

Schienenschleifen als Bestandteil einer technisch-wirtschaftlichen Gleisinstandhaltung

(Rail grinding as a part of technically and
economically efficient track maintenance)

Dr.-Ing. Thomas Hempe, München,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Siefer, Hannover

Schienenschleifen als Bestandteil einer technisch-wirtschaftlichen Gleisinstandhaltung*

Rail grinding as a part of technically and economically efficient track maintenance

Dr.-Ing. Thomas Hempe, München, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Siefer, Hannover

Zusammenfassung

Instandhaltung ist kein Selbstzweck. Eine zielgerichtete und planvolle Instandhaltung der baulichen Anlagen von Schienenfahrwegen ist unerlässliche Voraussetzung für eine anforderungsgerechte Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems Bahn.

In dem vorliegenden Aufsatz werden Prämissen einer technisch-wirtschaftlichen Instandhaltung definiert. Anhand der vielfältigen Einsatzfelder wird das Schienenschleifen als integraler Bestandteil technisch-wirtschaftlicher Instandhaltung vorgestellt.

Durch Anwendung der LCC-Methode wird der Nutzen des Schienenschleifens – insbesondere zur Beseitigung von Fahrflächenunebenheiten und zur Beseitigung von Rollkontaktermüdungsschäden – nachgewiesen. Voraussetzung für eine kosteneffiziente Instandhaltung ist eine hohe Planungsqualität und ein zielgerichteter Einsatz der vorhandenen Ressourcen.

Abstract

Track maintenance is no end in itself. To guarantee high reliability and availability of railway traffic, targeted maintenance is an essential need.

The following article defines premises of maintenance strategies that consider technical demands as well as economical needs. Looking at its various applications, rail grinding is presented as an integral part of targeted maintenance.

To evaluate the economic efficiency of rail grinding, the LCC-method is used. In this article, the economic efficiency of cyclic grinding to combat rolling contact fatigue and to prevent rail corrugation is proved. It is shown that a good planning of grinding action and an efficient use of machine resources is essential for economically efficient maintenance.

1. Einführung

1.1 Grundlagen technisch-wirtschaftlicher Instandhaltung

Hochwertige Mobilitätsangebote und eng verzahnte Transportketten erfordern eine leistungsfähige Infrastruktur. Im schienengebundenen Verkehr ist eine zielgerichtete Instandhaltung des Oberbaus besonders wichtig, um eine hohe Zuverlässigkeit und

Verfügbarkeit der Infrastruktur zu gewährleisten.

Die dynamische Beanspruchung des Eisenbahnoberbaus durch den Zugbetrieb hat verschiedene Schädigungsprozesse zur Folge, die in regelmäßigen Abständen die Durchführung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen notwendig machen. *Bild 1* zeigt den allgemein gültigen Verlauf des Abnutzungsvorrats technischer Anlagen über die Zeit. Der dargestellte Funktionsverlauf hat sowohl für den einzelnen Instandhaltungszyklus wie auch für den gesamten Lebenszyklus technischer Anlagen Gültigkeit. Kennzeichnend sind die hohe Anfangsabnutzung (Frühausfälle,

„Kinderkrankheiten“) und der in der Regel mit Funktionseinschränkungen einhergehende rapide Substanzverzehr zum Ende der Nutzungsdauer.

Wird der gesamte Lebenszyklus betrachtet, so kann der Funktionsverlauf der Abnutzungskurve durch die Instandhaltung beeinflusst werden. Durch eine zielgerichtete Instandhaltung kann der Substanzverzehr verzögert und die technische Nutzungsdauer verlängert werden. Die verzögerte Abnahme des Abnutzungsvorrats erlaubt es zugleich, die Toleranzgrenze für eine Erneuerung ein Stück weit herabzusetzen. Bei sicherheitsrelevanten Anlagen oder Anlagen mit hohen Anforderungen an

* Der Beitrag beschreibt Ergebnisse eines Forschungsvorhabens der Leibniz Universität Hannover. Sämtliche Kostenangaben basieren auf allgemein gültigen Berechnungen und haben keinen Bezug zu einem einzelnen Infrastrukturbetreiber.

Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit können Funktionseinschränkungen und Ausfälle nicht oder nur bedingt toleriert werden. Die baulichen Anlagen von Schienenfahrwegen werden deshalb zyklisch inspiziert. Im Rahmen der Inspektion wird der noch vorhandene Abnutzungsvorrat festgestellt und beurteilt. Die Inspektionszyklen werden in Abhängigkeit der örtlichen Beanspruchung so gewählt, dass Funktionseinschränkungen innerhalb eines Zyklus in der Regel ausgeschlossen sind. Bei Überschreiten definierter Eingriffsschwellen ist eine Instandsetzung oder Erneuerung der Anlage einzuplanen.

Die zustandsabhängige Instandhaltung und Erneuerung des Eisenbahnoberbaus nach der Inspektionsmethode ist Garant für eine hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Anlagen bei maximaler Ausnutzung des vorhandenen Abnutzungsvorrats. Die vorausschauende Abstimmung von Instandhaltung und Erneuerung ist eine Kernaufgabe jedes Infrastrukturbetreibers. Dabei muss es das Ziel sein, technisch notwendige Maßnahmen zum wirtschaftlich besten Zeitpunkt durchzuführen. Eine derartig organisierte, technisch-wirtschaftliche Instandhaltung ist gekennzeichnet durch

- eine rechtzeitige und zielgerichtete (planvolle) Durchführung von In-

standhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen, dadurch eine

- gute Planbarkeit und mithin eine optimale Auslastung der eingesetzten Ressourcen,
- lange Produktlebenszyklen bei hoher Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit und im Ergebnis
- minimale Lebenszykluskosten.

1.2 Die Rolle des Schienenschleifens in der Gleisinstandhaltung

Steigende Fahrgeschwindigkeiten, zunehmende Radsatzlasten und wachsende Anforderungen an Qualität und Verfügbarkeit des Fahrwegs haben Anfang der 1950er Jahre zu der Entwicklung gleisfahrender Schienenschleifmaschinen geführt [1]. Im Vordergrund stand dabei zunächst die Beseitigung von Riffeln zur Reduzierung der Oberbaubeanspruchung und Verlängerung der Schienenliegedauer sowie zur Gewährleistung eines angemessenen Fahrkomforts. Die Erfolge des Schienenschleifens haben bereits 1954 dazu geführt, dass wichtige Hauptstrecken regelmäßig durchgehend von Schleifzügen befahren wurden [2].

Nach mehr als fünfzigjähriger Erfahrung besteht unter Technikern Konsens, dass durch maschinelles Schienenschleifen

- die Liegedauer der Schienen im Gleis verlängert,
- die Durcharbeitungszyklen des Gleises verlängert,
- die Laufruhe der Fahrzeuge verbessert und
- die Lärmentwicklung vermindert werden kann.

