätigen auch eine Head Check Entstehung in Bögen $R \leq 300 \text{ m}$. Je nach Kontaktpunktlage können sich die Risse auch etwas in Richtung der Schienenkopfmittle verlagern. Mehrere Analysen des Rissmusters zeigen einen nahezu regelmäßigen Rissabstand (ca. 2 – 7 mm) [22] und die Risse stehen meist in einem Winkel von 45 Grad zur Schienenlängsachse (auch diese Angaben variieren in der Literatur). Zu Beginn sind die Risse kaum sichtbar und nur wenige Zehntel Millimeter groß. Diese Mikrorisse entstehen, wenn durch eine Vielzahl von Überrollvorgängen die kritische Bruchenergie erreicht worden ist [22]. Wenig Verschleiß trägt das geschwächte Schienenmaterial kaum ab, so dass Risse in den Schienenkopf wachsen und die Risslänge zunimmt.

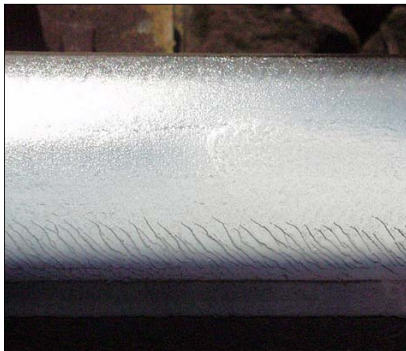


Abbildung 16: Head Check Risse in der Schienenfahrkannte 83 [28]

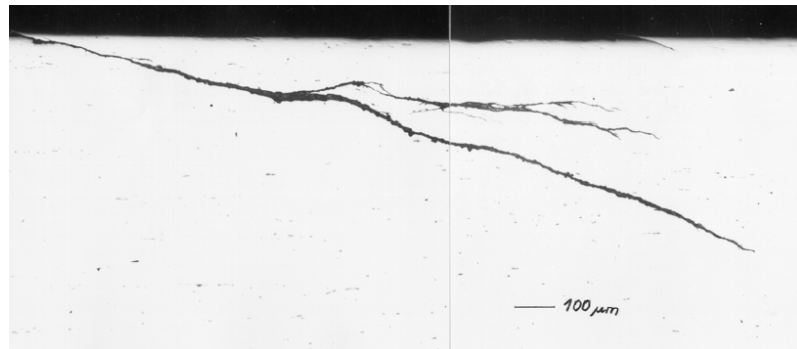


Abbildung 17: Längsschnitt durch einen Head Check – ungeätzt [22]

Eine genaue Vorhersage der Wachstumsrichtung ist komplex, denn Erfahrungen zeigen, dass sich die Risswachstumsrichtung ändern kann. Risse wachsen einerseits in den Schienenkopf hinein oder aus dem Schienenkopf zur Schienenoberkante wieder zurück. Letzteres kann zu ganzen Ausbrechungen von Schienenstücken aus Schienenfahrfläche und Schienenkopfflanke führen [26]. Die Begrifflichkeiten von Ausbrüchen an der Schiene stellt **Tabelle 1** dar.

Tabelle 1: Charakteristik von Ausbrüchen an Schienen

Grad des Ausbruchs	Charakteristik
Klein	Abblättern (Flaking)
Groß	Abplatzung (Spalling)
Massiv	Fahrkantenzusammenbruch (gauge corner collapse)

Nicht entfernte HeadChecks können letztendlich (im schlimmsten Fall) auch zu einem Verlust der Schienenfunktion führen, d.h. die Schiene zerspringt während der Überfahrt in hunderte von Einzelteilen [3]. Eine regelmäßige Schienenbearbeitung ist somit unausweichlich, notwendig und empfehlenswert.

Basierend auf Messungen in den Niederlanden ist eine mögliche Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auftreten von Head Checks in Radien mit verschiedenen Bögen publiziert worden, siehe **Abbildung 18** [27]. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass Head Checks in diesem Fall häufig in Bögen mit einem Radius knapp unterhalb von $R = 2000$ m entstehen können.

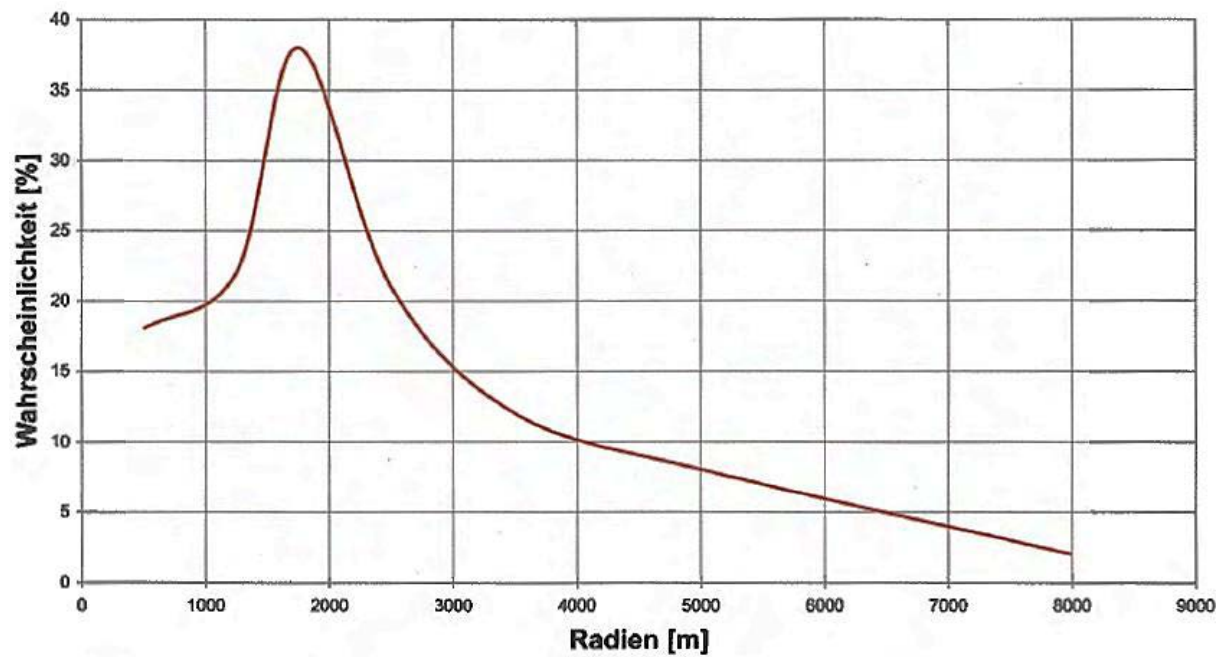


Abbildung 18: Wahrscheinlichkeit der HeadCheck Entstehung in Funktion des Bogenradius (exemplarischer Verlauf auf Basis von Messungen) [27]

4.3.2 Shelling

Shelling beginnt zunächst mit der Ausbildung eines schwarzen Fleckes als eine Konsequenz der Fahrspiegelabsenkung zur Fahrkante hin. Mit zunehmenden Beanspruchungen entsteht ein Fahrkantenausbruch. Üblicherweise tritt das Shelling an der bogenäußeren Schienenkopfflanke auf [29].

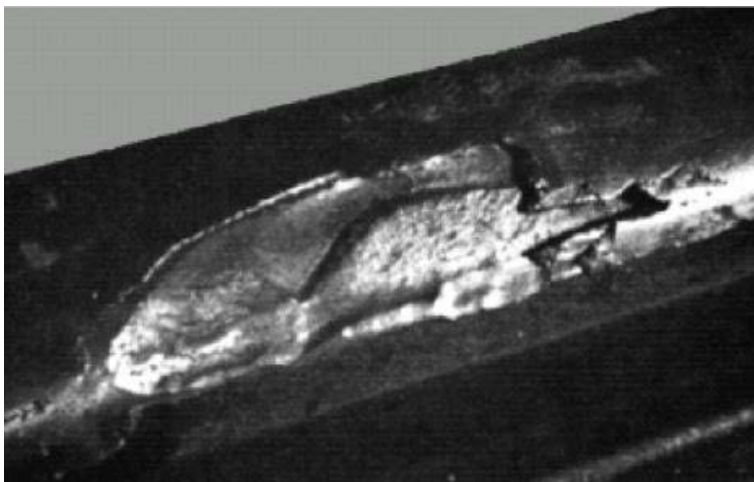


Abbildung 19: Darstellung von Shelling auf einer Eisenbahnschiene [31]

Den Prozess des Fahrkantenausbruchs zeigt **Abbildung 20**. Ausgehend von einem Risswachstum aus der geschwächten Randschicht der Schiene wachsen die Risse in den Bereich der Schienenkopfflanke hinein. Ab einer gewissen Risslänge ist das Material so weit geschwächt, dass es zu einem vollständigen Ausbruch des Schienenmaterials kommt.

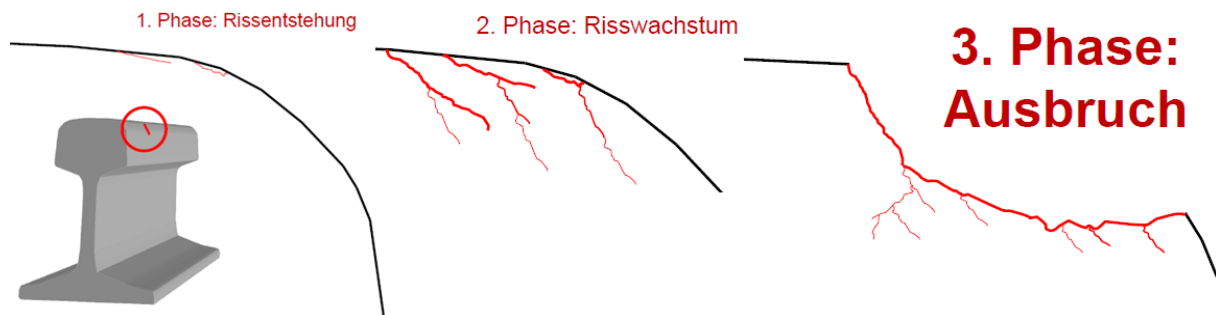


Abbildung 20: Darstellung des Ausbruchs von Schienenmaterial durch Risswachstum [30]

4.3.3 Belgrospis

Belgrospis treten vorwiegend an Schienen mit Verriffelung auf, die mit hohen Geschwindigkeiten befahren werden, siehe **Abbildung 21** und **Abbildung 22** [32]. Belgrospis wurden erstmalig auf Schnellfahrstrecken der Deutschen Bahn AG von **Belz**, **Grohmann** und **Spiegel** entdeckt und der Begriff Belgrospi ist mittlerweile national und international anerkannt und gebräuchlich [32]. Durch die Verriffelung werden die dynamischen Kräfte, die auf die Schiene wirken, erhöht, woraus Rissnester oder Rissflecken entstehen [32]. Belgrospi-Risse stehen üblicherweise in einem Risswinkel von 45 Grad zur Schienenlängsachse [27].



Abbildung 21: Belgrospis [29]

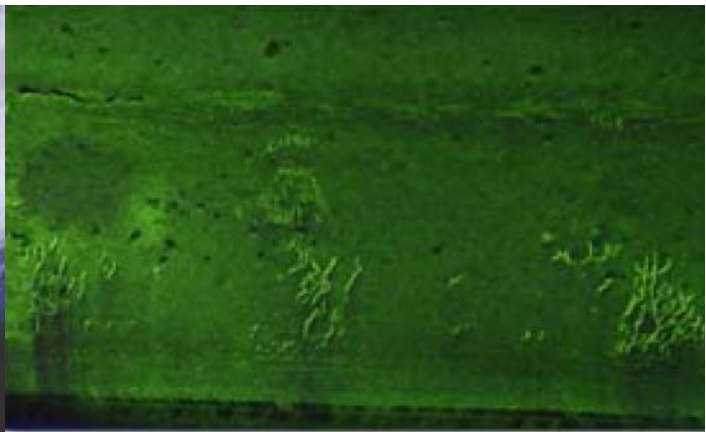


Abbildung 22: Belgrospi Rissnester [26]

4.3.4 Squats

Squats sind ein Fahrflächenfehler, der vor allem auf geraden Streckenabschnitten oder in Bögen mit sehr großen Radien auftritt [22], die mit hohen Geschwindigkeiten befahren werden, siehe **Abbildung 23** und **Abbildung 24** [27]. In diesen Streckenabschnitten ist es charakteristisch, dass der Rad-Schiene-Kontaktbereich meist mittig auf dem Schienenkopf liegt und die Kontaktpunktlage immer im nahezu gleichen Bereich des Querprofils liegt. Üblicherweise tritt an diesen Schienen ein relativ geringer Verschleiß auf, d.h. das rissanfällige versprödete Oberflächenmaterial wird kaum abgetragen. Die sich vergrößernden Risse verursachen zunächst dunkle Verfärbungen (schwarze Punkte). Ein weiteres Wachstum führt dazu, dass die Risse an der Schienenkopfflanke offen liegen und ein Teil des Fahrspiegels abgesenkt wird (halbmond- oder v-förmige flache Delle) [22] [27] [29]. Die Entstehung von Squats kann mit einer veriffelten Schiene in Verbindung gebracht werden, die die auf die Schienen wirkenden dynamischen Kräfte erhöht [32]. Eine weitere Möglichkeit kann auch das Eindringen eines Fremdkörpers in den Rad-Schiene-Kontakt sein [32].

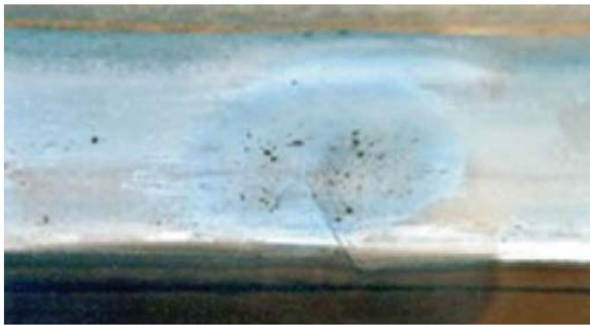


Abbildung 23: Squats [29]



Abbildung 24: Squats [32]

4.4 Singuläre Effekte

Neben den Fahrflächenfehlern, die in Bereichen von mehreren Kilometern auf der Schienoberfläche auftreten können, gibt es auch singuläre Effekte. Diese werden üblicherweise nicht in die Kategorie „Fahrflächenfehler“ eingeordnet, da es sich nur lokal begrenzte Effekte handelt. Nichtsdestotrotz sollten auch singuläre Effekte betrachtet werden, da sich die lokale entwickelte Materialschwächung auch vergrößern kann.

Periodische oder singuläre Eindrückungen

Fremdkörper wie Schotter- und Metallsplitter oder sonstiger Natur können in den Rad-Schiene-Kontakt gelangen und als Ursache für Einzelschäden (Eindrückungen) oder periodische Schäden am Gleis sein, wenn der Fremdkörper sich ins Rad gedrückt hat, siehe **Abbildung 25**. Die Eindrückungen können das Oberflächenmaterial der Schiene schwächen, für zusätzliche impulsartige Anregungen im Rollvorgang des Rades auf der Schiene sorgen und

damit den Lärm beeinflussen. Zudem stellen Eindrückungen Schwächungen des Oberflächenmaterials dar, die eine Rissentstehung an diesen Stellen begünstigen kann.



Abbildung 25: Eindrückung einer Kugel in die Schienenoberfläche [31]

Schleuderstellen

Schleuderstellen stellen ebenfalls lokale Materialschwächung der Schiene dar, siehe **Abbildung 26**. Schleuderstellen entstehen, wenn die angetriebenen Achsen der Schienenfahrzeuge die Haftwertgrenzen überschreiten. Auf der Schiene entstehen selbstgehärtete Flecke mit einem ovalen Umriss. Das Oberflächenmaterial ist geschwächt und lokal kann dies die Rissentstehung begünstigen.



Abbildung 26: Schienendeformation nach Schleudervorgang eine E-Lok [31]

4.5 Schienenrauheiten

Schienenrauheiten sind neben den genannten singulären Effekten ebenfalls keine klassische Schienenfehlerart, sondern eher eine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit (Wellenlängenbereich 1-10 mm, siehe **Abbildung 9, Seite 27**). Den Unterschied zwischen Welligkeit und Rauheit stellt **Abbildung 27** anschaulich dar.

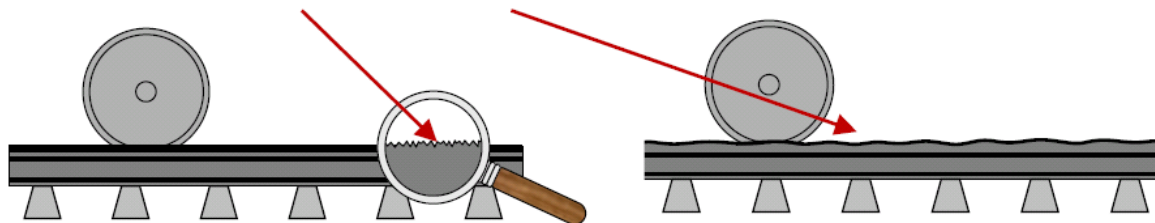


Abbildung 27: Gegenüberstellung und Vergleich Schienenrauheit (links) und Welligkeit (rechts) [2]

Üblicherweise tritt eine Kombination von beidem auf, siehe **Abbildung 28**.

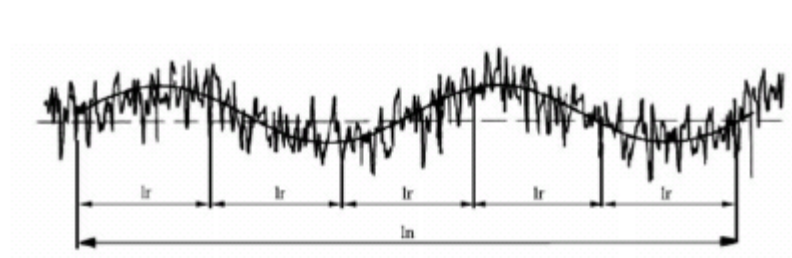


Abbildung 28: Zusammenhang von Schienenrauheit und Welligkeit [2]

5 Strategien und Verfahren der Schienenbearbeitung

Systembedingt kann die Entstehung von Fahrflächenfehlern aufgrund der heutigen Randbedingungen des Eisenbahnbetriebs (u.a. hohe Traktionsleistungen, Radsatzlasten und Fahrgeschwindigkeiten) nicht vollständig vermieden, sondern nur in ihrer Entstehung durch eine anspruchsvolle Abstimmung zwischen Fahrzeug und Fahrweg verzögert werden [33]. Neben fahrwegseitigen Ansätzen wie optimierten Schienenprofile zur Vermeidung von HeadChecks [32] oder Optimierung der Spurkranz- oder Fahrflächenschmierung zur Verschleißreduktion bleibt somit für Infrastrukturbetreiber nur die regelmäßige Schienenpflege übrig, um eine Ausbreitung der Risse oder eine ausufernde Deformation des Querprofils zu vermeiden. Heutzutage kommen tagtäglich verschiedene Strategien und Verfahren der Schienenbearbeitung zum Einsatz, die nachfolgend erläutert werden. Die Strategien und Verfahren der Schienenbearbeitung unterliegen grundsätzlich immer den Zielen, dass die Fahrbahnverfüg-

barkeit durch die Schienenbearbeitung möglichst nicht eingeschränkt wird und die Kosten der Bearbeitung möglichst sehr niedrig sind.

5.1 Strategien der Schienenbearbeitung

Häufig werden Schienen vorwiegend präventiv oder korrektiv/reaktiv bearbeitet. Die präventive Strategie verfolgt den Ansatz einer regelmäßigen Schienenbearbeitung, um in festgelegten (kurzen) Zeitintervallen (z.B. 3x pro Jahr) eine Materialdicke von 0,1 bis 0,2 mm am Schienenkopf abzutragen [32]. Dieser minimale Materialabtrag ist ausreichend, denn diese durch den Walzvorgang im Rad-Schiene-Kontakt geschwächte Randschicht der Schiene ist Ursprung der Entwicklung verschiedener Fahrflächenfehler, d.h. diese Materialschicht wird rissanfällig und bei mangelndem Abtrag können die Risse weiter in den Schienenkopf wachsen, siehe **Abbildung 29**.

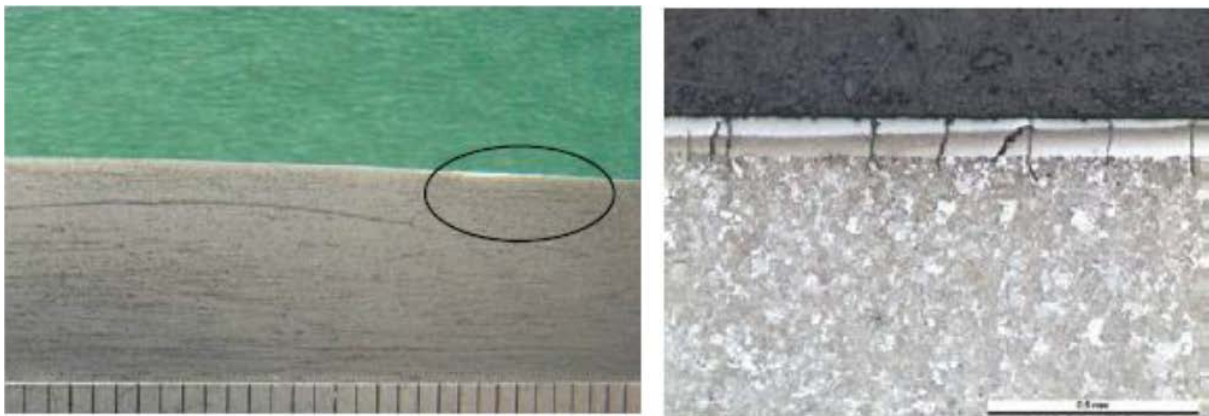


Abbildung 29: Geschwächte Oberflächenschicht einer Schiene mit bereits vorhandener Rissentwicklung und Wachstum in Richtung des Schienenkopfes [2]

Mit Abtrag dieser Schicht ist die ursprüngliche Materialeigenschaft der Schiene wiederhergestellt und es bedarf wieder einer Vielzahl von Überrollvorgängen (Überfahrten von Schienenfahrzeugen), bis die neue Oberfläche wieder geschwächt und rissanfällig wird. Ein höherer Materialabtrag (im präventiven Ansatz) wäre unwirtschaftlich und würde die Lebensdauer der Schiene nur unnötig reduzieren, denn deutlich früher wäre der Verschleißvorrat erschöpft. Die Schiene müsste früher als eigentlich nötig ausgetauscht werden. Zudem würde die Schienenoberfläche, die mit einem höheren Materialabtrag hergestellt worden wäre, nach genauso vielen Überfahrten wieder geschwächt sein wie die Oberfläche, von der vorher eine Materialdicke von nur 0,1-0,2 mm abgetragen worden wäre. Mit der präventiven Strategie wird somit eine hohe Schienenliegezeit und eine konstante Schienenqualität nahe des Einbaustands angestrebt, siehe **Abbildung 30**. Der Anteil der präventiven Schienenbearbeitung hat sich in den letzten Jahren kontinuierlich erhöht, siehe **Abbildung 31**. Von 2008 bis 2012 hat sich nahezu eine Verzehnfachung der Schleiflänge ergeben. Neuere Zahlen sind leider nicht zu finden gewesen. Da aber die Zahl der Schleifmaschinen weiter zugenommen

hat, ist auch von einem weiteren Wachstum der Schleiflänge auszugehen. Im präventiven Ansatz muss jedoch sichergestellt werden, dass die Schienenbearbeitung in ausreichender Anzahl pro Jahr auf der Strecke stattfindet (z.B. 3x pro Jahr). Ansonsten reicht der Abtrag der hauchdünnen Materialschicht nämlich nicht mehr aus, da die Risse bereits weiter in den Schienenkopf gewachsen sind. Die tiefer liegenden Risse würden nicht entfernt werden und nach der Schienenbearbeitung liegt keine Materialeigenschaft nahe der Ausgangsqualität vor, d.h. deutlich früher könnten sich wieder Fahrflächenfehler entwickeln. Im Rahmen der präventiven Strategie kommen Verfahren der Schienenbearbeitung zum Einsatz, die einen geringen Materialabtrag auf der Schiene erzielen.

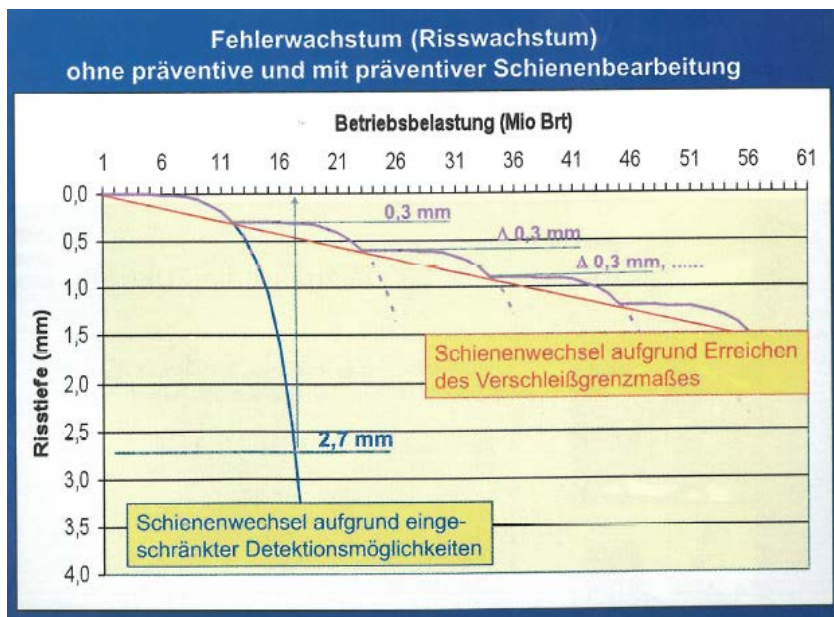


Abbildung 30: Risswachstum ohne Schienenbearbeitung und mit präventiver Schienenbearbeitung [37]

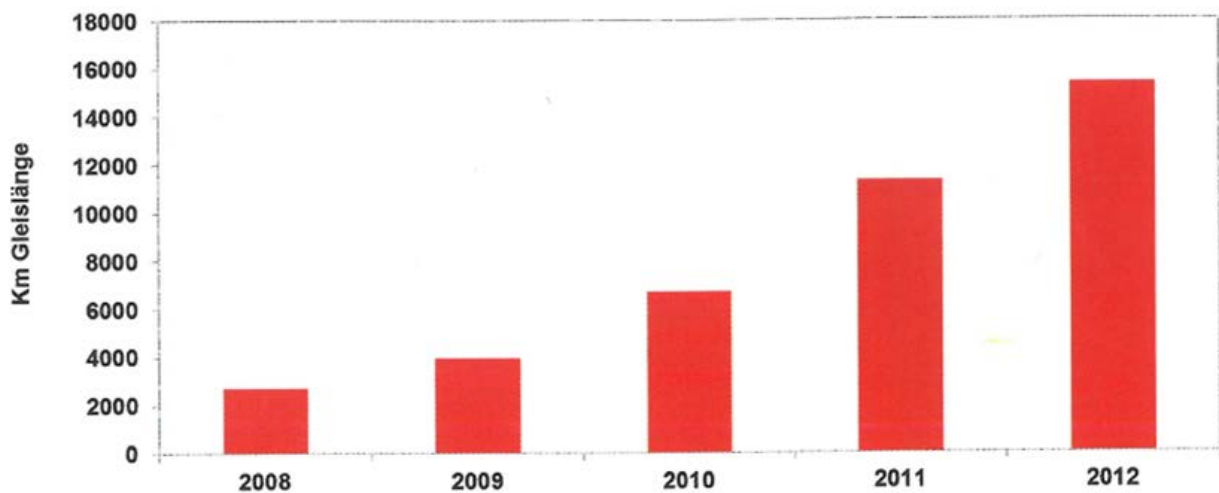


Abbildung 31: Entwicklung der Gleislänge, auf der präventive Schienenbearbeitung erfolgt [35]

Die korrektive/reaktive Strategie hingegen wird verfolgt, wenn die Schiene bereits in einem fehlerbehafteten Zustand ist. Fehlerbehaftete Schienen können entstehen, da beispielsweise die Verfügbarkeit von Schienenbearbeitungsmaschinen begrenzt ist oder gute Erfahrungswerte mit größerem Abtrag in größeren Zeitintervallen vorliegen. Fehlerbehaftete Schienen zeigen beispielsweise bereits plastische Verformungen des Querprofils (z.B. plattgewalzte Schiene, starker Verschleiß der Schienenkopfflanke an bogenäußeren Schienen) oder ausgeprägte Fahrflächenfehler mit großer Risstiefe. Die präventive Strategie ist dann nicht mehr einsetzbar, da der damit einhergehende geringe Materialabtrag die ausgeprägten Fehler (wirtschaftlich) nicht mehr vollständig entfernen kann. Im Rahmen dieser Strategien werden Verfahren der Schienenbearbeitung eingesetzt, die bereits mit einer Überfahrt viel (fehlerbehaftetes) Material der Schiene abtragen können. Der reaktive Ansatz bedeutet, dass auf der Strecke ein Abschnitt mit ausgeprägten Fahrflächenfehlern entdeckt worden ist. Entsprechende Maßnahmen mit großem Materialabtrag zur Entfernung der Fahrflächenfehler werden ergriffen.

Den Einfluss der Schleifstrategie auf die Schienenliegedauer zeigt **Abbildung 32** am Beispiel der Schnellfahrtstrecken Köln-Rhein/Main und Nürnberg-Ingolstadt. Auf Gleisen beider Strecken entstehen durch den Schnellverkehr ausgeprägte HeadChecks. Der korrektive Ansatz (Köln-Rhein/Main) ist mit einem Materialabtrag von 1,8 mm alle 2 Jahre (6 € pro Meter und Jahr) in diesem Fall charakterisiert. Die Schienenschädigung verhält sich nicht linear, d.h. es bedarf zunächst vieler Überrollvorgänge von Schienenfahrzeugen, bis das Oberflächenmaterial der Schiene geschwächt wird. Anschließend nimmt die Schädigungsgeschwindigkeit jedoch zu, d.h. die Risse wachsen schneller (siehe **Abbildung 31**), wenn das versprodete Material nicht abgetragen wird. Innerhalb des großen Bearbeitungsintervalls (2 Jahre) wurde die Oberfläche der Schiene geschwächt und die Risse hatten ausreichend Zeit, um

in den Schienenkopf zu wachsen. Trotz des dann einmalig hohen Materialabtrags konnten die bereits tiefliegenden Risse nicht vollständig entfernt werden. Die neue Schienenoberfläche lag in einem geschwächten Zustand vor. Dies führte wiederum zu einer zeitigen Entwicklung der Head Checks. Insgesamt führte dieser korrektive Ansatz zu einer erwarteten Schienenliegedauer von 8 bis 12 Jahren.

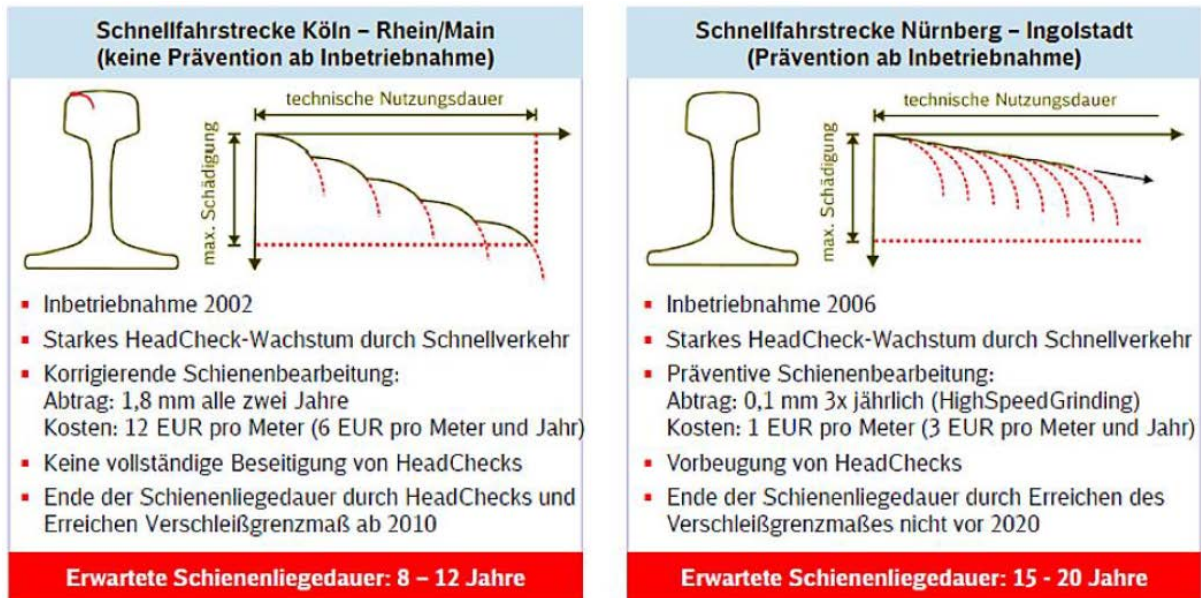


Abbildung 32: Zusammenhang Schleifstrategie und Schienenliegedauer [2]

Die verhältnismäßig niedrige Schienenliegedauer rief einen Strategiewechsel in der Schienenbearbeitung hervor, der auf der Schnellfahrstrecke Nürnberg-Ingolstadt getestet worden ist. Hier wurde die präventive Strategie verfolgt (3x jährlich mit High Speed Grinding Verfahren, Kosten: 3 € pro Meter und Jahr). Mit den kurzen Bearbeitungsintervallen konnte regelmäßig die geschwächte Randschicht der Schiene abgetragen werden. Dies beugte der Head Check Entstehung vor und gleichermaßen führte der regelmäßige sehr geringe Materialabtrag (0,1 mm) auch zu einer deutlichen Schonung des Verschleißvorrates am Schienenkopf. Dies erhöhte die Schienenliegedauer auf 15-20 Jahre.

5.2 Verfahren der Schienenbearbeitung

Weltweit gibt es verschiedene Firmen, die Schleif- und Fräsleistungen an den Schienen anbieten und täglich Schienen bearbeiten, siehe **Tabelle 2**.

Tabelle 2: Übersicht Maschinen zur Schienenbearbeitung
(Zusammenstellung von [43] basierend auf [38] [39] [40] [41] [42])

Firma	Maschine	Modell	Eigenschaften
Plasser & Theurer	Schleifmaschinen	GWM 550	Gelenkbauweise für Gleise und Weichen mit 5 Schleifaggregaten pro Schiene
		GWM 250	- für Gleise und Weichen - mit 2 Schleifaggregaten pro Schiene
	Hobelmaschinen	SBM 250	Schienenhobelmaschine
Loram	Schleifmaschinen	RGI-Serie	60 Schleifsteinen + 12 km/h Arbeitsgeschwindigkeit
		RG400 Serie	Ermöglicht tiefe Schnittwinkel, mehrere Steine + bis zu 32 km/h Arbeitsgeschwindigkeit
L&S Luddeneit und Scherf GmbH	Schleifmaschinen	RRGM 1-20 RRGM 0-16 RRGM 1-6/AM65 LRGM 2-12 LRGM 1-6/AM65 LRGM 1-2/AM16	Beseitigung von Walzhaut, Riffeln, kurze Wellen in der Schienenoberfläche sowie Profilierung des Schienenkopfquerprofils
Vossloh	Schleifmaschinen	HSG-2	- HighSpeedGrinding mit bis zu 80 km/h - Materialabtrag von 0,1 mm nach 3 Überfahrten
		HSG-city	- HighSpeedGrinding im Nahverkehr mit bis zu 60 km/h - Materialabtrag: bis 0,01 mm/Überfahrt - Schienenrauheit: Ra < 10 µm
	Schienenfräsen	High Performance Milling	- Durchmesser von 1.400 mm - Fräsgeschwindigkeit von bis zu 2 km/h
Schweerbau	Schleifmaschinen	RG 48 I + II SPML 16	- Reprofilierung + Head-Check-Beseitigung - Riffelbeseitigung - Akustisches Schleifen
		GWM 550	Arbeitet nach dem Rutschersteinprinzip
	Schienenfräsen	SF 03	Mobile Schienenfräse
		SFU 04	Schienenfräse für U-Bahnen
	Schienenhobeln	SBM 250	Für die Beseitigung großer Schienenfehler, Spurverengungen und zur Bearbeitung von abgefahrenen bogenäußeren Schienen

Jeder Anbieter setzt seine Maschinen ein, um mit verschiedenen Verfahren den geforderten Materialabtrag zur Entfernung der Fahrflächenfehler auf der Schiene erzielen, siehe **Abbildung 33**.