In der Instandhaltungspraxis stellt sich immer wieder die Frage nach der richtigen Schleifstrategie. Die dauerhafte Implementierung zielgerichteter Schleifstrategien wird vielfach dadurch erschwert, dass der monetäre Nutzen des Schienenschleifens nicht oder nur unzureichend quantifiziert werden kann. Insbesondere können die mit der Instandhaltungsdurchführung betrauten Mitarbeiter gegenüber dem Management oft nicht belegen, in welchem Maß das Schienenschleifen den Abnutzungsvorrat des Oberbaus beeinflusst. Das Problem lässt sich auf die Kernfrage reduzieren, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Maß sich Investitionen in vermehrtes Schienenschleifen durch reduzierten Instandhaltungs- und Erneuerungsaufwand auszahlen.

Die Praxis beweist, dass reduzierter Schleifaufwand die Funktionsfähigkeit des Gleises kurzfristig nicht einschränkt. Die Häufigkeit des Schienenschleifens ist deshalb heute nicht selten eine Frage der verfügbaren Instandhaltungsbudgets.

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit alternativer Schleifstrategien erfordert eine langfristige Betrachtung, bei der die Kosten des Schleifens dem langfristigen Nutzen gegenübergestellt werden. Ein geeignetes Instrumentarium zur Bewertung von Instandhaltungsstrategien langlebiger Systeme ist die Berechnung der Lebenszykluskosten (Life-Cycle-Cost – LCC).

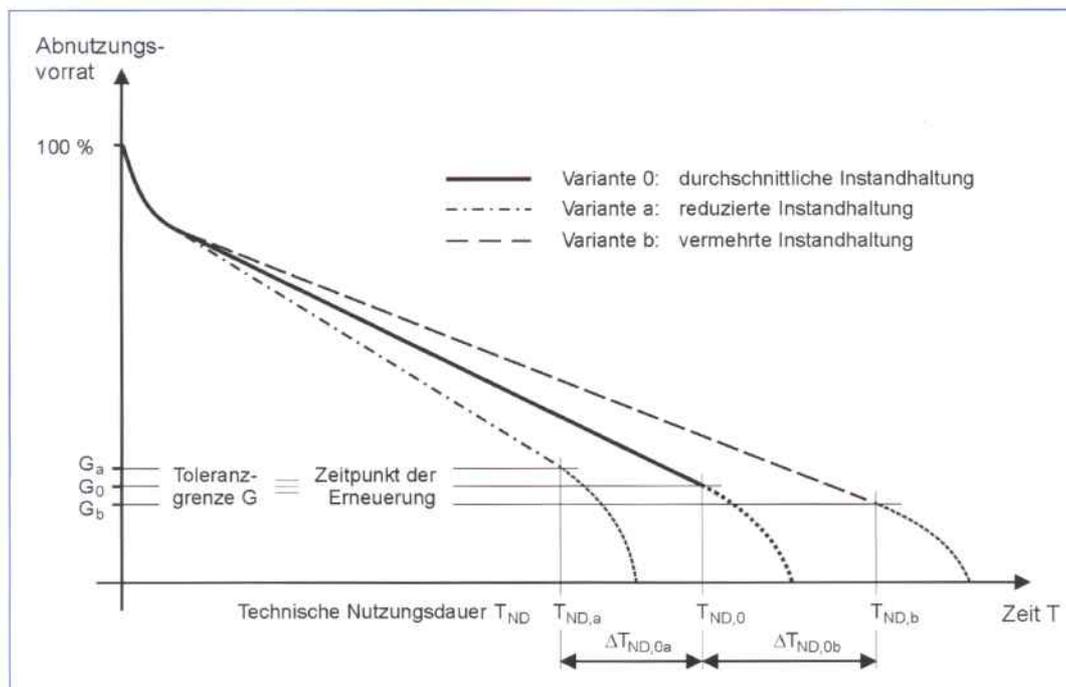


Bild 1: Verlauf des Abnutzungsvorrats technischer Anlagen, Einfluss der Instandhaltung

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die vielfältigen Einsatzfelder des Schienenschleifens dargestellt. Mit Hilfe einer LCC-Betrachtung wird der Nutzen zyklischen Schienenschleifens im Rahmen der Instandhaltung grundsätzlich nachgewiesen. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für technisch-wirtschaftlich optimale Schleifstrategien abgeleitet und Optimierungspotenziale aufgezeigt.

2. Einsatzfelder des Schienenschleifens

2.1 Neuschienenschleifen

Ziel des Neuschienenschleifens ist

- die Beseitigung der im Herstellungsprozess der Schiene entstandenen kohlenstoffarmen Randschicht,
- die Herstellung eines gleichmäßigen Schienenkopfquerprofils unter Berücksichtigung der Einbausituation der Schiene und
- die Beseitigung von Fahrflächenschäden aus dem Baustellenbetrieb.

Bei der kohlenstoffarmen Randschicht handelt es sich um eine in der Praxis etwa 0,15 bis 0,30 mm starke Zone, die beim

Erhitzen des Vorblocks auf Walztemperatur durch Oxidation des oberflächennahen Kohlenstoffes entsteht. Praxiserfahrungen belegen, dass durch Beseitigung der kohlenstoffarmen Randschicht die Riffelbildung der Schiene verzögert werden kann (Bild 2).

Mit der Herstellung eines gleichmäßigen Schienenkopfquerprofils entsprechend der Sollgeometrie werden baustellenbedingte Unterschiede in der Schienenneigung, insbesondere im Bereich von Verbindungsschweißungen, ausgeglichen. Ein optimales und gleichbleibendes Querprofil ist die Voraussetzung für einen homogenen Fahrzeuglauf und eine optimale Berührgeometrie von Rad und Schiene.

Beschädigungen der Fahrfläche aus dem Baustellenbetrieb, wie z. B. Schottersteinindrücke, stellen Initialschädigungen dar, die für ein optimales Langzeitverhalten der Schiene beseitigt werden müssen.

2.2 Fahrflächenunebenheiten

Fahrflächenunebenheiten sind periodische Unebenheiten des Schienenkopflängsprofils mit typischen Wellenlängen von 1 bis 30 cm, die unter der dynamischen Ein-

wirkung des Rad/Schiene-Kontakts durch Werkstoffumwandlung und Verschleiß entstehen.

Unterschieden werden

- Riffel mit Wellenlängen von 1 bis 10 cm und
- Schlupfwellen mit Wellenlängen von 3 bis 30 cm.

Fahrflächenunebenheiten schränken die Funktionsfähigkeit der Schiene als Fahrbahn und als Träger nicht ein. Sie erhöhen jedoch die dynamische Beanspruchung von Fahrzeug und Fahrweg. Die resultierende Schwingungsbeanspruchung führt zu einer beschleunigten Schädigung von Schiene, Schienenbefestigung, Schwelle und Schotter und erhöht den Instandsetzungsaufwand. Fahrflächenunebenheiten mindern den Fahrkomfort. Sie erhöhen die Lärm- und Erschütterungsemission und mindern so die Akzeptanz des Schienenverkehrs bei Kunden und Anliegern.