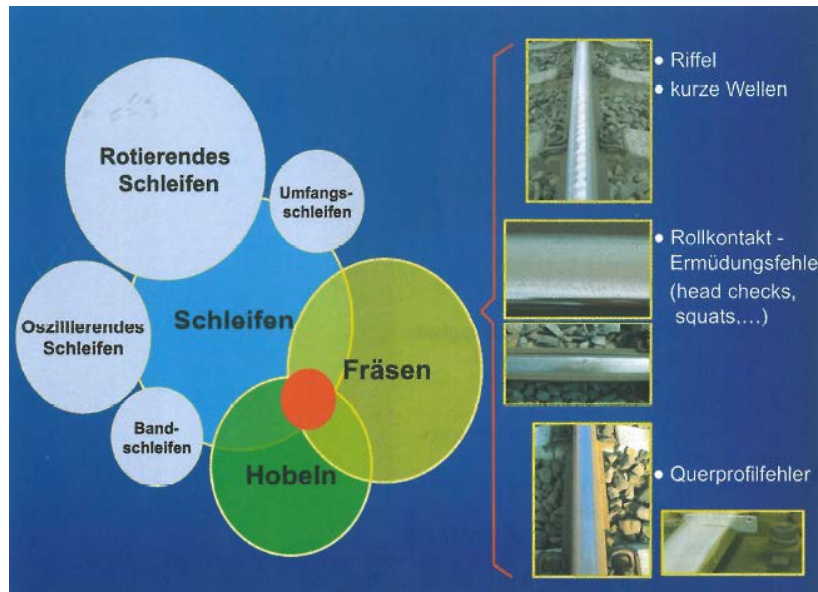


Abbildung 33: Schienenfehler und Schienenbearbeitungsverfahren [37]

Grundsätzlich gibt es zwischen der Bearbeitungsstrategie und dem Schleifverfahren einen Zusammenhang. Zwar kann theoretisch jedes Verfahren in jeder Strategie eingesetzt werden, jedoch ist dies nicht zwangsläufig auch wirtschaftlich. **Tabelle 1** gibt eine mögliche Zuordnung von Strategien und geeigneten Verfahren der Schienenbearbeitung. Der notwendige Materialabtrag ist hierbei die Größe, die meist das Verfahren vorgibt. Beispielsweise impliziert das korrektive Verfahren einen großen Materialabtrag an der Schiene. Dies kann zwar theoretisch auch mit dem oszillierenden Schleifen erreicht werden, jedoch nur mit einer Vielzahl von (unwirtschaftlichen) Schleifvorgängen. Die wesentlichen Verfahren sind in **Abbildung 34** dargestellt und nachfolgend werden diese erläutert. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch das klassische Rutschersteinverfahren genannt, das als sog. Pflege Schleifen von Schienen bekannt ist und eher zur Entfernung von oberflächlichen Verschmutzungen genutzt wird. Vereinzelt wird dieses Verfahren auch zur Entfernung von geschwächtem Material an der Schiene eingesetzt, jedoch sind aufgrund des äußerst geringen Materialabtrags äußerst viele Schleifüberfahrten notwendig

Tabelle 3: Zuordnung Verfahren und Strategie der Schienenbearbeitung [43]

Schleifverfahren	Strategie Schienenbearbeitung
Oszillierendes Schleifen	Präventiv
High Speed Grinding (HSG)	
Rotierendes Schleifen	Präventiv, reaktiv, korrektiv
Fräsen	Reaktiv/ korrektiv
Schienenhobeln	

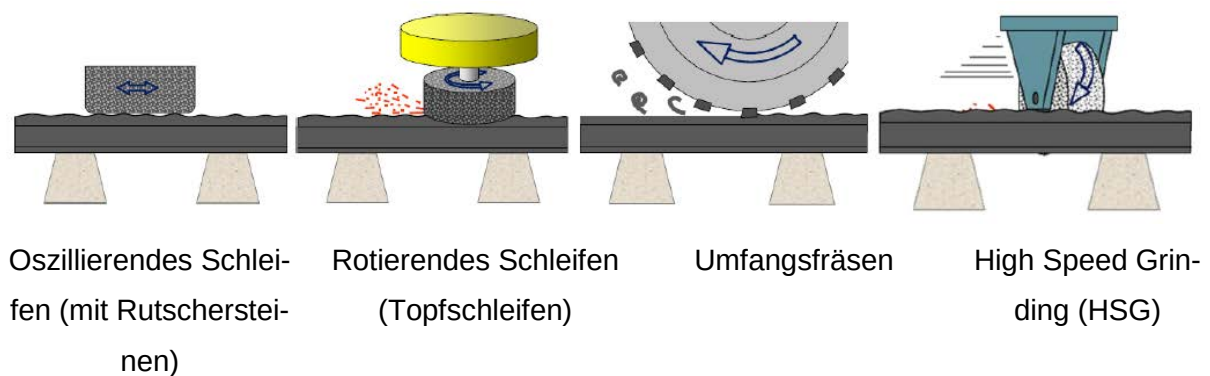


Abbildung 34: Prinzip der verschiedenen Schienenbearbeitungsverfahren [2]

5.2.1 Oszillierendes Schleifen

Das oszillierende Schleifverfahren ist über die Verwendung von Rutschersteine charakterisiert, die sich auf der Schiene zusätzlich zur Bewegung des Schleifzugs mit einem Antrieb vor- und zurück bewegen und ein Schliffbild mit Längsrillen erzeugen, siehe **Abbildung 35**. Die Schleifgeschwindigkeit (bis zu 2 km/h) und der Materialabtrag pro Schleifvorgang sind gering (bis zu 0,12 mm mit 5 Aggregaten). Somit ist das Verfahren für präventive Schleifarbeiten oder für die Nachbearbeitung der Schienenoberfläche geeignet, z.B. nach einer frästechnischen oder rotatorischer Schienenbearbeitung. Durch die Längsrillen entsteht bereits nach der Bearbeitung ein lärmreduzierendes Schliffbild, da die Längsrillen im Vergleich zu Querrillen keine zusätzlichen impulsartigen Anregungen verursachen oder Luft sich nicht in Querrillen verdichten und zur Seite wegzischen kann [45]. Das Verfahren wird deshalb für die Bearbeitung von Besonders überwachten Gleisen (BüG) eingesetzt [44]. Die geringe Arbeitsgeschwindigkeit sorgt für betriebliche Einschränkungen, so dass tagsüber nur während einer Streckensperrung oder in der Nacht während der Betriebspause geschliffen werden kann.



Abbildung 35: Schienenoberfläche nach oszillierender Schienenbearbeitung [45] und Schienenschleifmaschine mit oszillierendem Schleifverfahren [46]

5.2.2 Rotierendes Schleifen mit Topfscheiben

Das oszillierende Schleifverfahren ist über die Verwendung von Topfscheiben charakterisiert, die um die Hochachse angetrieben sind und ein Schliffbild mit unterschiedlich ausgeprägten Querrillen erzeugen. **Abbildung 36** zeigt eine Schleifmaschine, die mit dem rotierenden Verfahren Schienen bearbeitet.



Abbildung 36: Rotierendes Schleifen mit Topfscheiben [46]

Tabelle 4 zeigt verschiedene Schliffbilder, die in Abhängigkeit des Vorschubs und der Körnung der Schleifscheiben entstehen können. Auch hier ist die Anzahl der Schleifscheiben für den entstehenden Materialabtrag pro Schleifvorgang relevant, so dass dieses Verfahren sowohl für präventive als auch korrektive Schleifarbeiten (ggf. mit Erhöhung des Anpressdruckes) eingesetzt werden kann. Da die Schleifscheiben nicht immer absolut tangential zur Oberfläche rotieren, tritt nur bei sehr kleiner Vortriebsgeschwindigkeit und kleinem Anpressdruck eine glatte Oberfläche auf. Die Oberflächengüte schwankt demnach sehr stark je nach Art und Weise der Maschineneinstellung (Vortriebsgeschwindigkeit, Anpressdruck und Qualität der Maschine selbst) zwischen sehr glatt und extrem rau. Die geringe Arbeitsgeschwin-

digkeit sorgt für betriebliche Einschränkungen, so dass tagsüber nur während einer Streckensperrung oder in der Nacht während der Betriebspause geschliffen werden kann.

Tabelle 4: Unterschiedliche Schliffbilder nach Schienenbearbeitung mit rotierendem Schleifen [47]

Zielsetzung	Fein	Standard	Aggressiv
			
Vorschub	3 km/h	3-6 km/h	6-10 km/h
Qualität	Hoch	Standard	Niedrig
Akustik	Leise	Standard	Laut

5.2.3 Hochgeschwindigkeitsschleifen (HSG)

Das Hochgeschwindigkeitsschleifen der Fa. Vossloh zeichnet sich über (den Schlupf) passiv angetriebene (walzenförmigen) Schleifkörper, die in einem Winkel von 45 Grad zur Schienenlängsachse stehen, siehe **Abbildung 37**. Bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h wird nach drei Überfahrten ein Materialabtrag von ca. 0,1 mm erzielt, so dass sich dieses Verfahren besonders für die präventive Schienenbearbeitung zum Abtrag der geschwächten Randschicht der Schiene eignet.

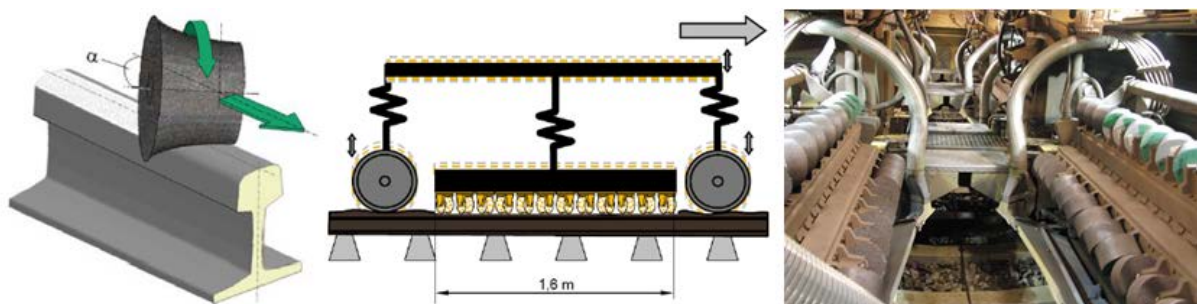


Abbildung 37: Prinzip des Hochgeschwindigkeitsschleifens (links und mittig: [30])

Abbildung 38 zeigt das charakteristische Kreuzschliffbild nach dem Hochgeschwindigkeitsschleifen. Da die Riefen nicht quer zur Fahrrichtung sind, sondern im Winkel von 45° ist der Einfluss auf die Geräuscentstehung eher gering, trotz der nicht wirklich glatten Oberfläche. Die hohe Schleifgeschwindigkeit ermöglicht auch ein Schleifen während des Betriebs, so dass die Schleifarbeiten nicht zwangsläufig während Streckensperrungen oder während der Betriebspause stattfinden müssen (der Schleifzug kann theoretisch in den Fahrplan integriert werden).



Abbildung 38: Kreuzschliffbild nach Hochgeschwindigkeitsschleifen (links: [30], rechts: [2])

5.2.4 Schienenfräsen

Die frästechnische Schienenbearbeitung zeichnet sich durch ein um die Querachse rotierenden Fräsrads aus, an dem mehrere Werkzeugkassetten befestigt sind, siehe **Abbildung 39**. Charakteristisch für dieses Verfahren ist ein hoher Materialabtrags pro Fräsvorgang. Dieses Verfahren eignet sich somit besonders für die Reprofilierung von Schienen oder die Entfernung von tiefliegenden Rissen im Rahmen der korrektiven/ reaktiven Strategie. Mit einer Überfahrt können bei einer Fräsgeschwindigkeit von bis zu 2 km/h bis zu 2,5 mm an Material abgetragen werden. Die geringe Schienenbearbeitungsgeschwindigkeit erfordert eine Streckensperrung oder eine Schienenbearbeitung während der Betriebspause.



Abbildung 39: Fräsrads mit Werkzeugkassetten [48]

Verfahrensbedingt entstehen direkt nach dem Fräsen Restwelligkeiten (sog. Schuppen, siehe **Abbildung 40 und Abbildung 41, links**), so dass nach dem Fräsen die Schienenoberfläche geschliffen wird, siehe **Abbildung 40** (mittig). Neu entwickelte Verfahren wie das High Performance Milling der Fa. Vossloh verwenden ein Fräsrads mit einem größeren Durchmesser, womit bereits grundsätzlich die Welligkeit nach dem Fräsen reduziert wird, siehe **Abbildung 41**. Innovativ ist zudem, dass statt einer schleiftechnischen Schienenbearbeitung im Nachgang eine neue Finisher Technologie eingesetzt wird. Mit diesem Nachfräsprozess wird eine sehr glatte Schienenoberfläche mit sehr geringen Rauheiten erreicht, siehe **Abbildung 40** (rechts) [38]. Konventionelle Schienenfräsmaschinen allein führen jedoch zu sehr rauen und damit lauten Schienenoberflächen.

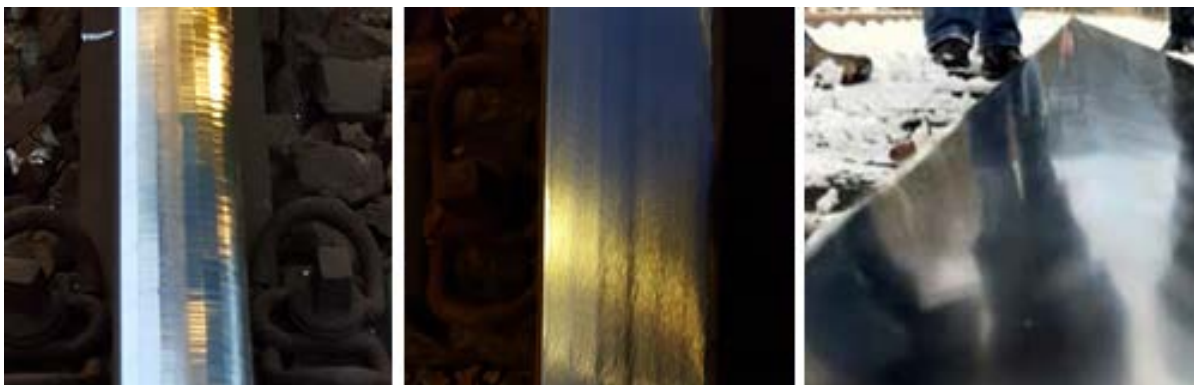


Abbildung 40: Raue Schienenoberflächen direkt nach Fräsen (links), glatte Schienenoberfläche nach Fräsen und Schleifen (mittig) und sehr glatte Schienenoberfläche nach Fräsen und Finishing-Technologie mit High Performance Milling Verfahren [38]

Verringerte Restwelligkeit durch größeren Fräsraddurchmesser

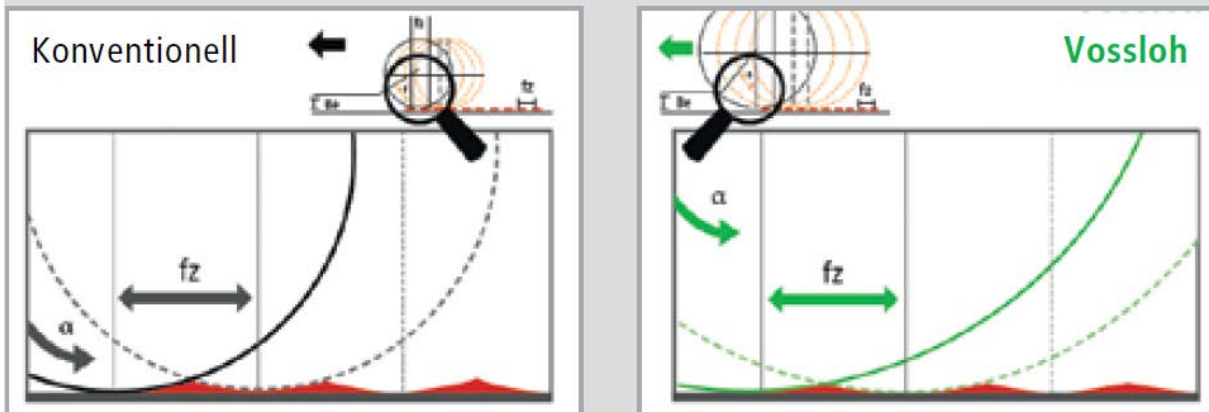


Abbildung 41: Restwelligkeiten nach frästechnischer Schienenbearbeitung (links: Konventionell mit kleinem Fräsraddurchmesser, rechts: Großer Fräsraddurchmesser des High Performance Milling-Verfahrens) [38]

5.2.5 Schienenhobeln

Neben der frästechnischen Schienenbearbeitung kann auch mit dem Schienenhobeln ein sehr großer Materialabtrag i.H.v. 2,5 mm mit einer Überfahrt auf der Schienen erzielt werden, um bereits in die Schiene gewachsene Fahrflächenfehler zu entfernen oder stark verschlissene Schienen zu reprofilieren oder zu entgraten, siehe **Abbildung 42**. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt unterhalb von 5 km/h, so dass das Verfahren ebenfalls nur während der Streckensperrung oder in der Betriebspause zum Einsatz kommen kann.



Abbildung 42: Schienenhobeln am Beispiel der Plasser & Theurer Maschine SBM 250 [50]

Abbildung 43 zeigt die Oberfläche der Schiene nach der Bearbeitung mit einer Hobelmaschine, die eine nahezu spiegelglatte Charakteristik vorweist. „Die zulässigen Grenzwerte der kurzwelligen Amplituden werden nicht ausgeschöpft. Es gibt weder quer noch längs zur Fahrtrichtung verlaufende Bearbeitungsmarken. Im Fahrflächenbereich ist das Querprofil jedoch als Polygon ausgebildet. Selbst Polygonspitzen von 0,06 mm führten dazu, dass Lärmpegelreduzierungen nicht im gewünschten Maß eintrafen. Das zeigten lang zurückliegende gemeinsame Untersuchungen mit der Deutschen Bahn.“ [37]



Abbildung 43: Schienenoberfläche nach Schienenbearbeitung mit Hobelmaschine [49]

6 Zusammenhang der Oberflächenbeschaffenheit von Rad und Schiene und Lärm von Schienenfahrzeugen

6.1 Rad- und Schienenrauheiten

Raue Oberflächen von Rad und Schiene mit Wellenlängen im Bereich von 1-10 mm (siehe **Abbildung 9, Seite 27**) beeinflussen die Anregfrequenzen der schallabstrahlenden Komponenten Rad, Schiene und Schwelle, siehe **Abbildung 44** und **Abbildung 45**.

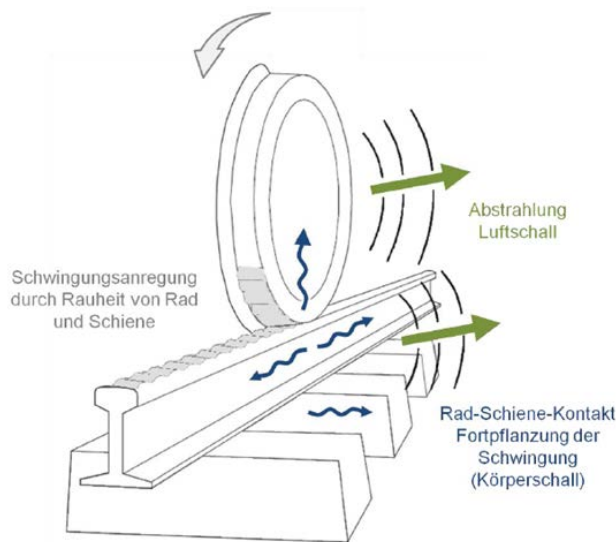


Abbildung 44: Darstellung der Geräuscentstehung bei rollendem auf der Schiene [51]

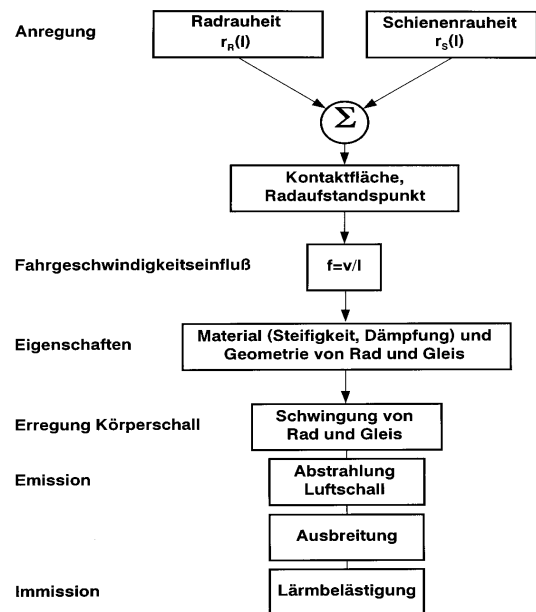


Abbildung 45: Zusammenhang der Rad-Schiene-Rauheiten und Lärm von Schienenfahrzeugen [55]

Die Oberflächenunebenheiten erzeugen eine Weganregung, die durch den Überrollvorgang im Rad-Schiene-Kontakt in eine Kraftanregung umgewandelt wird. Für die Rauheit ist immer die Gesamtrauheit (Summe der Rad-Schiene-Rauheiten) entscheidend für die Anregfrequenz gemäß des physikalischen Zusammenhangs „Anregfrequenz gleich Quotienten aus Geschwindigkeit und Wellenlänge“. Raue Oberflächen führen zu einer Erhöhung der im Rad-Schiene-Kontakt entstehenden dynamischen Kräfte und erhöhen somit Schwingungen an Rad, Schiene und Schwelle (Komponenten von Fahrzeug und Oberbau, die den meisten Körper- und Luftschall abstrahlen). Zwar haben Materialien oder beispielsweise die Schienenlagerung auch dämpfende Eigenschaften, jedoch reicht deren dämpfende Wirkung bei weitem nicht aus, um die erhöhten Schwingungen direkt wieder zu dämpfen. Somit strahlen die deutlich stärker schwingenden Komponenten mehr Luft- und Körperschall ab. Die Ausbreitung von Körper- und Luftschall führt zu einer Erhöhung des Lärms der Schienenfahr-

zeuge, durch die die Anwohner stark belästigt werden. Das Optimum stellt die direkte Reduktion der Schwingungsamplituden an der Quelle dar (vor allem glatte Oberflächen von Rad- und Schienenfahrflächen mit niedrigen Rauheiten können bis zu 25 dB(A) Reduktion gegenüber sehr rauen Oberflächen führen [52] [53]). Dagegen nützen Radschalldämpfer und Schienenstegdämpfer nur sehr wenig (2 bis 3 dB(A)) [18].

Maßnahmen zur Senkung der Radrauheiten

Derzeit findet bereits eine Veränderung im Bereich der Güterwagenbremsen statt, um die Rauheiten am Rad zu senken, die neben dem Einfluss auf den Lärm auch Einflüsse auf die Zuglängsdynamik haben [54]. Einerseits werden Grauguss-Sohlen (GG-Sohlen) der Güterwagen gegen neue Sohlen, sog. LL-Sohlen (low noise, low friction), ausgetauscht. Andererseits sind für neue Güterwagen bereits Verbundstoffsohlen (K-Sohlen) vorgeschrieben. Beide Sohlen rauen im Vergleich zu den GG-Sohlen die Radoberfläche während der Zugbremsung sehr viel weniger stark auf, siehe **Abbildung 46**. Das optimale Bremssystem im Hinblick auf die Vermeidung von erhöhten Lärm der Schienenfahrzeuge stellt die Scheibenbremse dar, dass jedoch zurzeit nur bei hohen Laufleistungen des Güterwagens eine gute Wirtschaftlichkeit erreicht (z.B. bei Containertragwagen). Viele Güterwagen erreichen diese hohe Laufleistung nicht, so dass das Scheibenbremssystem nicht immer die Lösung darstellt. Nahverkehrsfahrzeuge, Lokomotiven oder Züge im Fernverkehr sind meistens scheibengebremst. Insgesamt liegt das Lärmreduktionspotential, das von dem Bremssystem des Güterwagens gegenüber Grauguss gebremsten Wagen ausgeht, bei ca. 7 bis 12 dB [18].

Die Umrüstung der Bremssysteme für Güterwagen ist in Deutschland voll im Gange, denn wie bereits erwähnt wurde 2016 die Zahl der Verbundsohlen gebremsten Wagen von 20 auf 51% der in Deutschland verkehrenden Wagen vergrößert [4]. Dadurch müsste bereits eine sehr kleine Lärminderung erreicht werden. Zusätzlich wird die Umrüstung in Europa mit Druck aus der Schweiz vorangebracht. Auf den Schweizer Trassen sind ab 2020 neue Lärmgrenzwerte gemäß TSI Noise 2011 zwingend vorgeschrieben. Güterwagen mit GG-Sohlen können das nicht einhalten. Eisenbahnverkehrsunternehmen, die zukünftig mit Güterzügen durch die Schweiz fahren wollen, müssen somit zwangsläufig Güterwagen mit Bremssystemen einsetzen, die für niedrige Radrauheiten sorgen. In Deutschland wird das für 2020 auch angestrebt, jedoch ist das noch nicht politisch vereinbart. Insbesondere Polen wehrt sich gegen eine solche Beschränkung in Deutschland und sieht eine Diskriminierung für polnische Güterwagen.



Abbildung 46: Änderung der Oberflächenbeschaffenheit (links: Grauguss, mittig: LL-Sohle, rechts: Scheibenbremse).

Schienenrauheiten

Durch die bereits laufenden Maßnahmen am Rad rückt die Oberflächenbeschaffenheit der Schienen in den Fokus. Wie entscheidend die Kombination aus Rad und Schienenrauheiten ist, zeigen **Abbildung 47** und **Abbildung 48**. Zwar kann mit einem Wechsel des Bremssystems bereits eine Lärmreduktion erzielt werden, jedoch muss für eine deutliche (wirksame) Reduktion des Lärms auch die Schienenrauheit gesenkt werden. Beispielsweise führen Rauheiten mit einer Wellenlänge von 5 mm bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 100 km/h zu Anregefrequenzen von über 5 kHz. In diesem Frequenzbereich hat das Ohr zwar nicht seine höchste Sensibilität, jedoch werden auch Schallwellen mit diesen hohen Frequenzen vom Menschen wahrgenommen und als störend empfunden (Hörbereich des menschlichen Ohrs liegt zwischen 16 und 20.000 Hz).

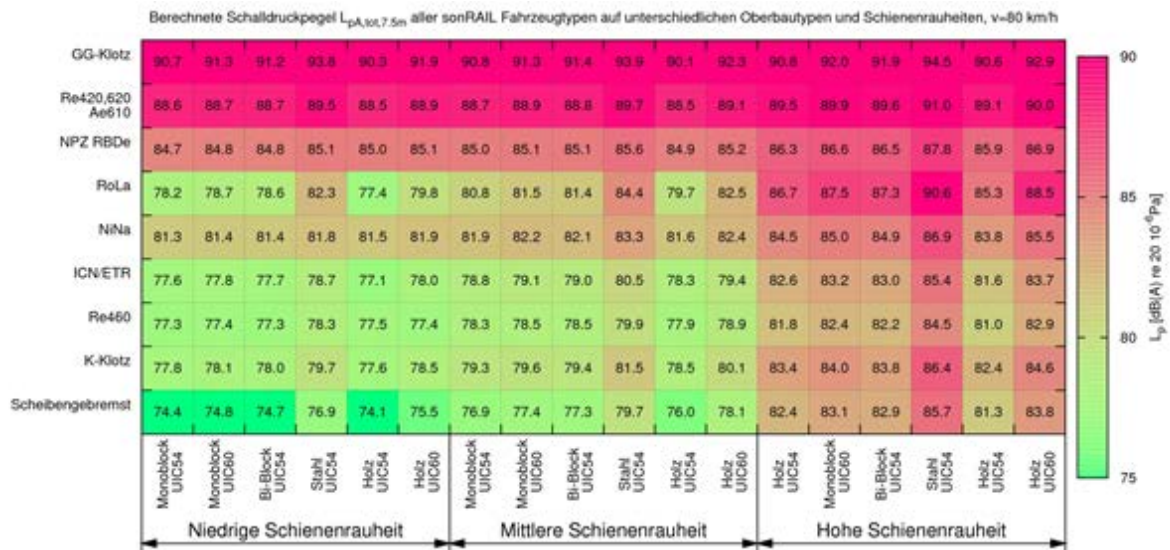


Abbildung 47: Zusammenhang der Schienen und Radrauheit auf den Lärm von Schienenfahrzeugen [56] [57] [58]

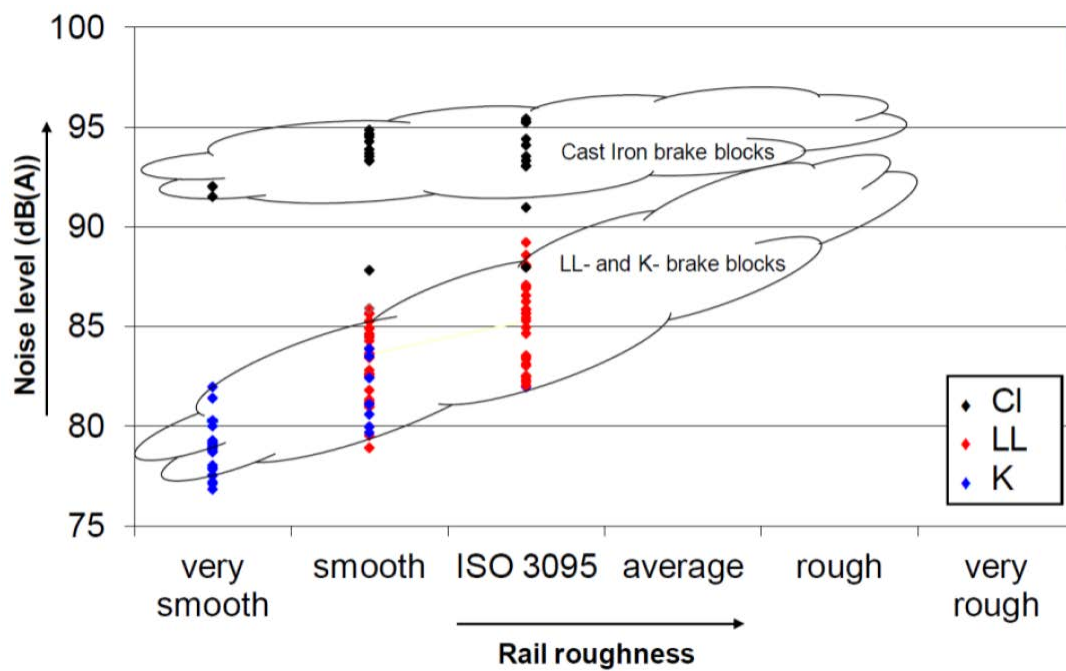


Abbildung 48: Einfluss Schienen- Radrauheit auf den Lärm von Schienenfahrzeugen [59]

6.2 Schienenfehler

Schienenfehler können das Rollgeräusch des Schienenfahrzeugs stark beeinflussen. Sie werden anhand ihrer Wellenlänge eingeteilt. Beispielsweise verursachen Riffel (exemplarische Welllänge 10 cm), gemäß des bereits erläuterten physikalischen Zusammenhangs, bei einer Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h auf einer verriffelten Schiene eine Anregfrequenz von 333 Hz. Mit dieser Anregfrequenz werden die Fahrzeug- und Oberbaukomponenten zum Schwingen angeregt. In der Realität entstehen auf einem Streckenabschnitt meistens Riffel (oder allgemein Schienenfehler) mit verschiedenen Wellenlängen. Dies führt zu breitbandigen Anregfrequenzen, wodurch die Schwelle, das Rad und die Schiene unterschiedlich stark zum Schwingen angeregt werden, siehe **Abbildung 49**. In dieser Darstellung dominiert bis 300 Hz die Schwelle, bis ca. 600-700 Hz die Schiene und im hochfrequenten Bereich (ab 2500 Hz) das Rad das Rollgeräusch.

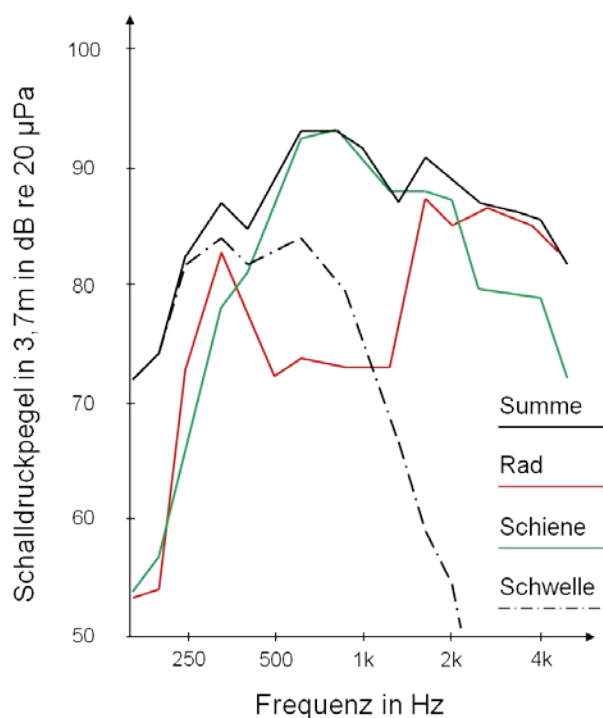


Abbildung 49: Zusammensetzung des (berechneten) Gesamtschalldruckpegels bezogen auf die Frequenz für einen Güterwagen bei 100 km/h auf einem Gleisabschnitt mit weichen Zwischenlagen (eigene Darstellung in Anlehnung an [51])

Jede schwingungsfähige Komponente hat Eigenfrequenzen. Falls die Anregfrequenz die Eigenfrequenz einer Komponente trifft, entsteht ein Resonanzfall. Der Körperschall kann dann maximal ins Fahrzeug und in den Untergrund abstrahlen, wodurch nahestehende Gebäudestrukturen zum Schwingen angeregt werden, siehe **Abbildung 50**. Die schwingenden Wände strahlen daraufhin wiederum Schall (Sekundärluftschall) ab, der vom Menschen als störend wahrgenommen werden kann. Der Luftschall hingegen trifft direkt auf das Gebäude und dringt z.B. über Fenster oder dünne Wände in das Innere eines Gebäudes ein (Primär-

luftschall). Erhöhter Primär- und Sekundärschall sind ursächliche für eine erhöhte Lärmimmissionen bei den Anwohnern.

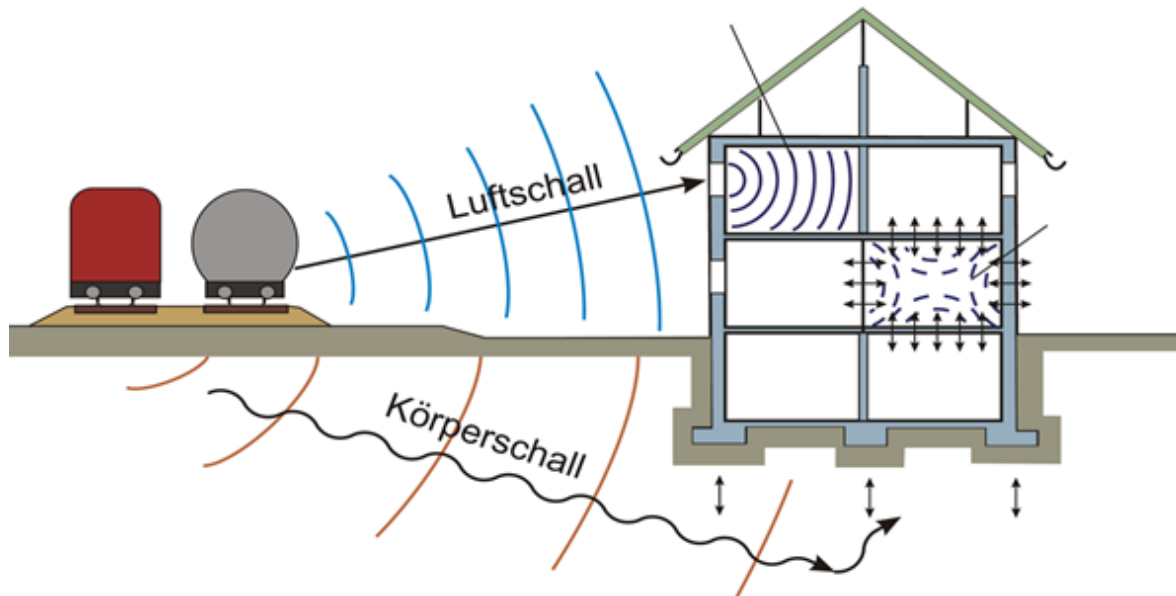


Abbildung 50: Körper- und Luftschallabstrahlung eines vorbeifahrenden Schienenfahrzeugs

Da die Entstehung von Fahrflächenfehlern aufgrund der heutigen Randbedingungen des Eisenbahnbetriebs (noch) nicht grundsätzlich vermieden werden kann, sollten fehlerbehaftete Schienen regelmäßig bearbeitet werden, um die je nach Fehler die charakteristische Wellenlänge auf der Schienenoberfläche zu entfernen. Fehlerbehaftete Schienen führen sonst zu erhöhtem Lärm von Schienenfahrzeugen.

6.3 Schienenbearbeitung

6.3.1 Strategie der Schienenbearbeitung

Abbildung 51 zeigt einen möglichen Einfluss der Schienenbearbeitungsstrategien auf den Lärm von Schienenfahrzeugen. Mit der präventiven Strategie (linkes Bild) wird regelmäßig in kurzen zeitlichen Intervallen (z.B. 3x pro Jahr) eine dünne Materialschicht von der Schiene abgetragen. Dies verhindert die Entwicklung von Fahrflächenfehlern und Welligkeiten mit großen Amplituden, die den Lärm der Schienenfahrzeuge erhöhen können. Das durchschnittliche Lärmniveau bleibt insgesamt niedrig. Ohne Abtrag kann diese materialgeschwächte Oberflächenschicht die Ausgangslage für Rissentstehung und Entwicklung von Fahrflächenfehler unterschiedlichster Art sein. Durch das höhere Bearbeitungsintervall (z.B. alle 2 Jahre) vergrößern sich Amplituden der Wellenlängen und erhöhen den Lärm der Schienenfahrzeuge. Nach der Schienenbearbeitung wird, je nach Verfahren, der Lärm durch

eine glattere Oberflächenbeschaffenheit wieder gesenkt. Das durchschnittliche Lärmniveau kann höher als bei Verfolgung des präventiven Ansatzes sein.

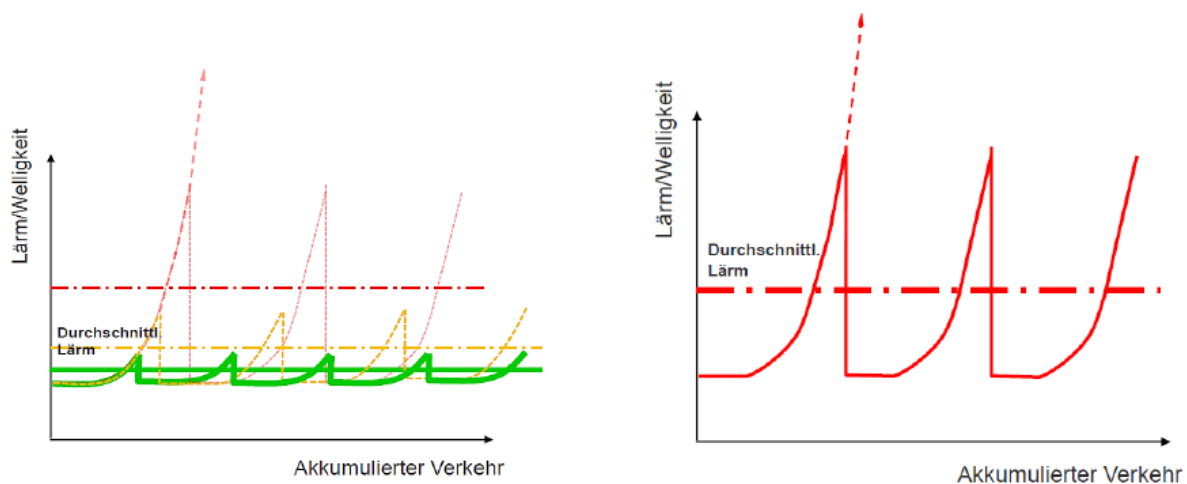


Abbildung 51: Einfluss der Schienenbearbeitungsstrategien (links: präventiv, rechts: korrektiv) auf den Lärm von Schienenfahrzeugen [30]

Es empfiehlt sich demnach die Schiene regelmäßig (präventiv) zu bearbeiten, um einerseits den Ursprung der Rissentstehung (ermüdete Randschicht) zu entfernen und um damit der Entwicklung von Fahrflächenfehlern entgegenzuwirken. Schienen, die schon etwas länger nicht bearbeitet worden sind, können nicht sofort präventiv bearbeitet werden. Beispielsweise führen Welligkeiten mit großen Amplituden dazu, dass mit dem präventiven Ansatz zu wenig Material abgetragen wird und ein zu geringer Unterschliff entsteht, siehe **Abbildung 52**. Dies hat zur Folge, dass die bearbeitete Oberfläche nicht die erwartete einheitliche Materialeigenschaft besitzt und partiell harte Nester auf der Schienenoberfläche übrig bleiben. Harte Nester bewirken eine Umkehr und schnelle Wiederkehr der Welligkeit. Damit kann sich der Lärm der Schienenfahrzeuge trotz erfolgter Schienenbearbeitung zeitnah wieder erhöhen.