Zur Verdeutlichung der Auswirkungen von Fahrflächenunebenheiten auf die Komponentenbeanspruchung kann ein starrer Radsatz betrachtet werden, der entlang einer sinusförmigen Oberfläche mit Wellenlänge L und Wellentiefe $2a$ bewegt wird. Die maximale Vertikalbeschleunigung des Radsatzes ergibt sich dann als Funktion der Geschwindigkeit v zu:

$$\ddot{z}(v) = a \cdot \left(\frac{2\pi}{L} \cdot v \right)^2 \quad (1)$$

Wird unterstellt, dass wenigstens die unabgefederten Massen eines Fahrzeuges – dies sind in der Regel die Radsätze und ihre Anbauteile – den Beschleunigungen voll ausgesetzt sind, können die Auswirkungen von Fahrflächenunebenheiten auf die Oberbaubeanspruchung näherungsweise abgeschätzt werden. Für die typische Situation eines Reisezugwagens in einem schlupfwellenbehafteten Gleisbogen ($L = 25$ cm, $2a = 0,2$ mm) ergibt sich bei einer Radlast von 5 t (davon ca. 15 % ohne Primärfederung) und einer

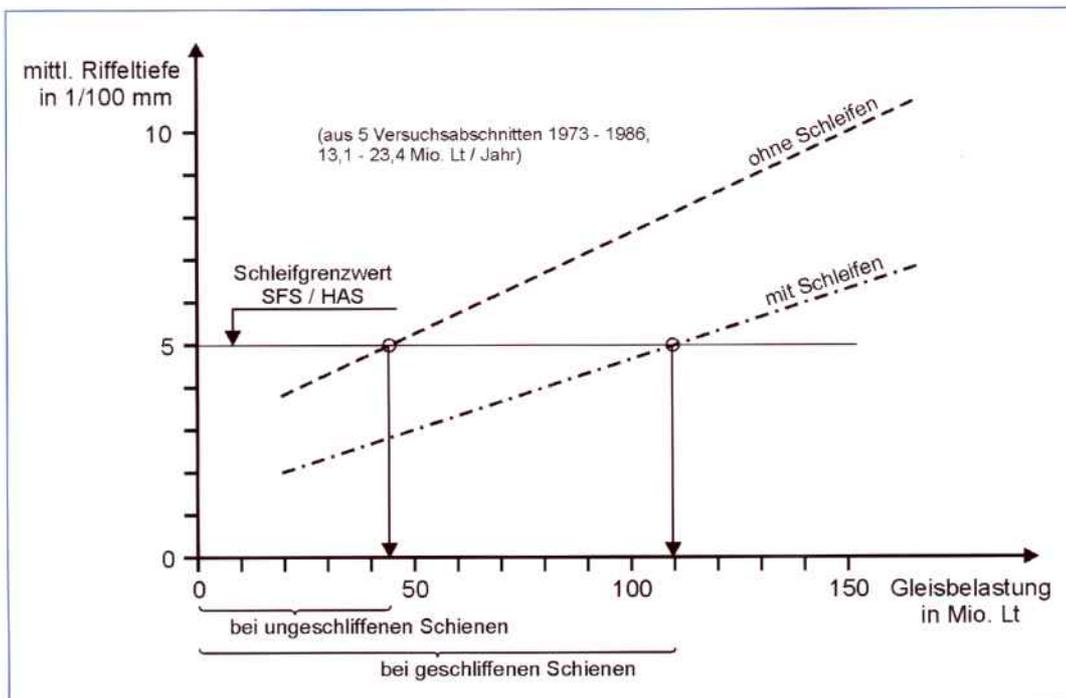


Bild 2: Belastungssumme beim ersten Riffelschleifen mit und ohne vorheriges Neuschienenschleifen [3]

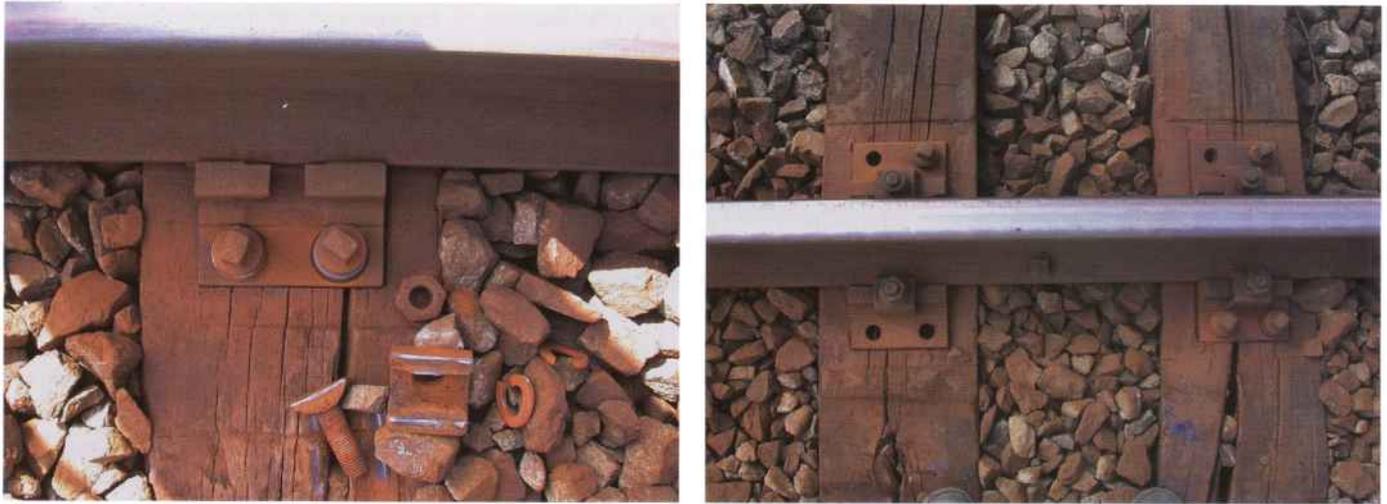


Bild 3: Lockerung und Zerstörung von Befestigungsmitteln durch Riffel bei K-Oberbau

Geschwindigkeit von 80 km/h eine Radkraftherhöhung um 47 %.

Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist die dynamische Radkraft in vertikaler Lastrichtung für die Änderung der Gleislagequalität ausschlaggebend. Henn hat gezeigt, dass dabei zwischen der Schotterpressung und der Verschlechterung der Gleislagequalität ein exponentieller Zusammenhang besteht [4]. Eine Erhöhung der Schotterpressung um 47 % entspricht bei Ansatz der zweiten Potenz einer mehr als doppelt (2,16-fach) so schnellen Verschlechterung der Gleislagequalität, entsprechend einer Halbierung der Instandsetzungszyklen.

Wenngleich die exakte Berechnung dynamischer Beanspruchungsgrößen – vor allem im höherfrequenten Belastungsspektrum

– dynamische Rechenmodelle erfordert (vgl. z. B. [5]), so kann die grundsätzliche Wirkung von Fahrflächenunebenheiten mit dem dargelegten Ansatz doch nachvollziehbar veranschaulicht werden. Insbesondere wird deutlich, dass Riffel (kleine Wellenlänge L) besonders bei hohen Geschwindigkeiten (große v) zu einer extremen Beanspruchung von Rad und Schiene führen. Die Folge sind Ermüdungsrisse des oberflächennahen Werkstoffes (siehe 2.3) und zerstörte Befestigungsmittel (Bild 3).