Bei einem angestrebten Strategiewechsel empfiehlt es sich zunächst mit dem korrektiven Ansatz ausreichend Schienenmaterial zu entfernen, damit das Querprofil der Schiene vollständig reprofiliert ist und auch etwaige Fahrflächenfehler vollständig entfernt sind. Dies ist mit hohem zeitlichem (geringe Arbeitsgeschwindigkeit der Maschinen) und finanziellem Aufwand verbunden. Dieser Schritt ist aber nicht vermeidbar, denn nur dann ist eine einheitliche Qualität der Schienenoberfläche sichergestellt. Diese kann dann mit dem präventiven Ansatz regelmäßig bearbeitet werden, um eine hohe Schienenqualität ohne ermüdete Randschicht sicherzustellen.

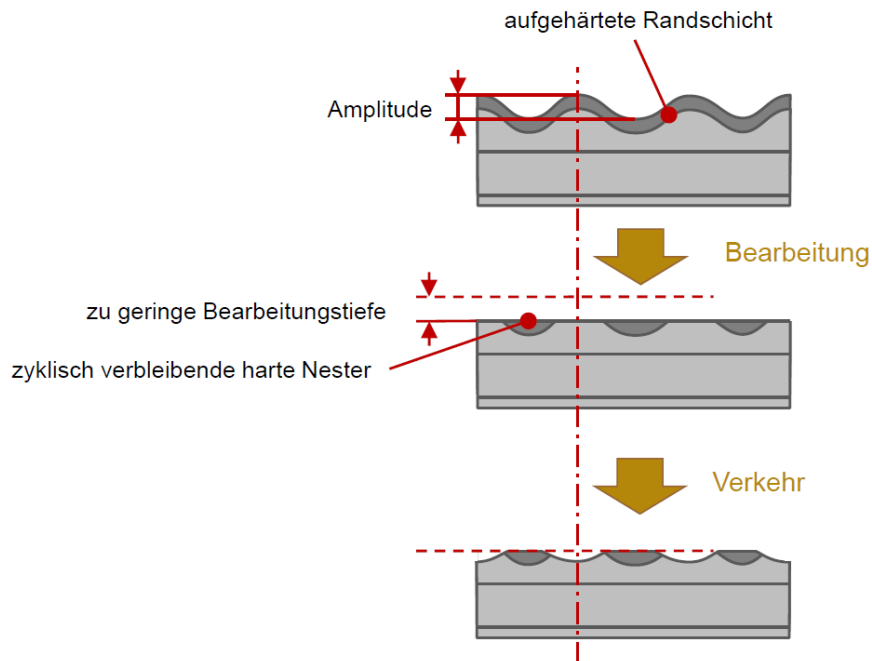
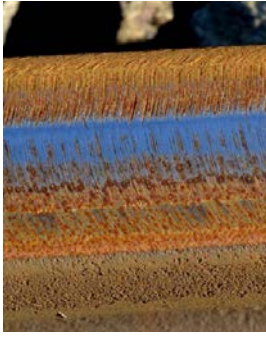


Abbildung 52: Zusammenhang Materialabtrag und Welligkeit der Schienenoberfläche [2]

6.3.2 Verfahren der Schienenbearbeitung

Neben den Eigenschaften der gewählten Strategie zur Schienenbearbeitung hinterlässt auch jedes Schienenbearbeitungsverfahren ein charakteristisches Bearbeitungsbild auf der Schiene zurück, das den Lärm von Schienenfahrzeugen beeinflussen kann. Schienen werden beispielsweise mit unterschiedlichen verfahrensspezifischen Parametern des rotatorischen Schleifverfahrens (Anpressdruck, Schleifgeschwindigkeit) bearbeitet. Dies führt zu einer Vielzahl von verschiedenen Oberflächen, die nach der Schienenbearbeitung auf der Schiene zu sehen sind, siehe **Tabelle 5**. Die Analyse der Bilder zeigt, dass die verfahrensspezifischen Parameter beim Einsatz des rotatorischen Schleifverfahrens zu sehr unterschiedlichen Schliffbildern führen können, während der Einsatz der anderen Verfahren zu eher ähnlichen Bearbeitungsbildern führt.

Tabelle 5: Charakteristische Oberflächenbeschaffenheiten nach schleif- und/oder frästechnischer Schienenbearbeitung [2] [27] [30] [38] [65]

Schliffbilder nach Einsatz des rotatorischen Schleifverfahrens			
			
			
			
Schliffbilder nach High Speed Grinding			
			

Schliffbild nach oszillierendem Schleifen			
			
Konventionelle gefräste und geschliffene Schiene (links) und Vossloh High Performance Miling (rechts)		Gefräste Schiene (Schienenoberfläche wird im Nachgang immer geschliffen, d.h. diese Oberfläche stellt nur die Charakteristik eines Zwischenzustands dar)	
			

Verschiedenes ist über den Zusammenhang der Schienenbearbeitungsverfahren und Lärm von Schienenfahrzeugen bereits publiziert worden. Derzeitige Erkenntnisse werden nachfolgend verfahrensspezifisch erläutert.

6.3.2.1 Rotatorisches Schleifen

Abbildung 53 zeigt den Einfluss des normalen rotatorischen Schleifens auf den Lärm von Schienenfahrzeugen (Zusammenhang gilt nicht für aggressives Schleifen, siehe **Tabelle 4, Seite 46**). Die Schienenoberfläche führt direkt nach Bearbeitung zu einem Anstieg des Lärms um 5 dB(A). Nach ca. 10-20 Tagen (ca. 0,6 Mio. Lasttonnen) wird das Ausgangsniveau wieder erreicht und nach ca. 1,4 Mio. Lasttonnen ist der Lärm um 1 dB(A) zum Ausgangsniveau abgesunken. Nach ca. 5 Mio. Lasttonnen steigt der Lärm wieder an.

Entwicklung Summenschallpegel nach Schienenschleifen im Vergleich zur ungeschliffenen Schiene

In dB(A) über Mio. Lt

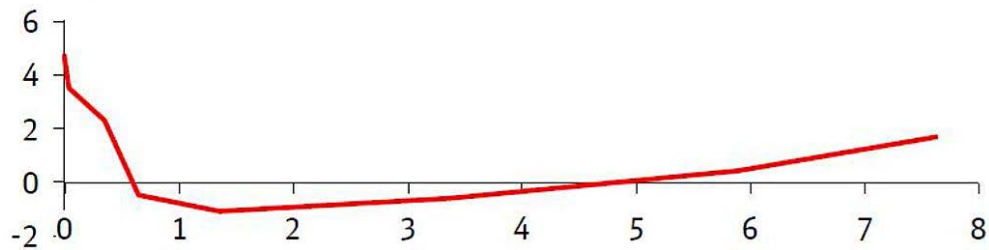


Abbildung 53: Einfluss des normalen (nicht aggressiven) rotatorischen Schleifens auf den Lärm von Schienenfahrzeugen ([2], Vortrag Frau. Dr. Lange auf dem Iaf Kongress 2015 BahnBau)

Das Schliffbild nach der rotatorischen Schienenbearbeitung kann, wie bereits erwähnt und dargestellt, sehr unterschiedlich aussehen (siehe **Tabelle 5**) und unterliegt damit stark verfahrensspezifischen Parametern wie z.B. Anpressdruck und Schleifgeschwindigkeit. Je nach Charakteristik des Bearbeitungsbildes ist der Zusammenhang, der in **Abbildung 53** dargestellt wird, nicht allgemein gültig. Beispielsweise gibt es zwischen der Schleifgeschwindigkeit und der induzierten Wellenlänge nach der Bearbeitung (bei einzeln angetriebenen Topfscheiben) einen Zusammenhang, siehe **Tabelle 6**. Je höher die Schleifgeschwindigkeit, desto größer werden die Wellenlängen von Unebenheiten nach dem Schleifen. Der dargestellte Wellenlängenbereich entspricht der Klassifizierung von Riffeln, siehe **Abbildung 9**. Diese eingeschliffene Riffel zeigen sich auch Terzband-Wellenlängenspektrum der Schienenrauheit nach Einsatz des rotierenden Schleifens, siehe **Abbildung 54**. Im Vergleich zeigt sich nach der Schienenbearbeitung mit dem Hochgeschwindigkeitsschleifen keine charakteristische Wellenlänge, siehe **Abbildung 55**.

Tabelle 6: Typische Wellenlängen von Unebenheiten nach dem Schleifen in Abhängigkeit von der Schleifgeschwindigkeit [47]

Schleif-Geschwindigkeit in km/h	3	5	6	8	10	15
Typische Wellenlänge nach dem Schleifen in mm	13.8	23.1	27.6	37.0	46.3	69.3

Die Autoren der Studie haben erfahren, dass Aufträge zur Schienenbearbeitung zunehmend mit höheren Anforderungen ausgeschrieben werden. Immer mehr Material soll in geringerer Zeit bei noch niedrigeren Kosten abgetragen werden. Das bedeutet, dass während einer Streckensperrung oder in der Betriebspause eine immer längere Strecke bearbeitet werden soll. Schienenbearbeitung kostet Geld und wird als notwendiges Übel wahrgenommen, denn für die Auftraggeber amortisiert sich ein höherer finanzieller Aufwand der Schienenbearbei-

tung kaum. Positive Nebeneffekte wie ein verbesserter Fahrkomfort oder geringerer Lärm der Schienenfahrzeuge bringen nicht immer wirtschaftliche Vorteile. Auftraggeber schrauben deshalb zunehmend die Anforderungen für die Schienenbearbeitung hoch, worunter die Qualität der Schienenbearbeitung aus technischen Gründen zwangsläufig leiden muss. „Schleifgeschwindigkeit kleiner als 5 km/h oder höher als 8 km/h resultieren in einem etwas geringeren Schallpegel unmittelbar nach dem Schleifen. Aus Gründen der Produktivität wird die erste Option nicht verwendet. Der oft gehörte Vorschlag, Schleifscheiben mit einer speziell feinen Oberfläche zu verwenden, hat negative Auswirkungen im Hinblick auf die spezifische Leistung und die Logistik und die damit verbundenen deutlich höheren Kosten dürften die erzielbaren geringen Schallpegel während der ersten kurzen Zeitperiode nicht kompensieren.“ [47] Nachfolgend wird anhand von Beispielen erläutert, dass die kurze Zeitperiode des erhöhten Lärms (also direkt nach der Schienenbearbeitung) nicht immer eine Gültigkeit besitzt.

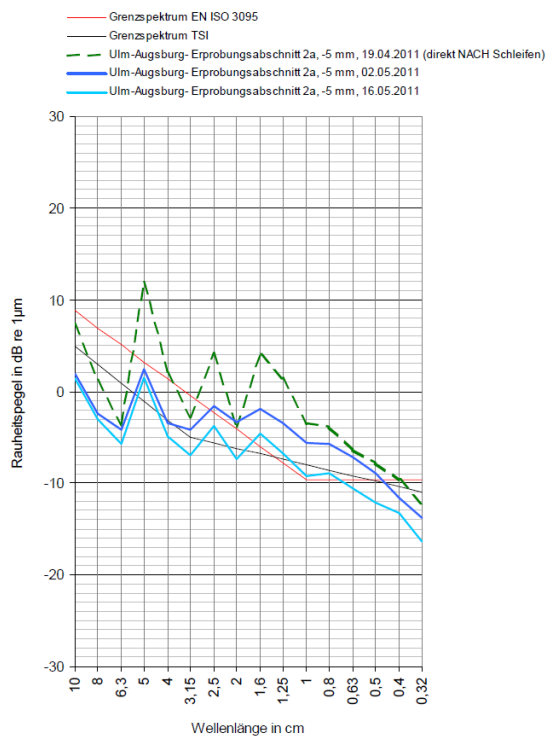


Abbildung 54: Terzband-

Wellenlängenspektrum der Schienenrauheit nach Einsatz des rotierenden Schleifens (Grenzkurve EN ISO 3095:2005 (alt) und TSI, letzteres entspricht DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2) [2]

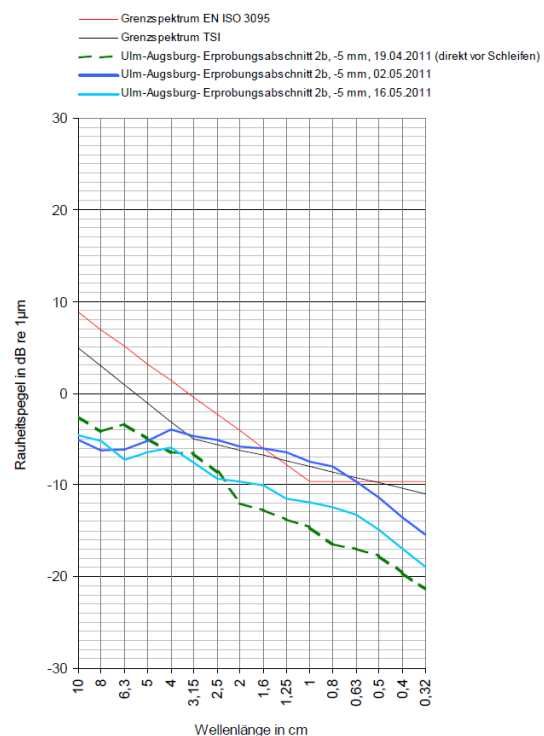


Abbildung 55: Terzband-

Wellenlängenspektrum der Schienenrauheit nach Einsatz des Hochgeschwindigkeitsschleifens (Grenzkurve EN ISO 3095:2005 (alt) und TSI, letzteres entspricht DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2) [2]

Im schlimmsten Fall zwingt die Zielvorgabe der Auftraggeber die beauftragten Firmen dazu, dass die verfahrensspezifischen Parameter bei Einsatz des rotatorischen Verfahrens angepasst werden (z.B. Erhöhung des Anpressdruckes, Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit, ggf. Schleifkörper mit gröberer Körnung). Neben den eingeschliffenen Riffeln mit größerer Wellenlänge und hohen Amplituden kann sich auch ein Blauschliff auf der Schiene zeigen. Blauschliff entsteht, wenn durch den hohen Anpressdruck und die Bearbeitungsgeschwindigkeit zwischen Schleifkörper und Schiene Temperaturen von bis zu 700 Grad entwickeln, siehe **Abbildung 56**. Darüber hinaus kann deshalb auch die Bearbeitungsqualität des Querprofils insgesamt leiden und es entsteht eher ein grob geschliffenes Querprofil mit Ecken und Kanten, siehe **Abbildung 57**.

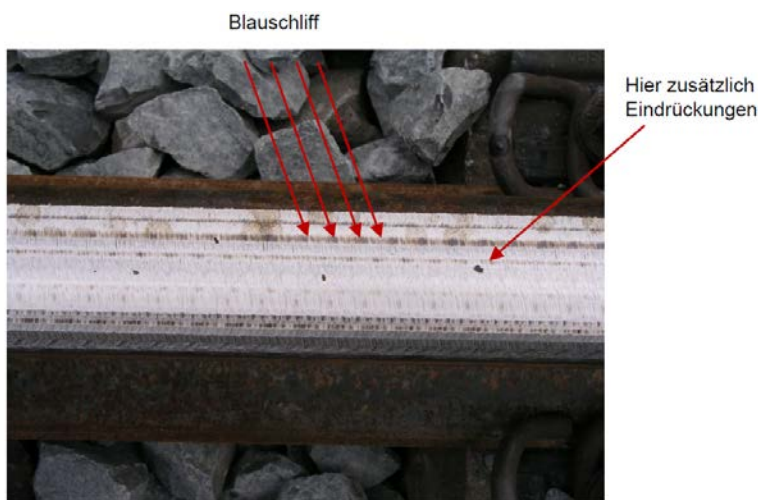


Abbildung 56: Schliffbild nach aggressiven rotatorischen Schleifen mit Blauschliff [2]



Abbildung 57: Schliffbild nach aggressiven rotatorischen Schleifen mit Ecken und Kanten [2]

Direkt nach der Schienenbearbeitung kann der Lärm eines Schienenfahrzeugs deshalb erhöht werden. Der Walzvorgang des Stahlrads auf der Stahlschiene hat zwar eine plattwalzende Wirkung, d.h. eingeschliffene Oberflächenunebenheiten können sich mit der Zeit wieder reduzieren. Der Betrieb auf der Eisenbahnstrecke ist jedoch die entscheidende Einflussgröße hierauf, ob überhaupt und wenn ja, wie schnell die Schleifspuren auf der Schiene plattgewalzt werden. Schwere Güterzüge mit hohen Achslasten können Schleifriefen unmittelbar nach der Schienenbearbeitung wieder plattwalzen, während auf Strecken mit Mischbetrieben oder bei Betrieben mit leichten Fahrzeugen (U-Bahn, Straßenbahnen, Nahverkehr allgemein) die Schleifriefen längerfristig auf der Schienenoberfläche sichtbar bleiben können. Diese Eigenschaft führt zu einer langanhaltenden Erhöhung des Lärms der Schienenfahrzeuge und damit einhergehend zu einer langanhaltenden Lärmstörung der Anwohner. Darüber hinaus spielt auch die Zugfrequenz auf der Strecke eine Rolle. Fährt beispielsweise auf einer Strecke nur einmal pro Stunde ein Zug mit niedrigen Achslasten, dann wird eine tiefe Schleifriefe vermutlich äußerst lange auf der Schienenoberfläche zu sehen sein und damit den Lärm länger erhöhen. Dies wird anhand des Beispiels in **Abbildung 58** dargestellt. Die Bilder zeigen die Entwicklung der Schleifriefen auf einer Nahverkehrsstrecke, auf den Fahrzeugen mit niedrigen Achslasten verkehren. Selbst nach 19 Monaten und einer Vielzahl von Überrollvorgängen konnte der Walzvorgang die Schleifriefen noch nicht vollständig plattwalzen. Dies hat zu einer dauerhaften Erhöhung des Lärms der Schienenfahrzeuge und einer Vielzahl von Anwohnerbeschwerden geführt.



Abbildung 58: Schienenoberfläche direkt nach Schienenbearbeitung mit rotatorischem Verfahren (links), mit zeitlichem Abstand zur Schienenbearbeitung (mittig) und nach 19 Monaten Betrieb der Strecke (rechts) (Charakteristik: Nahverkehr mit Fahrzeugen mit niedrigen Achslasten) [2]

Es zeigt sich, dass das Bearbeitungsbild des rotatorischen Schleifens sehr stark von den verfahrensspezifischen Parametern abhängt und die Wirkung des Rades auf der Schiene nicht immer zeitnah die Querriefen plattdrückt. Dies kann den Lärm von Schienenfahrzeugen erhöhen und Anwohner längerfristig stören. Wir möchten an dieser Stelle jedoch ausdrücklich betonen, dass wir mit dem dargestellten Inhalt nicht grundsätzlich das Verfahren des rotatorischen Schleifens in Frage stellen wollen. Vielmehr wollen wir darstellen, dass die hohen Anforderungen „viel Material in kurzer Zeit abzutragen“ die Firmen dazu zwingen, die verfahrenstechnischen Parameter bei Einsatz dieses Verfahrens anzuziehen, worunter die Qualität des Schliffbildes leidet und der Lärm erhöht wird. Allerdings kann mit dem rotatorischen Schleifen eine Schliffbildqualität ohne relevante Schleifriffel erzielt werden, die den akustischen Kriterien genügt. Deshalb sehen wir hier die Auftraggeber und nicht die ausführenden Firmen in der Verantwortung, dass in lärmsensiblen Bereichen (z.B. innerstädtischer Bereich, bewohnte Streckenabschnitte) ein höherer Aufwand in der Schienenbearbeitung beauftragt wird. Hier darf nicht nur das Ziel „mehr Materialabtrag in kürzerer Zeit“ gelten. Der Einsatz des rotatorischen Schleifens wäre in diesen Bereichen dahingehend zu verändern, dass in einem ersten Bearbeitungsschritt primär das Ziel auf den Materialabtrag gelegt wird. Im Nachgang erfolgt eine weitere Bearbeitung in der Form eines Feinschliffs zur Glättung der Oberfläche (feinere Körnung der Schleifkörper, geringeren Bearbeitungsgeschwindigkeit). Es ist selbsterklärend, dass dieser höhere Aufwand nicht zum gleichen Preis zu haben sein wird. Deshalb sind (politische) Anreize notwendig, dass Auftraggeber der Schienenbearbeitungsleistung auch am positiven Nutzen der höheren Bearbeitungsqualität (z.B. im Hinblick auf den Anwohnerlärmschutz) finanziell partizipieren müssen. Der hohe Aufwand in der Schienenbearbeitung muss nicht überall erbracht werden, sondern nur in Streckenabschnitten, in denen Anwohner vor Eisenbahnlärm geschützt werden müssen. Querriefen mit hohen Amplituden müssen an diesen Streckenabschnitten vermieden werden. Die Auswahl und Definition solcher Streckenabschnitte ist hierbei entscheidend.

6.3.2.2 Frästechnische Schienenbearbeitung/ rotierendes Schleifen mit oszillierendem Schleifen

Neben dem Einsatz von Schleifmaschinen mit rotatorischer Schienenbearbeitung können Schienen auch dem oszillierenden Verfahren geschliffen werden. Das Bearbeitungsbild einer zunächst gefrästen und im Nachgang oszillierend geschliffenen Schiene sowie die gemessene Oberflächenwelligkeit nach der Bearbeitung zeigt **Abbildung 59**. Die frästechnische Schienenbearbeitung sorgt für den nötigen Materialabtrag an der Schiene, um neben der Reprofilierung auch den ausreichenden Materialabtrag zur Entfernung von tiefen Rissen sicherzustellen. Nach dem Fräsen werden die Schienen mit dem oszillierenden Verfahren nachgeschliffen, um die schuppenartigen Polygone zu entfernen oder insgesamt die Oberfläche fein nachzuschleifen. Das oszillierende Verfahren führt verfahrensbedingt zu Schleif-

riefen auf dem Schienenkopf in Längsrichtung mit sehr niedrigen Welligkeiten (geringe Amplitudenhöhe), siehe **Abbildung 59** und **Abbildung 60**. Der Lärm von Schienenfahrzeugen wird bei Verwendung dieses Verfahren nicht erhöht, so dass auch die Streckenabschnitte des Besonders überwachten Gleises (BüG) [44] mit diesem Verfahren geschliffen werden. Eine vorlaufende frästechnische Bearbeitung ist nicht immer zwangsläufig notwendig, denn das oszillierende Verfahren kann auch nach dem Einsatz des rotierenden Verfahrens (Ziel: Materialabtrag) die Schienenoberfläche anschließend glattschleifen. Die lärmreduzierende Wirkung ist basierend auf Untersuchungen des Umweltbundesamtes und der Fa. Schweerbau gleichwertig [36]. Neben einem feinen Nachschliff mit dem rotatorischen Verfahren stellt das oszillierende Verfahren somit ein sehr wirksames Verfahren dar, um die Rauheiten nach der Schienenbearbeitung direkt zu senken oder etwaige Schleifriefen zu entfernen. Dieser positive Effekt geht aber mit einem höheren Bearbeitungsaufwand einher, da die Bearbeitungsgeschwindigkeit begrenzt ist. Die Kombination einer Schienenfräse oder einer rotierend schleifenden Maschine mit einer oszillierend nachschleifenden Maschine wird erhöhte Kosten der Schienenbearbeitung durch mehr Maschinen- und Personaleinsatz erhöhen.

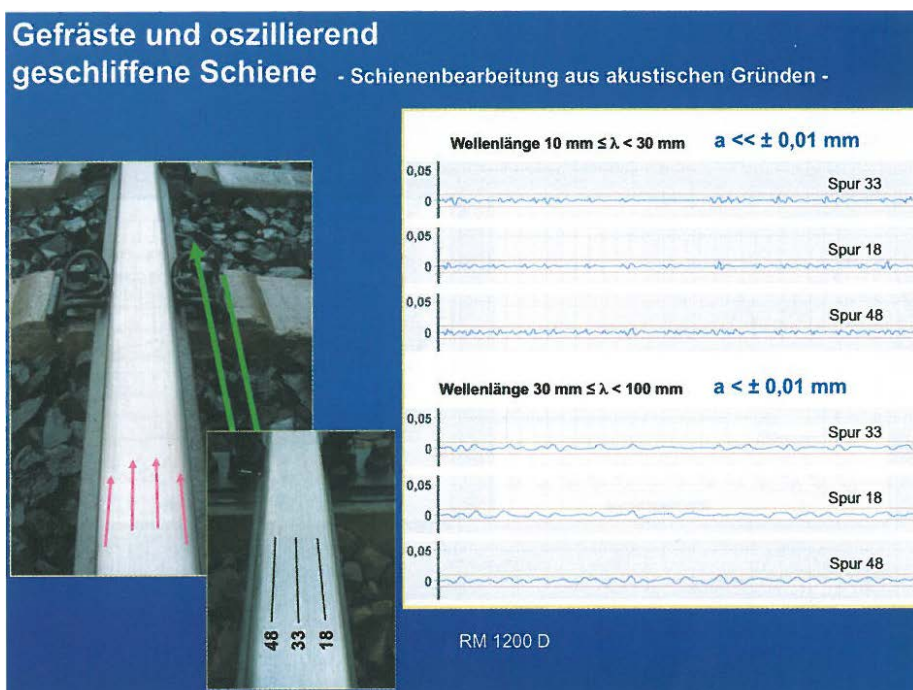


Abb. 5: Bearbeitungsbild einer gefrästen und oszillierend geschliffenen Schiene

Abbildung 59: Bearbeitungsbild einer gefrästen und oszillierend geschliffenen Schiene [37]

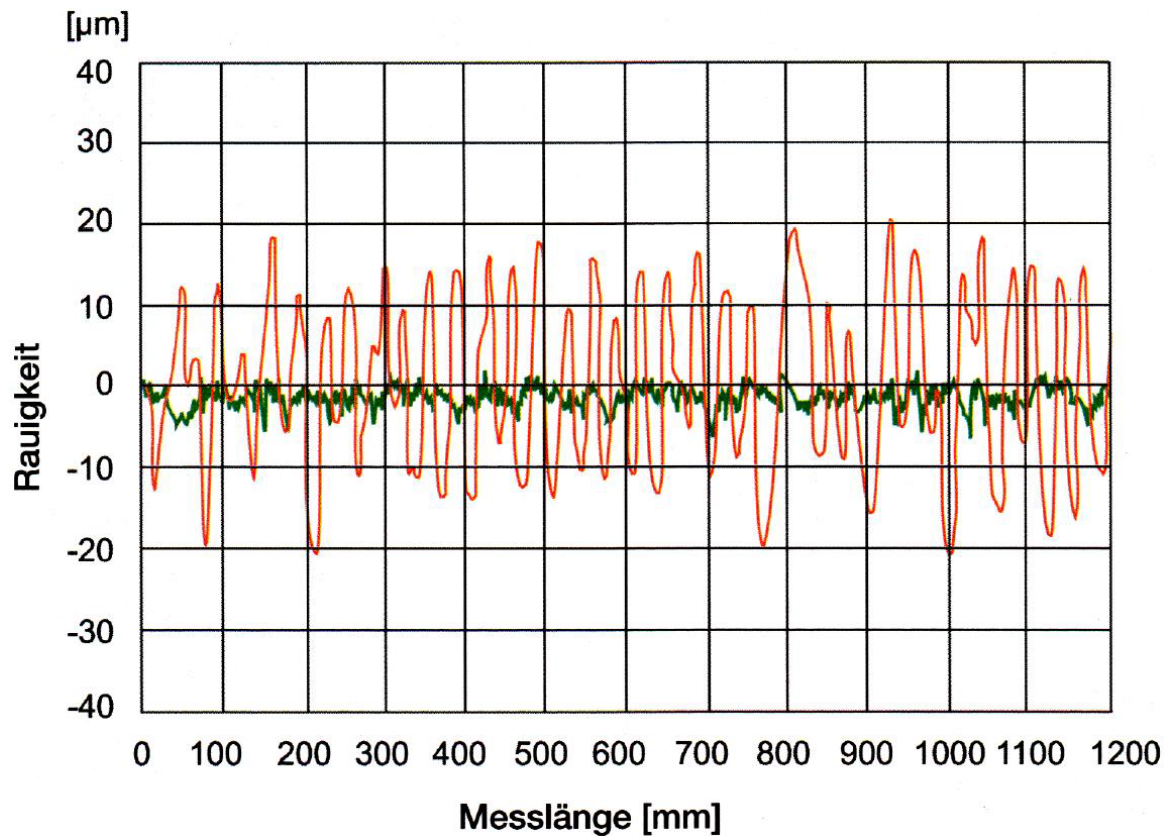


Abbildung 60: Vergleich Rauigkeitsprofil vor und nach Anwendung des oszillierenden Schleifens [27]

6.3.2.3 Frästechnische Schienenbearbeitung mit Nachschliff

Die Notwendigkeit, dass nach einer frästechnischen Schienenbearbeitung nachgeschliffen werden muss, zeigen Messungen der TU Berlin, siehe **Abbildung 61**. Dargestellt ist die gemittelte Rauheit der linken und rechten Schiene. Da die Rauheiten sich proportional zum Schalldruckpegel verhalten, werden auch die Rauheiten in dB angegeben. Vor der Schienenbearbeitung liegen die Terzrauhigkeitspegel der gemessenen Wellenlängen ca. 5 dB mit leichten Periodizitäten über der TSI Grenzkurve. Direkt nach frästechnischen Bearbeitung der Schiene zeigt sich, dass das Fräsrاد eine schuppenartige (polygonartige) Oberflächenstruktur auf der Schienenoberfläche mit charakteristischen Wellenlängen, bis zu 15 dB mit starken Periodizitäten hinterlässt. Deshalb ist es notwendig und heutzutage Standard, dass die Schiene nachgeschliffen wird, damit die Rauheiten geglättet werden. Zwar liegen nach dem Schleifen weiterhin die Rauheiten bei niedrigen Wellenlängen über der TSI Grenzkurve, jedoch wurde ein Großteil der markanten Rauheitsamplituden geglättet. Nach der Bearbeitung verbleibt auf der Schienenoberfläche eine markante Wellenlänge (Wellenlänge 0.025 m) mit 10 dB über der TSI Grenzkurve zurück. Nach 4-monatigem Betrieb mit gleichen Fahrzeugen und niedrigen Achslasten sind die Rauheiten mit niedrigen Wellenlängen plattge-

walzt worden sind. Zudem ist die Amplitude der markanten Wellenlänge ebenfalls etwas verringert worden und nur noch 4 dB über der Grenzkurve.

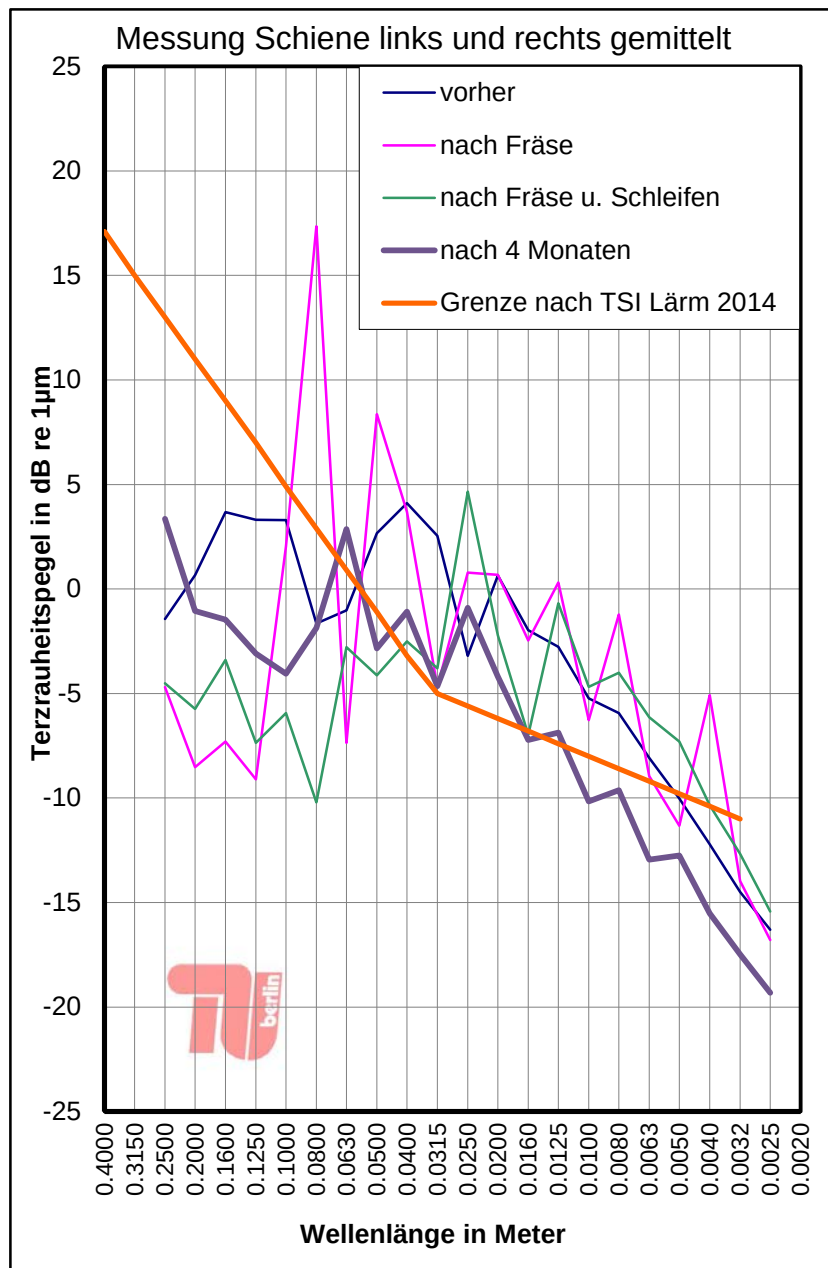


Abbildung 61: Schienenrauheitsentwicklung während fräs- und schleiftechnischer Schienenbearbeitung Grenze nach TSI Lärm 2014 entspricht DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2

6.3.2.4 Hochgeschwindigkeitsschleifen

Zwar können mit dem oszillierenden Schleifverfahren und dem rotierenden Verfahren (bei entsprechen verfahrensspezifischen Parameter) Schienenoberflächen erzeugt werden, die den Lärmanforderungen nach der Schienenbearbeitung genügen, jedoch haben die Verfahren die geringe Bearbeitungsgeschwindigkeit gemeinsam. Eine Alternative stellt das Hochgeschwindigkeitsschleifen dar, das die versprödete Randschicht der Schiene nach drei Überfahrten bei Geschwindigkeiten von 80 km/h abtragen kann. **Abbildung 55** auf **Seite 62** zeigt, dass zwar nach der Bearbeitung die Schiene aufgeraut wird, jedoch sind die Rauheiten nicht quer zur Fahrtrichtung, sondern schräg im Winkel von mehr als 45° angeordnet. Zudem verschwinden die zunächst sichtbaren aber unbedeutenden Riefen nach 1 bis 2 Wochen durch die Überwalzung im Betrieb. Der Lärm wird durch diese Art der Schienenbearbeitung also nicht erhöht. Das Hochgeschwindigkeitsschleifen eignet sich aufgrund seiner Konzeption auch zur Beseitigung von Riffeln, denn die Schleifsteine sind seitlich stabil fixiert, siehe **Abbildung 62**.



Abbildung 62: Stabile Reihenaufhängung der Schleifsteine (HSG) [2]

Das Hochgeschwindigkeitsschleifen kann derzeit mit zwei verschiedenen Schleifkörpern unterschiedlicher Körnung durchgeführt werden, die grober (Ziel: Materialabtrags) oder feiner (Ziel: Glatte Oberfläche) sind. Je nach Beauftragung der Schleifleistung wird während der drei Schleiffahrten entweder nur mit groben Schleifkörpern geschliffen (z.B. in Streckenabschnitten ohne Anwohner) oder während der dritten Schleiffahrt nur mit feinen Schleifkörpern geschliffen (z.B. in lärmsensiblen Bereichen). Die Fa. Vossloh sieht zudem bei den feinen Schleifkörpern noch ein Weiterentwicklungspotential, d.h. noch glattere Oberflächen sind

denkbar. Derzeit werden jedoch glattere Oberflächen (noch) nicht angefragt, so dass das Weiterentwicklungspotential aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht genutzt wird.

7 Messtechnische Erfassung und Beurteilung der Schienenbearbeitungsqualität

Heutzutage können mit drei Verfahren die Schienenrauheiten gemessen werden: „Besonders überwachtetes Gleis“ (BüG) [44], Messung nach Hecht, M.; Thron, Th.; Ben Othman, Y.:

Einfluss von Rad- und Schienenrauheiten - Messung und Berechnung
ZEVrails Glasers Annalen 132, 08.2008, S. 276-290 ³ oder Messung nach DIN EN 15610:2009⁴. Die ersten beiden Verfahren sind nicht zielführend.

7.1 Besonders überwachtetes Gleis BüG

Das Verfahren „Besonders überwachtetes Gleis“ (BüG) ist zwar gesetzlich in der 16. BImSchV (16.Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz) vom 12.06.1990 verankert, hat aber mehrere Nachteile: Es orientiert sich an einem „Normwert“, der keinen übertragbaren Bezug zur Oberflächenrauheit hat. Wenn also das Gleis als zu laut erkannt wird, kann die Ursache nicht zugeordnet werden und der Fehler im Schleifverfahren nicht benannt werden.

Da nur ein Messzug vorhanden ist, der das deutsche Streckennetz kontinuierlich abfährt, wird die Überprüfung oft Monate nach dem Schleifen durchgeführt. Bei auftretenden Überschreitungen ist dann die Schleifmaschine längst an einem anderen Ort und Nacharbeiten wären extrem teuer und können wegen des Zuführungsaufwandes erst sehr viel später erfolgen. Eine unzumutbare Lärmbelastung bliebe dadurch oft Monate bestehen.

Zudem entstehen sehr große Kosten des Messverfahrens durch den Schallmesszug an sich, siehe **Abbildung 63**. Das Verfahren ist auf dem Stand der Technik von Mitte der 1980er Jahre gesetzlich festgelegt und damit nicht modernisierbar. Kostentreiber sind die Lokomotiven (teilweise sogar zwei Lokomotiven), ein/e Lokführer/in (oder zwei), drei Wagen, die aus bremstechnischen Gründen nötig sind, und eine mehrköpfige Messgruppe. Wegen der hohen Kosten und des sehr eingeschränkten Nutzens ist DB Netz nur auf extremen Druck bereit, das Verfahren anzuwenden. Es wird nach [44] nur auf 900 km Strecke genutzt, während über 8000 km Linienlänge in akustischen Problembereichen liegen.

³ Norm für Bahnanwendungen – Oberbau – Abnahmen von Arbeiten, Teil 3: Abnahmen von reprofilierten Schienen im Gleis

⁴ Norm für Bahnanwendungen – Geräuschemission – Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch



Abbildung 63: Schallmesszug der DB Systemtechnik [44], drei Messwagen und hier nur eine, meist jedoch am jedem Ende eine Lok

Das neue Messverfahren muss dagegen in der Lage in der Lage sein, unmittelbar nach den Schleifarbeiten im Abnahmeprozess angewendet werden zu können.