2.3 Rollkontaktermüdung

Bei der Rollkontaktermüdung handelt es sich um ein Dauerfestigkeitsversagen des

Schienenwerkstoffes im Rad/Schiene-Kontaktgebiet. Seit der Materialverschleiß und die Gestaltfestigkeit der Schiene als Träger für die Nutzungsdauer der Schiene nur noch eine untergeordnete Rolle spielen, entwickelt sich die Rollkontaktermüdung zu einem zunehmenden Problem. Schultheiß berichtet bereits 1984 von Anrissen an der Fahrkante bogenäußerer Schienen und prognostiziert, dass diese Schäden um so häufiger auftreten werden, je öfter von den Triebfahrzeugen Zugkräfte bis an die Grenze der Haftreibung gefordert werden [6]. 1990 ist im Netz der Deutschen Bundesbahn bereits in 30 % aller gemeldeten Schienenschäden Rollkontaktermüdung die Ursache [7]. Ende der 90er Jahre sind es in Japan (JR East) bereits 60 % [8].

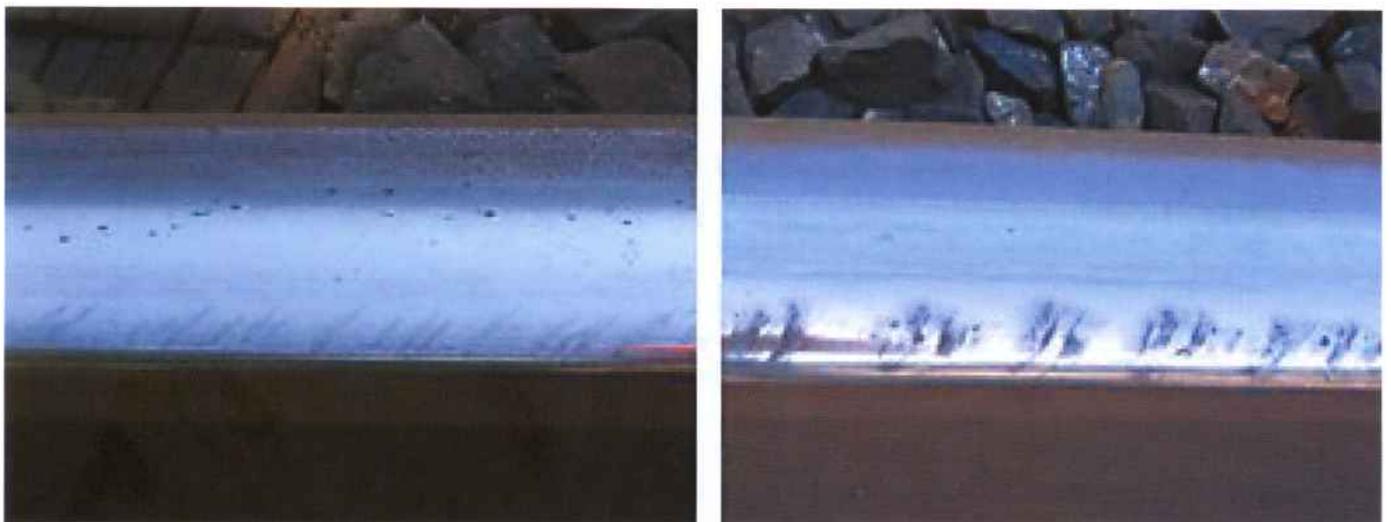


Bild 4: Head Checks im Anfangsstadium (links) und bei beginnenden Materialausbrüchen (rechts)

Am weitesten verbreitet sind die schwerpunktmäßig im Oberstrang von Bögen mit 300 bis 3000 m Radius auftretenden Head Checks (Bild 4). Die hohe Kontaktspannung an der Fahrkante und die hohe Reibwertausnutzung im Bogen führen zu wiederholt plastischen Deformationen des oberflächennahen Materials, in deren Folge die Schienenfahrfläche schließlich aufreißt. Die Oberflächenrisse wachsen unter flachem Winkel in die Tiefe, ehe sie vertikal verzweigen und schließlich einen Querbruch der Schiene herbeiführen [9].

1996 wurde auf den Schnellfahrstrecken der DB AG eine neue Form der Rollkontaktermüdung gefunden, die in Anlehnung an die Namen ihrer Entdecker als „Belgrospi“ bezeichnet wird. Belgrospis sind periodisch auftretende Rissnester, die gemeinsam mit einer leichten Verriffelung auftreten. Die Oberflächenrisse treten an den Riffelbergen zwischen der Schienenkopfmittle und der Fahrkante auf und entwickeln sich unter flachem Winkel in das Werkstoffinnere. Bei unterlassener Beseitigung können sie durch vertikale Verzweigungen analog den Head Checks zu einem Querbruch der Schiene führen [10].

Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle auch Squats erwähnt, die ebenfalls eine Folge von Rollkontaktermüdung sind. Squats sind singuläre und nicht systematisch vorkommende Fahrflächenschäden, die als vorwiegend zur Fahrkante geöffnete halbkreisförmige Risse an der Oberfläche in geraden oder fast geraden Gleisen sichtbar werden. Die Risse wachsen unter flachem Winkel in den Werkstoff hinein. Analog den Head Checks und Belgrospis können auch Squats in einen senkrechten Dauerbruch umschlagen.

Mit der Verbreitung der Rollkontaktermüdung hat das Schienenschleifen in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Ein zyklischer Abtrag des ermüdeten Materials und eine Wiederherstellung der Sollgeometrie der Schiene durch profilierendes Schleifen ist zurzeit die einzige Möglichkeit, Entstehung und Wachstum von Ermüdungsrissen zu kontrollieren.

Internationale Erfahrungen zeigen, dass die Schienenliegedauer durch den zyklischen Abtrag ermüdeten Materials deutlich verlängert werden kann. Nach Versuchen des Railway Technical Research Institute

(RTRI) in Japan reduziert schon ein Materialabtrag von 0,1 mm je 50 Mio. Lt das Auftreten von Rollkontaktermüdung um 50% [11]. Cannon Et Al. berichten von Erfahrungen der Burlington Northern Santa Fe (BNSF) Railway, nach denen die Schienenliegedauer in Bögen mit Radien > 1000 m durch präventives Schleifen jeweils nach 15 bis 40 Mio. Lt (Leistungstonnen) von 300 bis 600 Mio. Lt auf über 1000 Mio. Lt verlängert werden konnte [8].

2.4 Sollgeometrie des Schienenkopfquerprofils

Mit profilierenden Schleifverfahren können abgeflachte Schienenköpfe reprofiliert und Fahrkantengrater beseitigt werden.

Die Geometrie des Schienenkopfquerprofils beeinflusst die Berührgeometrie des Rad/Schiene-Kontaktes und wirkt sich neben der Materialbeanspruchung insbesondere bei verschleißoptimierten Rad/Schiene-Profilpaarungen auf die geometrische Selbstzentrierung des Radsatzes aus. Im Grenzfall können durch Querprofilabweichungen des Schienenkopfes instabile Laufzustände entstehen, die eine Herabsetzung der örtlich zulässigen Fahrgeschwindigkeit erfordern.