7.2 Messung Schienenrauheit nach Norm EN 13231-3:2012

Die Messung nach EN 13231-3:2012 adressiert vom Titel her, siehe Fußnote vorherige Seite, genau das Problem, ist zum einen aber völlig ungenügend und wird auch gar nicht praktiziert. Die Herangehensweise kommt aus dem Bereich Oberflächenrauheiten für Maschinenfundamente, also einer statischen Anwendung.

Diese Norm hat zwei ganz entscheidende Nachteile. Zum einen werden Periodizitäten im Messergebnis nicht erkannt, zum anderen ist die zulässige Rauheitsamplitude viel zu hoch. Die beiden wesentlichen Probleme werden also in der Norm nicht abgebildet. Die Diskrepanz zeigt die Überführung der in der Norm EN 13231-3:2012 definierten Abnahmekriterien (**Abbildung 64**) in die Darstellung der Terzrauheitspegel der gemessenen Wellenlänge DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2, die durch die Norm 15610:2009 referenziert wird (**Abbildung 65, Abbildung 66**) [65] [66] [67].

7.3 Messung Schienenrauheit nach Norm DIN EN ISO 3095:2013-12

Da die Lärmabnahmemessungen aller Fahrzeuge nach TSI Noise auf der Einhaltung der Rauheiten nach DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2, basiert und die Rauheiten der Ausbreitungsrechnung der Lärmkarten der Umgebungslärmrichtlinie zugrunde liegen, stellen die Rauheiten nach DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2 die maßgeblichen zulässigen Höchstwerte dar.

Tabelle 1 — Abnahmekriterien für erlaubte prozentuale Überschreitungen im Längsprofil

Wellenlängenbereich mm	10 bis 30	30 bis 100	100 bis 300	300 bis 1 000
Klasse 1	5 %	5 %	5 %	5 %
Klasse 2	Keine Anforderungen	10 %	10 %	Keine Anforderungen

Tabelle 2 — Abnahmekriterien für Spitze-Spitze-Werte

Wellenlängenbereich mm	10 bis 30	30 bis 100	100 bis 300	300 bis 1 000
Toleranzen Spitze- Spitze-Werte mm	$\pm 0,010$	$\pm 0,010$	$\pm 0,015$	$\pm 0,075$

Abbildung 64: Abnahmekriterien von reprofilierten Schienen im Gleis nach EN 13231-3:2012

Die Interpretation der Ergebnisse zeigt, die Abnahmekriterien von reprofilierten Schienen nach EN 13231-3 zu deutlichen Überschreitungen der maximal zulässigen Rauheiten nach EN 15610:2009 führen, 5 bis 18 dB Überschreitungen nach Klasse 1.

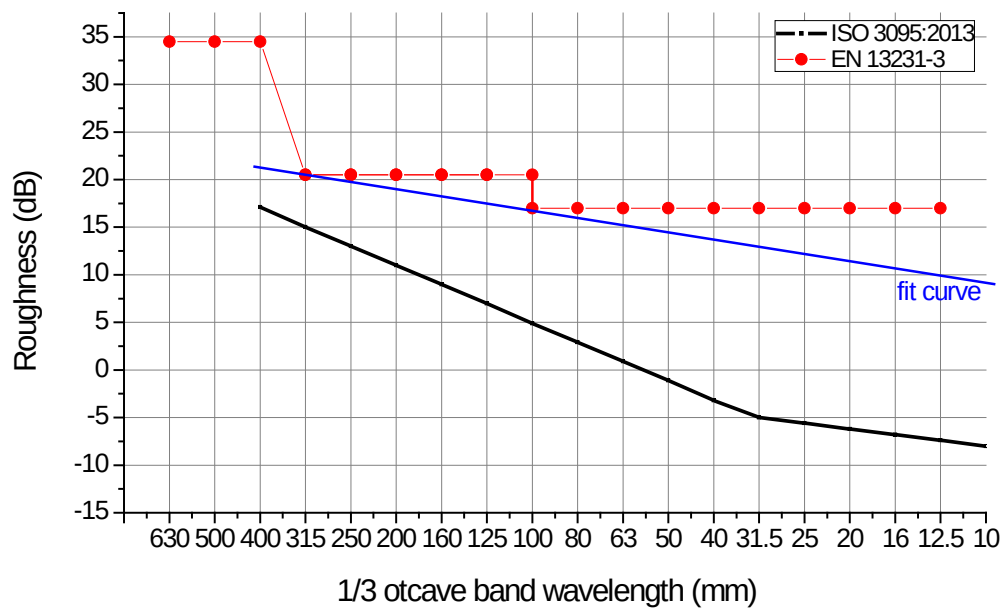


Abbildung 65: Abnahmekriterien der Schienenbearbeitung nach EN 13231-3:2012 (Klasse 1) transformiert in Darstellung der Terzrauhheitspegel der gemessenen Wellenlänge nach EN 15610:2009 (EN ISO 3095:2013)

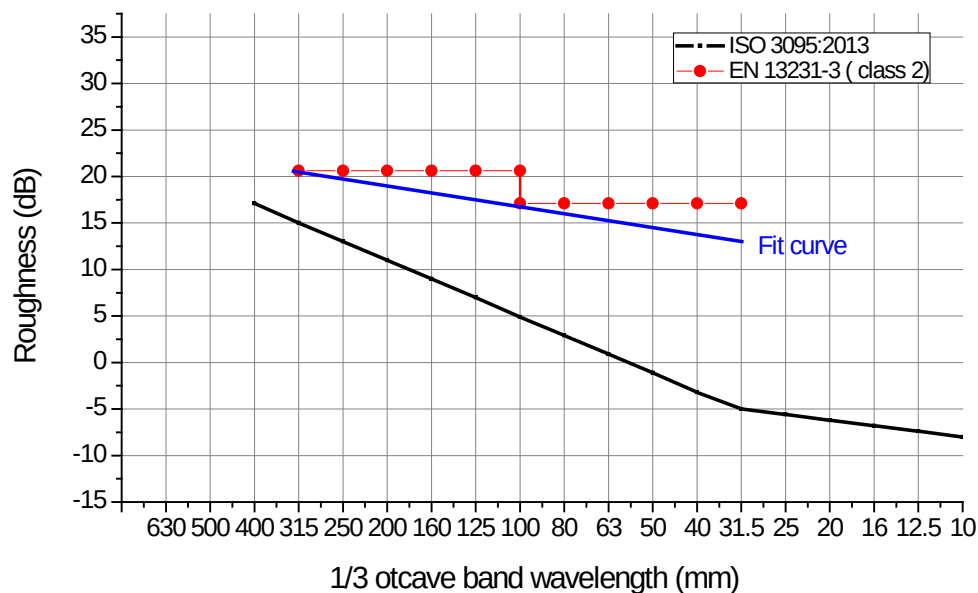


Abbildung 66: Abnahmekriterien der Schienenbearbeitung nach EN 13231-3:2012 (Klasse 2) transformiert in Darstellung der Terzrauhigkeitspegel der gemessenen Wellenlänge nach EN 15610:2009 (EN ISO 3095:2013)

Mit 5 bis 22 dB sind die Überschreitungen nach Klasse 2 noch viel größer. Auch in der Fachpresse wird zugegeben, dass die Abnahmekriterien nach EN 13231-3:2012 nur in bestimmter Hinsicht, also in Sonderfällen ausreichend sind [47]. Wie genannt werden sie aber in aller Regel eh nicht angewendet.

Nach der Schienenbearbeitung muss daher zukünftig zur Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses unmittelbar anschließend eine Schienenrauheitsmessung durchgeführt werden.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über ausgewählte (am Markt verfügbare) Messgeräte, die zur Messung der Schienenrauheit eingesetzt werden können. Einerseits gibt es Geräte, die die Schienenrauheit auf einem Gleisabschnitt auf einer Länge von 1,2 m messen (TRM01, RM 1200 digital). Mobile Geräte (m|rail trolley, Rail Surface Analyser) hingegen können per Hand geschoben werden, um in längeren Streckenabschnitten die Schienenrauheit zu messen. Aktuell wird zudem ein Schienenrauheitsmessgerät entwickelt, dass durch einen eigenen Antrieb bei Geschwindigkeiten von bis zu 4 m/s die Schienenrauheit über große Distanzen messen kann [60]. Neben den Geräten, die per Hand geschoben werden, wären solche Geräte eine geeignete Technologie, um direkt nach der Schienenbearbeitung die Bearbeitungsqualität zu beurteilen. Ungenügende Qualitäten könnten sofort ermittelt und nachbearbeitet werden. Eine reproduzierbare und beliebig nachprüfbare Überwachung der Schleifergebnisse ist möglich. Natürlich muss diese Qualität in der Beauftragung der Schleifarbeiten, auch bei internen Auftragnehmern (DB Bahnbau Gruppe) überprüft und eingehalten werden.

Tabelle 7: Ausgewählte (am Markt verfügbare) Messgeräte für Schienenrauheitsmessung

Ødegaard & Danneskiold-Samsøe (Denmark): Schienenrauheitsmessgerät TRM 01 • Messung der Schienenrauheit auf einer Länge von 1,2 m • Betriebszeit: 5,5 Stunden • Auswertung der Schienenrauheit nach EN 15610	 Abbildung 67: Messung der Schienenrauheit mit TRM 01
Vogel & Plötscher (Deutschland): Schienenrauheitsmessgerät RM 1200 digital [62] • Messung der Schienenrauheit auf einer Länge von 1,2 m [62] • Auswertung der Schienenrauheit nach EN 13231-3 oder DB RIL 824 und nicht nach EN 15610 (Auswertung ist nachzubessern!) • Offiziell zugelassen durch die DB	 Abbildung 68: Messung der Schienenrauheit mit RM 1200 digital [62]
Müller-BBM (Deutschland): Schienenrauheitsmessgerät m rail trolley • „Qualifizierung von Gleisabschnitten für akustische Abnahmemessungen (normgerecht gemäß EN 15610, EN ISO 3095, TSI NOI CR/HS)“ [61] • „Monitoring der Gleisqualität im Streckennetz“ [61] • „Bewertung des Schienenschleifens (gemäß EN 13231-3 sowie akustisches Schienenschleifen)“ [61] (Zusatzoption) • Bedienung des Messgeräts durch eine Person • Messgerät wird über Schienenoberfläche geschoben, so dass kontinuierlich die Schienenrauheiten auch auf längeren Streckenabschnitte gemessen werden können	 Abbildung 69: Messung der Schienenrauheit mit m rail trolleys [61]

Alfa Products & Technologies (Belgium): Rail Surface Analyser (RSA) [63]

- Messgeschwindigkeit: 0,8 - 1,0 m/s
- Betriebszeit: 4,5 Stunden
- Bedienung des Messgeräts durch eine Person
- Messgerät wird über Schienenoberfläche geschoben, so dass kontinuierlich die Schienenrauheiten auch auf längeren Streckenabschnitte gemessen werden können



Abbildung 70: Messung der Schienenrauheit mit Rail Surface Analyser [63]

Der Schienenzustand sollte mit Monitoring-Stationen zudem kontinuierlich an bestimmten kritischen Punkten des Netzes gemessen und mit den Lärmkarten der EU Umgebungslärmrichtlinie verglichen werden. So wird es in der Schweiz seit 2003 gemacht. Die Ergebnisse der sechs Schweizer Monitoring-Stationen sind frei herunterladbar [64].

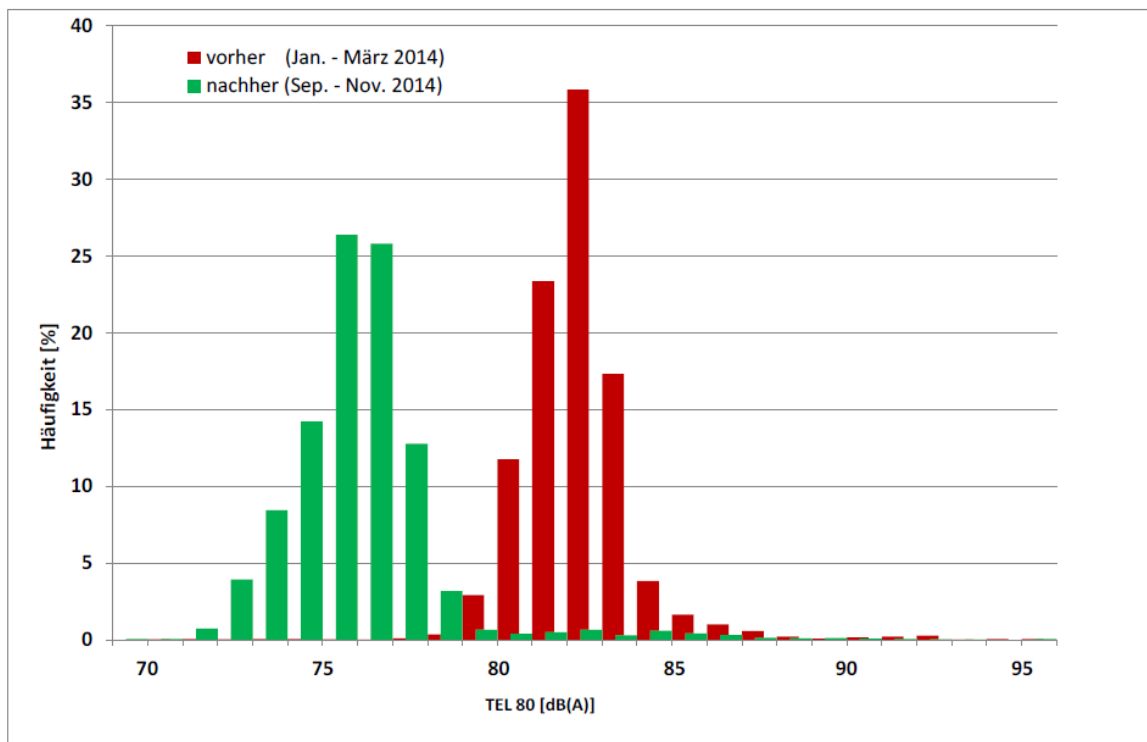


Abbildung 71: Einfluss der Oberbauerneuerung auf die Vorbeifahrtpegel von Reisezügen [64]

Seit 2003 sind die Monitoring-Stationen ohne nennenswerte Ausfälle in Betrieb. Die aus dem Bericht von 2014 [64] stammende **Abbildung 71** zeigt sehr deutlich den Einfluss schlechter Schienenfahrflächen auf. Alle Personenzüge sind hier in diesem Beispiel mit schlechter Schiene im Mittel 8 dB(A) lauter als nach der Gleiserneuerung. Eine Ausstattung mit unabhängig ausgewerteten Monitoring-Stationen an kritischen, anwohnergerechten Gleisstellen ist auch in Deutschland dringend zu fordern und umzusetzen. Für 2017 sind vom BMVI 17 Stationen angekündigt, jedoch ist unklar, wer wie auswerten soll und eine Ausschreibung der Arbeiten existiert auch noch nicht.

Damit kann sich erhöhender Lärm der Schienenfahrzeuge identifizieren lassen, so dass rechtzeitig Maßnahmen zur Verbesserung der Schienenoberflächenqualität eingeleitet werden können. Mit Hilfe der Monitoring-Station kann die Wirksamkeit der Schienenbearbeitung im Nachgang beurteilt werden und es kann klar gezeigt werden, ob es leiser geworden ist oder nicht. Statt dass wie heute Aussage gegen Aussage steht. Bei der Stadtbahn Berlin wurde beispielsweise im Winter 2014/15 nach Schienenschleifen und dann monatelangem Streit zwischen Anwohnern, unterstützt von der Umweltstadträtin Bezirk Berlin-Tiergarten und DB Netz mit sehr kleiner Oberflächenrauheit nachgeschliffen, was eine Pegelminderung bis zu 23 dB gebracht haben soll (Meldung Tagesspiegel vom 12.01.2015 15:18 Uhr). In der Berliner Morgenpost vom 12.1.2015, 13.17 Uhr wurde noch weiter ausgeführt:

Nach dem Einsatz der Schleifmaschine fuhren im Gleis 1 vier Fünftel der 65 S-Bahn-Züge neun Dezibel leiser. Die Lärmbelastung sank von 97 auf 88 Dezibel. Eine Minderung um zehn Dezibel wird als Halbierung des Lärms wahrgenommen. "Im Gleis 2 wurde bei 80 Prozent der Zugfahrten der Lärm sogar um 23 Dezibel gemindert", so der Bahnsprecher. Die Lärmbelastung sank von 91 auf 68 Dezibel.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

Durch die heutigen Randbedingungen des Eisenbahnbetriebs (hohe betriebliche Geschwindigkeiten, hohe Traktionsleistungen, hohe Radsatzlasten) kann die Entstehung von Fahrflächenfehlern und der Verschleiß der Schiene nicht vermieden werden. Eine mangelhafte Schienenpflege würde durch frühe Erschöpfung des Verschleißvorrates am Schienenkopf oder durch Risswachstum in den Schienenkopf die Liegezeit der Schiene deutlich reduzieren und damit die Kosten erhöhen. Betriebliche Einschränkung durch den Schienenwechsel wären eine weitere Folge (temporäre Streckensperrung und Schienenersatzverkehr mit Bussen). Zur Vermeidung dieser negativen Begleiterscheinungen werden Schienen heutzutage mit verschiedenen Strategien (präventiv, korrektiv) und Verfahren (fräsen, schleifen, hobeln) regelmäßig bearbeitet, um eine hohe Schienenqualität in Bezug auf Sicherheit beizubehalten und damit einen reibungslosen Betrieb auf der Strecke zu ermöglichen. Zunehmend beklagen sich Anwohner jedoch über lautere Schienenfahrzeuge nach der Schienenbearbeitung, da die Schienenbearbeitung sowohl die messtechnisch erfassten Schallemissionen der Fahrzeuge als auch die wahrgenommenen Lärmimmissionen für die Anwohner erhöht. Bei letzterem spielt auch die Tonhaltigkeit eine Rolle, die Lärm als störender wahrnehmen lässt, auch wenn der Schallpegel gleichgeblieben sein sollte. Meist passiert nach dem Schleifen jedoch beides, es wird lauter und zudem noch tonhaltig.

Jedes Schienenbearbeitungsverfahren hinterlässt ein eindeutiges Bearbeitungsbild auf der Schienenoberfläche zurück, anhand dessen das Bearbeitungsverfahren identifiziert werden kann. Zudem kann jedes Verfahren durch verfahrensspezifische Parameter wie beispielsweise Anpressdruck oder Schleifgeschwindigkeit weiter beeinflusst werden. Das rotatorische Schleifverfahren kann aus diesen Gründen sehr unterschiedliche Schliffbilder auf der Schienenoberfläche erzeugen und Charakteristiken von einer glatten bis sehr schuppigen rauen Oberfläche zeigen. Grobe Schliffbilder mit eingeschliffenen Querriefen (Schleifriffel) können den Lärm von Schienenfahrzeugen erhöhen, da die die körper- und luftschallabstrahlenden Komponenten Schwelle, Schiene und Rad (je Wellenlänge) stärker zum Schwingen angeregt werden. Zwar hat der Kontakt von Stahlrad auf Stahlschiene eine plattwalzende Wirkung, d.h. die Bearbeitungsbilder können während des Betriebs allmählich auf der Strecke plattgedrückt werden (das Schliffbild ist dann nicht mehr zu sehen). Die zeitliche Dauer ist nicht immer gleich und kann viele Monate dauern oder selten gar nie erreicht werden. Dies wird von den dynamischen Gleiseigenschaften, vom Betrieb auf der Strecke und den Radsatzlasten beeinflusst. Schwere Güterzüge mit hohen Achslasten drücken die Schleifspuren nach vielen Überrollungen schneller wieder platt, während in Mischbetrieben oder bei Betrieben mit leichten Fahrzeugen (Nahverkehr) es sehr viel länger dauern kann, bis der Einfluss des Schliffbildes auf den Lärm vorbeifahrender Züge nicht mehr zu hören ist. Es gibt aber auch

Beispiele, vor allem aus dem Nahverkehrsbereich, bei denen selbst nach 1,5 Jahren Betrieb noch Querriefen auf dem Schienenkopf zu sehen sind und die Anwohner mehr als nötig durch vorbeifahrenden Züge belastigt und gestört werden.