2.5 Sonderprofile

Die individuelle Steuerung der Winkelstellung rotierender Schleifscheiben macht es möglich, beliebige Querprofilformen und stetige Übergänge zwischen benachbarten Profilformen im Gleis herzustellen. Wegen der von der symmetrischen Profilform walzweurer Schienen abweichenden Querschnittsgeometrie wird die Herstellung von Sonderprofilen auch als asymmetrisches Schleifen bezeichnet.

Die Einsatzfelder asymmetrischer Sonderprofile können in vier Anwendungsfälle unterschieden werden [12]:

- Reduzierung des Seitenverschleißes im Oberstrang enger Bögen.
Berührungspunktverlagerung an die Fahrkante des Oberstranges, dadurch Vergrößerung der Rollradiendifferenz und Verbesserung der geometrischen Radsatzführung.

- Vorbeugung von Rollkontaktermüdung.
Unterschleifen der Sollgeometrie an der Fahrkante, dadurch Berührungspunktverlagerung weg vom ermüdungsgefährdeten Kontaktbereich hin zur Schienenkopfmittle.
- Herstellung von Sonderprofilen zur Aufweitung von Spurverengungen.
Aufweitung von Spurverengungen durch Verschiebung des Zielprofils nach außen.
- Verbesserung des Fahrzeuglaufs im Hochgeschwindigkeitsverkehr.
Beeinflussung der äquivalenten Konizität durch gezielte Profilgebung.

2.6 Besonders überwachtes Gleis (BüG)

Das „Besonders überwachte Gleis“ (BüG) ist eine Anwendung der präventiven Schienepflege zur Begrenzung der Lärmemission des Schienenverkehrs. Durch eine besondere Überwachung des Schienenzustands sollen Lärm verursachende Riffel frühzeitig erkannt und rechtzeitig beseitigt werden.

Die Verpflichtung des Infrastrukturbetreibers zur besonderen Überwachung eines Gleisabschnitts ermöglicht die Reduzierung der rechnerisch ermittelten Schallemission des Schienenverkehrs um 3 dB(A). Das BüG ist damit eine aktive Lärmschutzmaßnahme, die zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte nach der Verkehrslärmschutzverordnung angewendet wird und im Grenzfall einen Verzicht auf bauliche Lärmschutzmaßnahmen ermöglicht. Neben Aus- und Neubaumaßnahmen kommt das Verfahren BüG auch im Zuge der Lärmsanierung zur Anwendung. In Deutschland stehen gegenwärtig etwa 1000 Streckenkilometer unter besonderer Überwachung. Die Überprüfung des Fahrflächenzustands erfolgt in halbjährlichen Abständen mit einem eigens konzipierten Schallmesswagen [13].

2.7 Integrierte Instandhaltung

Als Integrierte Instandhaltung wird die gemeinsame Durchführung von Gleisdurchar-

beitung und Schienenschleifen bezeichnet [14]. Dabei ist anzustreben, das Schienenschleifen unmittelbar nach der Ausrichtung und Stabilisierung des Gleisrostes – nach Möglichkeit in derselben Sperrpause – durchzuführen. Durch die Beseitigung von Fahrflächenunebenheiten und die Wiederherstellung des Soll-Querprofils wird die Beanspruchung des Oberbaus reduziert und eine Verbesserung der Nachhaltigkeit der Gleisdurcharbeitung erzielt. Die Durchführung in einer gemeinsamen Sperrpause reduziert zugleich die Planungskosten, die Durchführungskosten (einmaliger Ausbau von Gleisschaltmitteln) und die Betriebser-schwerniskosten.

3. Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens

3.1 Anwendung der LCC-Methode

Die LCC-Methode ist ein ganzheitlicher Ansatz der Kostenbewertung für langlebige Systeme. Je nach Fragestellung können dabei entweder sämtliche Kosten über den Lebenszyklus oder nur einzelne Kostenblöcke in definierten Lebenszyklusphasen betrachtet werden. Bei der LCC-Bewertung alternativer Instandhaltungsstrategien kann der Berechnungsaufwand erheblich reduziert werden, wenn nur diejenigen Kostenblöcke betrachtet werden, die durch die jeweilige Handlungsweise mittelbar oder unmittelbar beeinflusst werden (Differenz-LCC). Um die Auswirkungen unterschiedlicher Zeitpunkte von Zahlungsströmen im Lebenszyklus zu berücksichtigen, wird für die Zahlungen jeder Jahresscheibe der Barwert berechnet. Der Barwert beschreibt den heutigen Geldwert einer zukünftigen Zahlung. Durch die Berechnung des Barwerts wird berücksichtigt, dass der Geldwert über die Zeit veränderlich ist. Die LCC ergeben sich als Summe der Barwerte über den Betrachtungszeitraum (Bild 5). Die Schwierigkeit der LCC-Analyse besteht in der Prognose des Langzeitverhaltens der betrachteten Anlage unter der umgebenden Beanspruchung und in der Ableitung der Maßnahmenzyklen. Für die grundsätzliche Bewertung alternativer Instandhaltungsstrategien sind makroskopische Schadensfunktionen hinrei-

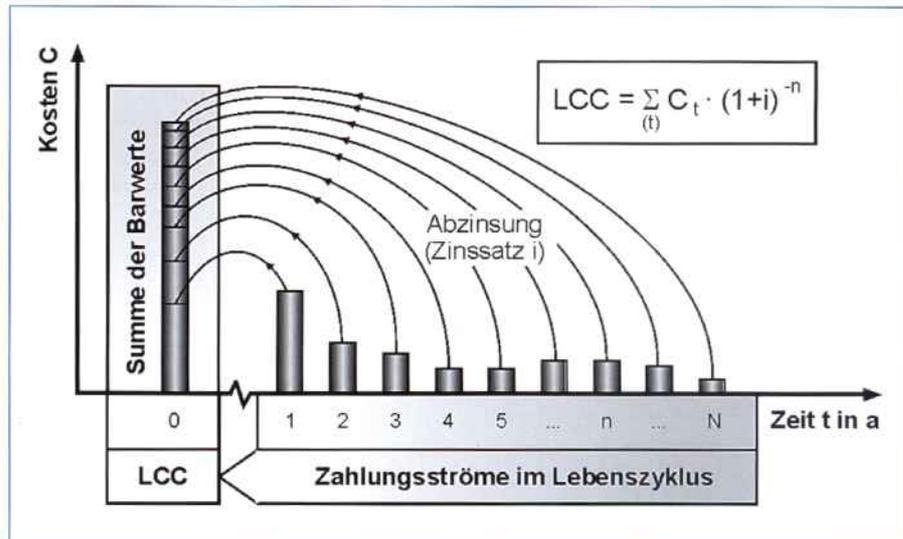


Bild 5: Berechnung von Lebenszykluskosten

chend, mit denen das Langzeitverhalten des Oberbaus im Mittel richtig beschrieben wird. Auf Basis umfangreicher Datenanalysen, Literaturrecherchen und Expertenbefragungen wurden an der Leibniz Universität Hannover empirische Schadensfunktionen entwickelt und in einem LCC-Modell hinterlegt. Kern des EDV-gestützten Modells ist die Abbildung von Infrastruktur und Betrieb in einem dynamischen Netzgraphen und die streckenbezogene Prognose notwendiger Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen am Oberbau. Zur Bestimmung der Zahlungsströme wurde ein Kostenkatalog entwickelt, der neben den Kosten der Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen auch die Kosten baustellenbedingter Betriebser-schwernisse für ausgewählte Streckenstandards berücksichtigt [15].