Dabei kann grundsätzlich jedes Verfahren der Schienenbearbeitung, das heute eingesetzt wird, glatte Schienenoberflächen hinterlassen und somit die Anwohner von Eisenbahnstrecken nicht durch vergrößerten Lärm belästigen. Das oszillierende Verfahren ist mit seinen Längsriefen dafür prädestiniert, jedoch kann auch das rotierende Verfahren mit geringen Bearbeitungsgeschwindigkeiten und fein gekörnten Schleifsteinen glatte Oberflächen hinterlassen. Glatte Oberflächen werden erreicht, wenn auf die Qualität der Oberfläche Wert gelegt wird und nicht nur der Materialabtrag im Vordergrund steht. Großer Materialabtrag zur Reprofilierung oder zum Abtrag des rissbehafteten Materials kann beispielsweise mit einer vorlaufenden Schienenfräse oder mit vorlaufenden Schleifmaschinen mit rotierenden Verfahren (gröbere Schleifsteine) erzielt werden. Eine nachfolgende Glättung mit geringem Materialabtrag muss dann nachfolgen. Bei Streckenabschnitten, die mit 80 km/h und mehr befahren werden können, bietet sich das Hochgeschwindigkeitsschleifen an, um zügig (ohne großen betrieblichen Einfluss) die geschwächte Oberflächenschicht zu entfernen.

Es müssen keine neuen Technologien der Schienenbearbeitung entwickelt werden, um die Schienenbearbeitung in den Einklang mit dem Lärm von Schienenfahrzeugen zu bringen. Die vorhandene Technologie muss in Streckenabschnitten, die von Anwohnern bewohnt werden, nur mit höherem Aufwand eingesetzt werden. Der höhere Aufwand wird die Kosten der Schienenbearbeitung erhöhen. Deshalb ist momentan eher gegensätzliches festzustellen, d.h. Auftraggeber verlangen von den Firmen, dass immer schneller möglichst viel Material von der Schiene entfernt werden soll. Unternehmen, die Schleifleistungen anbieten, haben keine andere Wahl als die verfahrensspezifischen Parameter entsprechend anzupassen. Am Beispiel des rotatorischen Schleifens kann dies zu stark eingeschliffenen Riffeln mit hohen Amplituden führen. Solche Bearbeitungsbilder führen aktuell zu viel Lärm ohne weitere Konsequenzen, denn die akustische Qualität der Oberfläche nach der Schienenbearbeitung ist weder spezifiziert und noch ausreichend im Nachgang überprüft. Es sind dringend akustisch relevante Qualitätskriterien anzuwenden. Selbst wenn bei rotatorischem Schleifen stark eingeschliffene Riffeln auftreten, könnten mit einem feineren Nachschliff diese Riffel wieder entfernt werden, um neben dem notwendigen Materialabtrag auch für eine glatte Oberfläche zu sorgen. Es fehlt jedoch Auftraggebern der Schienenbearbeitung an Vorgaben, um akustischen Anforderungen genügen zu müssen.

Mit ein Grund für die vergrößerte Problematik des Lärms durch Schleifen sind die LuFVII-Mittel⁵ der Bundesregierung, da dadurch mehr Geld für diese Maßnahmen vorhanden ist. Da es für die 20 Mrd. € LuFVII-Mittel für die Instandhaltung der DB Netz keinerlei akustische Anforderungen gibt, wird der im Verhältnis zu den Gesamtkosten sehr geringe Aufwand für Qualitätsdefinition, Herstellung und Überprüfung der Rauheit eines akustisch genügenden Gleises eingespart. Dieses Manko muss mit politischem Druck auf den Monopolisten DB Netz nachgeholt werden.

Nicht überall muss dieser (etwas) höhere Aufwand der Schienenbearbeitung betrieben werden, sondern nur in der Nähe von bewohnten Streckenabschnitten. Es sind (politische) Vorgaben oder Grenzwerte notwendig, damit der o.g. geringe finanzielle Zusatzaufwand aufgebracht wird. Mit Hilfe der vorhandenen Technologien kann sofort eine Verbesserung der Bearbeitungsqualität erreicht werden, damit Anwohner nicht über mehrere Monate oder länger die Auswirkungen der Schienenbearbeitung hören. Eine lärmreduzierende Schienenbearbeitung wird zu mehr Akzeptanz des Verkehrsmittels führen.

Die Kriterien und die Messmittel zur Beurteilung der Schienenbearbeitungsqualität sind klar und geeignete Messgeräte werden von mehreren Herstellern auf dem Markt angeboten. Die in **Abbildung 61** auf **Seite 68** aufgeführte TSI Grenzkurve, nun dokumentiert in DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2 wurde in Jahrzehnte langem intensiven Austausch in Europa für die Abnahme von Fahrzeugen entwickelt. Sie beschreibt die Oberflächengüte einer mittulguten Schiene und ist somit keine extreme Anforderung, sondern vermeidet nur sehr schlechte, nicht akzeptable Oberflächenrauheiten. Da die zu dieser Schienenrauheit gehörenden Lärmwerte auch für die Berechnung der Lärmkarten gemäß EU-Umgebungslärmrichtlinie verwendet werden, ist es nur logisch, die Schienenrauheit nach der Schienenbearbeitung auch auf diese Vorgaben zu begrenzen. Andernfalls würden die Lärmkarten des Eisenbahn-bundesamtes keinen Sinn machen.

Unmittelbar nach dem Schleifvorgang, vor Freigabe des Gleises für den Betrieb, ist die Einhaltung der Rauheitsgrenze nach DIN EN ISO 3095:2013-12, Bild 2, nachzuweisen. Wird die Grenze überschritten, darf das Gleis nicht für den Betrieb freigegeben werden, sondern muss nachgearbeitet werden. Erst nach erfolgreichem Nachweis der Einhaltung der Schienenrauheitsgrenzwerte darf zukünftig der Betrieb auf dem neu geschliffenen Gleis wieder

⁵ Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung der Bundesregierung

Webseite: https://www.eba.bund.de/DE/HauptNavi/Finanzierung/LuFV/lufv_node.html. Letzter Zugriff am 12.12.2016

aufgenommen werden. Dieser Nachweis könnte z.B, nach entsprechender Ausrüstung und Schulung durch den Qualitätsüberwacher Schienenbearbeitung (QüS) der Deutschen Bahn unmittelbar nach dem Schleifvorgang erfolgen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Hempe, T.: *Rollkontaktermüdung an Schienen – aktuelle Erkenntnisse und Strategien zur Beherrschung*. Vortrag im Eisenbahnwesen-Seminar der TU Berlin, 03.02.2014, Berlin.
- [2] Meyer, S.: *Lärm als Qualitätsindikator der Schienenbearbeitung. Lauter nach dem Schleifen?* Vortrag im Eisenbahnwesen-Seminar der TU Berlin, 11.06.2016, Berlin.
- [3] Eisenbahnunfall in Hatfield, 17. Oktober 2000. Webseite:
<http://www.railwaysarchive.co.uk/eventssummary.php?eventID=143>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [4] Tuscher, J.: *Stand der Flottenumstellung bei privaten Haltern in Deutschland*. Vortrag im Eisenbahnwesen-Seminar der TU Berlin, 28.11.2016, Berlin.
- [5] Hecht, M.: *Kosten und Nutzen von weniger Lärm*. In: Güterbahnen, 03/2015, Gastkommentar.
- [6] Hecht, M.: *Güterverkehrslärm, ein Thema mit vielen Einflussgrößen*. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 04/2012.
- [7] Hecht, M.: *Reduktion von Lärm und Erschütterungen im Bahnverkehr*. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 09/2013.
- [8] Hecht, M., Fabian, St.: *Innovativer Lärmschutz als Zukunftsaufgabe*. In: Eisenbahn Ingenieur (EI) Spezial Lärmschutz II, 09/2015.
- [9] Hecht, M.: *Lärminderung – eine Gemeinschaftsaufgabe*. Wascosa infoletter, Ausgabe 19, 05/2012.
- [10] Umweltbundesamt: *Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm nach Umgebungsrichtlinie*. Webseite: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/laermkartierung-laermaktionsplanung>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [11] Gerike, R.: *Schienenverkehrsinduzierte Lärmemissionen*. Webseite:
<http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/49492/>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [12] Möser, M.: *Technische Akustik*. VDI-Buch, 8. Auflage, ISBN 978-3-540-89818-4.
- [13] Gross, J.: *Lärm-induzierte Erkrankungen des Menschen*. Vortrag in der Klasse für Naturwissenschaften am 13. September 2012. Webseite: www.leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2012/12/18-Gross.pdf. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [14] Schindler, C.: *Handbuch Schienenfahrzeuge: Entwicklung, Produktion, Instandhaltung*. ISBN-10: 3777104272 (ISBN-13: 978-3777104270).
- [15] EU Projekt „Strategies and Tools to Assess and Implement noise Reducing measures for Railway“. Webseite: <http://www.stairr.org/>. Letzter Zugriff am 12.12.2016.
- [16] Hecht, M.: *Rollgeräusche bei Eisenbahnfahrzeugen*. In: Eisenbahningenieur (EI), 05/2010.
- [17] Gramowski, C., Hecht, M.: *Lärmarme Gleisbauformen*. In: ZEVrail, 05/2012.
- [18] Mitusch, K., Hecht, M., et al.: *Strategien zur effektiven Minderung des Schienengüterverkehrslärms*. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes (Berichtsveröffentlichung steht noch aus).
- [19] Heutschi, K., Hecht, M., et al.: *Schotteroberbau und Fest Fahrbahn, Grundsatzuntersuchungen zur Schallausbreitung bei quellennahen Immissionsmessungen*. In: ZEVrail, 05/2010.
- [20] Thron, T., Hecht, Markus: *Oberbau, Rollgeräusch, Lärm – in der Praxis umsetzbare Akustik*. In: Eisenbahningenieur (EI), 01/2010.

- [21] Ilias, H.: *The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth*. Journal of Sound and Vibration, Volume 227, Issue 5, 11.11.1999, Pages 935-948. Webseite: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X9992059X>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [22] Götz, G.: *Fahrflächenfehler – Ursache und Entstehung*. Vortrag während Punktforum Schienenschleifen im Rahmen der BahnWege-Seminare 2015, 24.-25.11.2015, Düsseldorf.
- [23] Grohmann, H.-D.: *Beschädigungsarten an der Schiene – verursacht durch den Betrieb*. In: Tagungsbericht Internationales Symposium „Schienenfehler“, 16.-17.11.2000, Brandenburg an der Havel. Webseite: https://opus4.kobv.de/opus4-fhbrb/files/6/Tagungsbericht_Schienenfehler.pdf. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [24] Knothe, K.: *Gleisdynamik*. Ernst & Sohn Verlag. ISBN: 3433017603 (ISBN-13: 978-3433017609)
- [25] Hohlfeld, C.: *Rasende Züge bringen Schienen zum Heulen*. Webseite: <https://archiv.pressestelle.tu-berlin.de/tui/95okt/riffel.htm>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [26] Grassie, S. L.: *Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments*. Proc. IMechE Vol. 223 Part F: J. Rail and Rapid Transit, DOI: 10.1243/09544097JRRT264. Webseite: <http://www.railmeasurement.com/assets/docs/090709-JRRT-corrugation.pdf>. Letzter Zugriff am 11.12.2016
- [27] Dey, A, et al.: *Die Klassifizierung von Oberflächenfehlern in Schienen mit der Wirbelstromprüfung*. DGZfP-Jahrestagung 2009. Webseite: <http://www.ndt.net/article/dgzfp2009/Inhalt/di2b3.pdf>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [28] Lichtberger, B.: *Handbuch Gleis (Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit)*. 3. Auflage. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, ISBN: 978-3-7771-0400-3, 2010.
- [29] Thomas, H.-M.: *Früherkennung von Rollkontakt-Ermüdung (RCF) in Eisenbahnschienen*. DACH-Jahrestagung 2008 in St. Gallen. Webseite: www.ndt.net/article/dgzfp2008/Inhalt/mi3a1.pdf. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [30] Fendrich, L.: *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. ISBN 978-3-642-30020-2, Berlin Heidelberg, Springer, 2013.
- [31] Streblow, H.: *Möglichkeiten und Grenzen in der präventiven Schienenbearbeitung*. Vortrag während Punktforum Schienenschleifen im Rahmen der BahnWege-Seminare 2015, 24.-25.11.2015, Düsseldorf.
- [32] Pollak, K.-S.: *Life Cycle Cost am Beispiel von Fahrschienen in hochbelasteten Bereichen der Hamburger Hochbahn*. Bachelorarbeit am Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau- und -betrieb der Technischen Universität Braunschweig, 2011. Webseite: http://uegg.eu/fileadmin/user_upload/Qualitaetspreis/QP12_N0021015a_Pollak.pdf. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [33] Schöch, W.: *Entwicklung von Schleifstrategien gegen Rollkontaktermüdung – Ein internationaler Überblick*. ZEVrail Glasers Analen 132, 10. Oktober 2008. Webseite: www.speno.ch/pdf/a347_120dpi.pdf. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [34] Marx, A.: *Schienenschleifen auf den Punkt gebracht*. Tagungsbericht zum 1. Punktforum Schienenschleifen. In: Eisenbahningenieur 05/2016.

- [35] Hempe, T.: *Schienenbearbeitung bei der DB Netz AG - strategischer Ansatz und Erfolge*. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2013.
- [36] Giesler, H.-J.: *Bericht über die Geräuschemission akustisch geschliffener Gleise*. In: Umweltbundesamt Berlin, 2002
- [37] Hartleben, D.: *Präventives Schienenschleifen – Mittel zur Lärmreduzierung*. In: Eisenbahningenieur 06/2010.
- [38] Fa. Vossloh rail services: *Schienenpflege in voller Fahrt. Schleifen und Fräsen*. Webseite: http://www.vosslohrailsevices.com/media/downloads/pdfs/prospekte/4_grinding_and_milling/Schleifen_und_Fraesen.pdf. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [39] Fa. Plasser und Theurer: *Mobile Schienenbearbeitung. Alles rund um die Schiene*. Webseite: <https://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/mobile-schienenbearbeitung.html>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [40] Fa. Loram: *Speed, Performance, Reliability*. Webseite: <http://www.loram.com/Services/Default.aspx?id=1478>. Letzter Zugriff am 11.12.2016
- [41] Fa. L&S Luddenheit und Scherf: *Rail Maintenance Technologies. Schienenschleifservice*. Webseite: <http://www.l-und-s.de/lsgmbh.html>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [42] Fa. Schweerbau: *Schienenbearbeitung*. Webseite: <http://www.schweerbau.de/seiten/schien01.html>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [43] Graetz, C.: *Auswirkungen der Schienenbearbeitung auf die Lärmemission von Schienenfahrzeugen*. Bachelorarbeit am Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin. 07/2016.
- [44] Rothhämel, J., et al.: *Akustischer Fahrflächenzustand im Netz der DB Netz AG*. In: ZEVrail (139), Sonderheft im Juni 2015 zum Thema: Lärmschutz und Umwelt, Seite 19 bis 25
- [45] Auer, F., et al.: *Schiene mit idealem Lärmschliff (oszillierendes Schleifen)*. In Eisenbahntechnischer Rundschau (ETR). 09/2015.
- [46] Esveld, C.: *Modern Railway Track (Second Edition)*. ISBN 90-800324-3-3
- [47] Schöch, W.: *Verringerung von Eisenbahnlärm durch Schienenschleifen*. In: Eisenbahningenieur 11/2015.
- [48] Stute, E.: *Wirtschaftlicher Einsatz, Schienenfehler und Leistungsanalyse der Schienenfräs- und Schleifmaschinen der DB Bahnbau Gruppen*. Webseite: <http://www.szdc.cz/soubory/konference-seminare/zdc-2016/c09-stute-db-bahnbau.pdf>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [49] Fa. Schweerbau: *Schienenbearbeitung: Hobeln*. Webseite: <http://www.schweerbau.de/seiten/schien03.html>. Letzter Zugriff am 12.12.2016.
- [50] Screenshots aus Plasser und Theurer Produktvideo zur Hobelmaschine für Gleise Bauart SBM 250. Webseite: <http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/mobile-schienenbearbeitung-sbm-250.html>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [51] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibration. Mechanism, Modelling and Means of Control*. Elsevier, Oxford. (2009).
- [52] Hecht, M.: *Den Lärm an der Quelle mindern*. In: Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 10/2015, Interview.
- [53] Hecht, M.: *Den Lärm an der Quelle bekämpfen*. In: Güterbahnen, 01/2010, Gastkommentar.

- [54] Bing, D., Hecht, M.: *Der Einfluss der Grauguss- und Verbundstoffsohlen auf die Längsdynamik beim Bremsen im Schienengüterverkehr*. In: ZEVrail 08/2014.
- [55] Hecht, M.: *Fahrwerkkomponenten*. In: ETR 47 (1998), S. 679- 684.
- [56] Thron, T.: *Emissionsmodell für Schienenverkehrslärm - Ein Beitrag zur Lärmprognose auf der Basis messtechnisch erfasster Modellparameter*. Dissertation am FG Schienenfahrzeuge der TU Berlin, 02/2010. Webseite: <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/2726>. Letzter Zugriff am 11.12.2016.
- [57] Thron, T., Hecht, M.: *The sonRAIL emission model for railway noise in Switzerland*. In: Acta Acustica united with Acustica. Acta Acustica united with Acustica, vol. 96, 873-883, 2010.
- [58] Thron, T., Hecht, M., et al.: sonRail, nouvel outil de calcul du bruit ferroviaire. In: Le Rail, Nr. 160, 10/2009.
- [59] De Vos, P.; de Groot, M.: UIC - Focus-Sustainable Development, Noise, Noise reduction of freight wagon retrofitting, Nr.2,05/2013.
- [60] SaeYoung Technologies: auto RAILCHECKER. Webseite: <http://www.autorailchecker.com/>. Letzter Zugriff am 12.12.2016.
- [61] Müller-BBM: m|rail trolley - Hochpräzises Messgerät für Schienenrauigkeit. Webseite: <http://www.muellerbbm.de/produkte/schienenrauheitsmessgeraet/>. Letzter Zugriff am 12.12.2016
- [62] Vogel & Plötscher: Schienenrauheitsmessgerät RM 1200 digital. Webseite: <http://www.vogelundploetscher.de/e/rm1200d/praxis.html>. Letzter Zugriff am 12.12.2016.
- [63] Alfa Products & Technologies (Belgium): Rail Surface Analyser. Webseite: <http://www.aptrail.com/products/measurement/apt-rsa.asp>. Letzter Zugriff am 12.12.2016.
- [64] Bundesamt für Verkehr BAV: *Monitoring Eisenbahnlärm – Jahresbericht 2014*. Webseite: https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/laermsanierung/monitoring_jahresbericht2014.pdf.download.pdf/monitoring_jahresbericht2014.pdf. Letzter Zugriff am 12.12.2016.
- [65] Zhang, H.: *Rail Roughness Data Processing for Grinding Quality Estimation*. Bericht des FG Schienenfahrzeuge der TU Berlin, 15/2015.
- [66] Hecht, M., Zhang, H.: Monitoring Railway Noise, Rail and Wheel Roughness. Vortrag im Rahmen der Inter-Noise, Hamburg, 2015.
- [67] Hecht, M.; Thron, Th.; Ben Othman, Y.: Einfluss von Rad- und Schienenrauheiten - Messung und Berechnung; ZEVrail Glasers Annalen 132, 08.2008, S. 276-290