3.2 Wirtschaftlichkeit der Beseitigung von Fahrflächenunebenheiten

Mit dem bereitgestellten LCC-Modell kann die Wirtschaftlichkeit der Beseitigung von Fahrflächenunebenheiten durch zyklisches Schleifen nachgewiesen werden. In dem folgenden Anwendungsbeispiel wird die Wirtschaftlichkeit der Schlupfwellenbeseitigung betrachtet. Dazu werden in EDV-gestützten Modellrechnungen die lokalen Schotterpressungen in Abhängigkeit der örtlichen Infrastruktur- und Belastungs-

parameter berechnet und unter Berücksichtigung des Potenzgesetzes der Gleisla-geverschlechterung kumuliert. Ausgehend von einem Referenzzyklus der Gleisdurch-arbeitung (Dua) wird die Verkürzung der Dua-Zyklen infolge Schlupfwellen prog-nostiziert.

Bild 6 zeigt für Schleifzyklen von ein bis fünf Jahren die resultierenden Durch-arbeitungszyklen und LCC am Beispiel eines Schlupfwellen behafteten Gleisbogens (R = 450 m). Die mittlere Wachstumsra-te der Schlupfwellen ist mit 0,02 mm / 10 Mio. Lt gegeben (vereinfachte Annah-me eines linearen Wachstums). Zur Ab-bildung eines Belastungsfahrplanes wurde der Streckenstandard G120 nach DB Ril. 413.0301 zugrunde gelegt. Bei Annahme modellhafter Zuggattungen ergibt sich für die Obergrenze der Betriebsbelastung eine Summe von 23 Mio. Lt/a [15]. Der Durch-arbeitungszyklus eines Oberbaus mit ideal ebener Fahrfläche wurde zu sechs Jahren vorgegeben (Referenzzyklus).

Die Kosten des Schienenschleifens wur-den in Abhängigkeit des Materialabtrags zwischen 4,40 und 5,05 EUR/m angesetzt. Für die Durcharbeitung des Gleisbogens wurde ein theoretischer Kostensatz von 28,14 EUR/m (inkl. Vorarbeiten und Ma-terialkosten) ermittelt [15].

Die Lebenszykluskosten wurden in Annu-itäten, d. h. betragsgleiche Jahreszahlun-gen über den Betrachtungszeitraum (hier 50 Jahre) ausgewiesen. Den Berechnungen wurden ein kalkulatorischer Zinssatz von

8 % und eine jährliche Preissteigerung von 2 % zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse weisen die Wirtschaftlichkeit der Beseitigung von Schienenwelligkeiten durch zyklisches Schleifen nach. Im Beispiel bewirkt die Verkürzung des Schleifintervalls von vier Jahren auf zwei Jahre eine Kostenersparnis von 7,35 EUR/(m · a). Die Berücksichtigung von Betriebsschwerniskosten (BEK) erhöht die Wirtschaftlichkeit weiter. Für die Modellstrecke nach dem betrieblichen Ausrüstungsstandard G120 und Betriebsschwerniskosten

lisierbare Schienenliegedauer damit 1 400 Mio. Lt.

In der Praxis wird die Schienenliegedauer des Oberstrangs in Bögen mit Radien zwischen 300 und 3 000 m durch Head Checks begrenzt. Die Wachstumsfunktion von Head Checks hängt von dem Spannungszustand im Schienenkopf und den Materialeigenschaften in der Rissumgebung ab. Aufgrund der vielfältigen, sich überlagernden und im Detail unbekanntem Einflussparameter kann das tatsächliche Risswachstum nicht prognostiziert wer-

liegedauer verlängert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der künstliche Verschleiß infolge Schleifens gleichsam negativ auf den Abnutzungsvorrat der Schiene auswirkt. Bei einem Schleifintervall von 60 Mio. Lt (entsprechend alle drei Jahre) und einer zulässigen Höhenabnutzung von 14 mm kann die Schienenliegedauer jedoch auf 800 Mio. Lt (entsprechend 40 Jahre) gesteigert werden (Bild 7).

Das progressive Risswachstum hat zur Folge, dass die theoretische Schienenliegedauer umso größer wird, je häufiger geschlif-

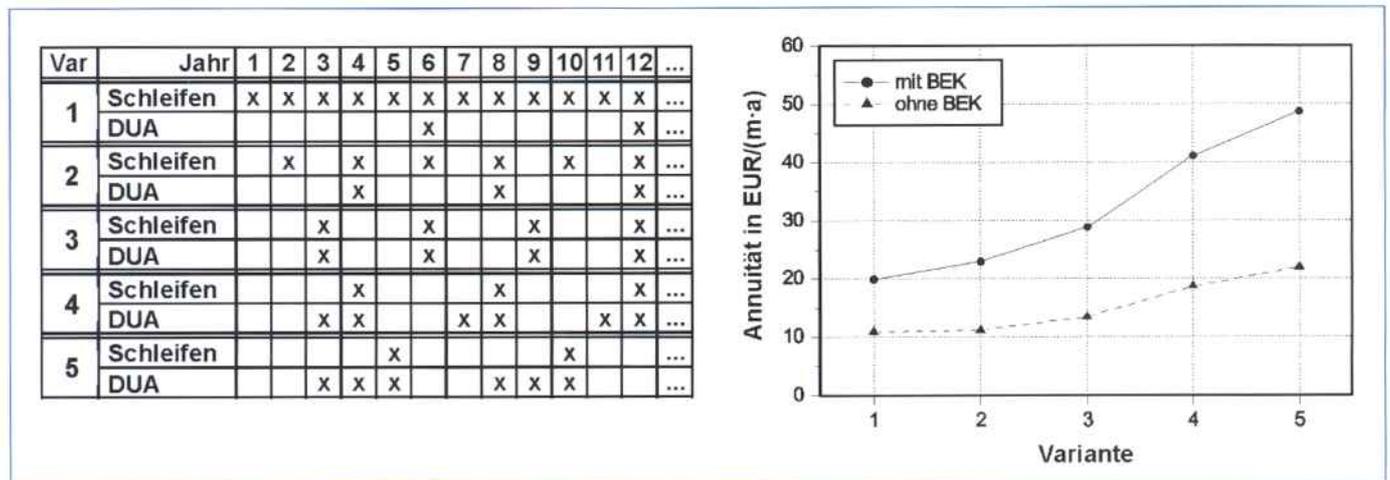


Bild 6: Zusammenhang zwischen Durcharbeitung und Schleifen und resultierende LCC

in Höhe von 15 EUR je Verspätungsminute im Personennahverkehr bzw. 50 EUR/min im Güterverkehr erhöht sich die Kostenersparnis um zusätzliche 10,74 EUR/(m · a).

3.3 Wirtschaftlichkeit der Beseitigung von Rollkontaktermüdung

Um den Nutzen der Beseitigung von Rollkontaktermüdung durch zyklisches Schleifen zu bewerten, wird ein Gleisbogen mit Head Check-Bildung im Oberstrang betrachtet. Bei einem Radius > 1 000 m kann Seitenverschleiß vernachlässigt werden. Für Ober- und Unterstrang kann konservativ ein Höhenverschleiß von 1,0 mm je 100 Mio. Lt angenommen werden. Bei einer zulässigen Höhenabnutzung von 14 mm (DB-Grenzwert für UIC 60 bis 160 km/h) beträgt die maximal rea-

den. Für die hier durchgeführte Beispielrechnung soll in Anlehnung an praktische Erfahrungen ein exponentielles Wachstum als Funktion der Betriebsbelastung unterstellt werden. Die zulässige Schädigungstiefe wird mit 2,7 mm vorgegeben. Dabei handelt es sich um die größte, mit dem Wirbelstromprüfverfahren der DB AG detektierbare Schädigungstiefe. Bei größeren Tiefen kann die Rissentwicklung nicht mehr überwacht werden, so dass ein bevorstehender Schienenbruch unter Umständen nicht mehr rechtzeitig detektiert werden könnte.

In der Modellrechnung wird für eine typische Hauptstrecke von einer Betriebsbelastung von 20 Mio. Lt/a ausgegangen. Das Erreichen der zulässigen Schädigungstiefe ohne Schleifen wird exemplarisch nach 140 Mio. Lt (entsprechend sieben Jahren) angenommen. Durch einen zyklischen Abtrag ermüdeten Materials können das Risswachstum kontrolliert und die Schienen-

fen wird. Voraussetzung dabei ist jedoch, dass nur so viel Material abgetragen wird, wie zur vollständigen Fehlerbeseitigung nötig!

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden die Schleifkosten den Kosten der Schienenerneuerung in einer LCC-Rechnung gegenüber gestellt. Bild 8 zeigt die Entwicklung des Barwertes über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren. Nach linearer Abschreibung verbleibende Restwerte wurden am Ende des Betrachtungszeitraums gutgeschrieben. Betrachtet wurden drei Varianten:

- Var. 0: kein Schleifen
- Var. 1: Schleifen alle 60 Mio. Lt (alle 3 a), Schleifkosten 5,05 EUR/m
- Var. 2: Schleifen alle 120 Mio. Lt (alle 6 a), Schleifkosten 13,82 EUR/m

Für die Schienenerneuerung wurden Kosten in Höhe von 100,52 EUR/m für die Erneuerung eines Strangs und 149,26 EUR/m für die Erneuerung beider Stränge ange-

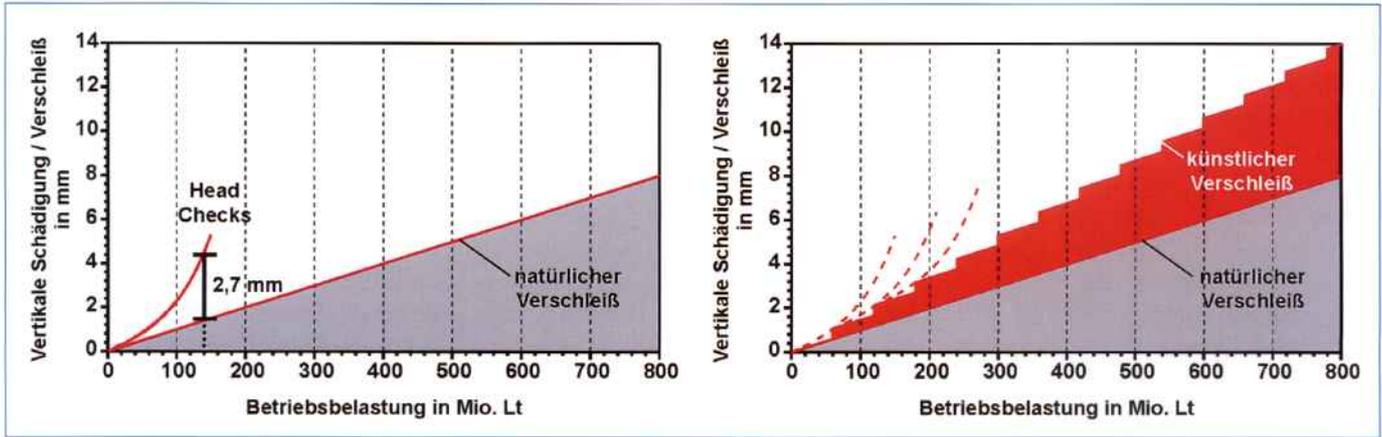


Bild 7: Kontrolle von Ermüdungsrissen durch zyklisches Schienenschleifen

setzt. Für die Innenschiene wurde in Var. 0 eine Liegedauer von 25 Jahren angenommen. Bei zyklischem Schleifen wurde von einer gleichzeitigen Erneuerung von Innen- und Außenschiene ausgegangen. Die LCC-Analyse weist die Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens nach. Schon durch Schleifen alle sechs Jahre kann die Schienenliegedauer auf 27 Jahre verlängert werden. Ausgaben für das Schleifen in Höhe von 2,55 EUR/(m · a) stehen Einsparungen von 12,25 EUR/(m · a) (Annuität) gegenüber. Durch Schleifen alle drei Jahre verlängert sich die Schienenliegedauer auf 40 Jahre. Bei etwa gleichen Jahreskosten für das Schleifen ergibt sich ein zusätzliches Einsparpotenzial von 2,29 EUR/(m · a). Die Schienenliegedauer von 40 Jahren entspricht darüber hinaus der prognostizierten Liegedauer von Betonschwellen, so dass auf eine getrennte Erneuerung

von Schienen und Schwellen/Schotter verzichtet werden kann. Bemerkenswert ist, dass die Entwicklung des Barwerts der Var. 1 und 2 in den ersten Jahren nahezu gleich verläuft. Dreijähriges Schleifen kostet in den ersten Jahren genau so viel wie sechsjähriges Schleifen. Durch die Verlängerung der Schienenliegedauer ist dreijähriges Schleifen jedoch deutlich wirtschaftlicher. Um das optimale Schleifintervall zu identifizieren, werden für eine Bandbreite verschiedener Head Check-Wachstumsfunktionen die Annuitäten von Schienenerneuerung und Schleifen berechnet. Es werden drei Varianten betrachtet, in denen der Schädigungshöchstwert von 2,7 mm nach 90 Mio. Lt (Var. 1), nach 135 Mio. Lt (Var. 2) und nach 180 Mio. Lt (Var. 3) erreicht wird. Bei einer Betriebsbelastung von 20 Mio. Lt/a sind Schleifzyklen von fünf,

sieben bzw. neun Jahren damit nicht mehr ausreichend, um eine Schienenerneuerung zu verhindern. Die Darstellung der Ergebnisse in Bild 9 verdeutlicht nochmals die hohe Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens. Jede Schleifstrategie – mit welchem Zyklus auch immer – ist besser, als nichts zu tun. Das Optimum der Wirtschaftlichkeit wird unter den gegebenen Bedingungen für Schleifzyklen zwischen 40 und 80 Mio. Lt erreicht. Häufigeres Schleifen erhöht die Wirtschaftlichkeit nicht. Insbesondere bei jährlichem Schleifen sind Einsparungen aus verlängerter Schienenliegedauer nicht mehr geeignet, die hohen Schleifkosten aufzuwiegen. Das Einbeziehen von Betriebserschwerungskosten in die Betrachtung hat keine Auswirkungen auf die optimalen Schleifintervalle. Aufgrund der hohen BEK der Schienenerneuerung wird die Wirtschaftlichkeit des Schleifens jedoch weiter erhöht.

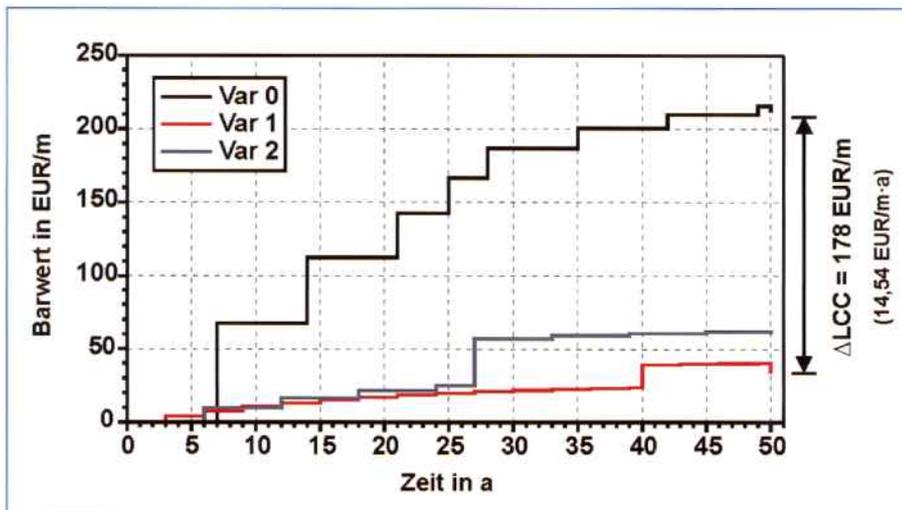


Bild 8: Barwertentwicklung der Varianten über die Zeit (Kalkulationszins 8 %, Inflationsrate 2%/a)

4. Technisch-wirtschaftliche Schleifstrategien

4.1 Optimaler Schleifzyklus

Die vorgestellten Berechnungsbeispiele haben gezeigt, dass der optimale Schleifzyklus von der Fehlerart, dem Fehlerwachstum, den Kosten der Fehlervermeidung und den Kosten der Fehlerbeseitigung abhängig ist. So können ein hoher Schienenpreis und eine beschleunigte Ermüdungsrissbildung jährliches Schleifen durchaus wirtschaftlich machen.

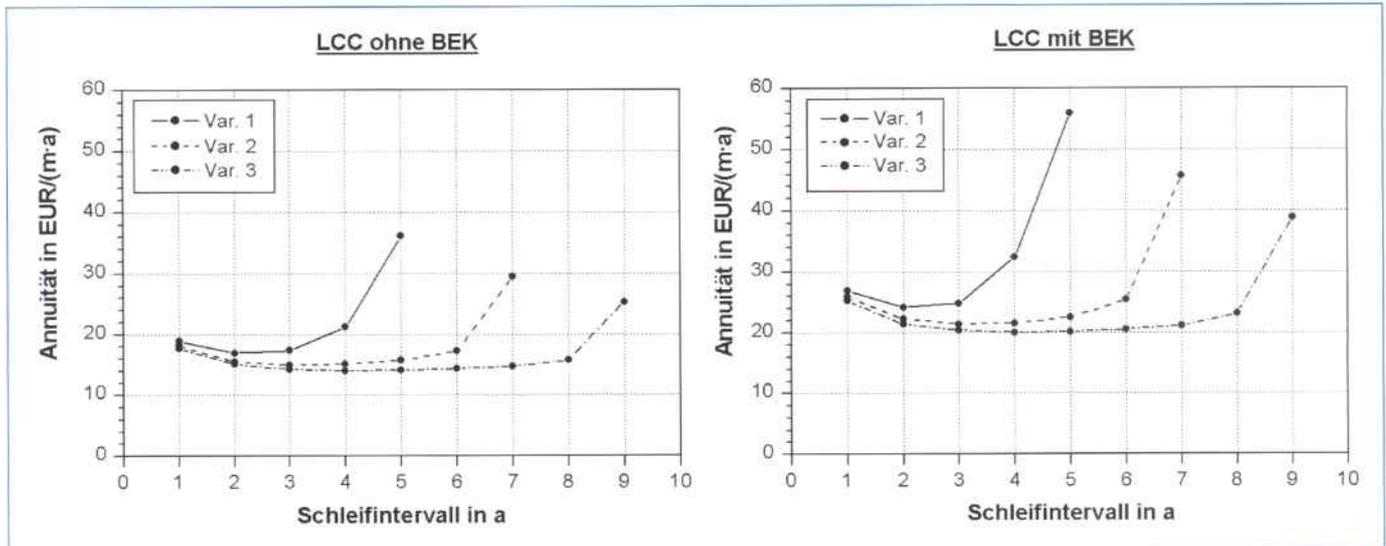


Bild 9: LCC für Schienenerneuerung und Schleifen in Abhängigkeit des Schleifintervalls ohne und mit BEK

Die Empfehlung optimaler Schleifzyklen kann nur Richtwerte aufzeigen, die in jedem Einzelfall an den gegebenen Randbedingungen zu spiegeln sind. Als Richtschnur für die Instandhaltungsplanung durchschnittlich beanspruchter Hauptstrecken ist in Bild 10 eine Bandbreite sinnvoller Schleifintervalle in Abhängigkeit des Radius und damit in Abhängigkeit der dominierenden Schadensbilder gegeben. Radien mit Schlupfwellen- und Head Check-Bildung sollten in Abhängigkeit ihrer Belastung zyklisch durchgehend geschliffen

werden. Für typische Bögen mit Rollkontaktermüdung ergeben sich optimale Eingreifintervalle zwischen 40 und 80 Mio. Lt. Für weite Bögen und gerade Gleise wird Schleifen nach Befund empfohlen, wobei die durchschnittlichen Interventionszyklen zwischen 80 und 120 Mio. Lt anzusiedeln sein dürften. Hochgeschwindigkeitsstrecken erfordern eine besondere Beachtung. Um Überbeanspruchungen der Schiene zu vermeiden, muss die Fahrfläche eine kontinuierliche Ebenheit aufweisen. Je nach Beanspru-

chung (Fahrzeugkonzept, Betriebsprogramm) werden Schleifzyklen zwischen 10 und 50 Mio. Lt empfohlen.

4.2 Stellhebel optimaler Schleifeinsatzplanung

Die hohen Vorhaltekosten und die große Spezialisierung haben zur Folge, dass Gleisbau-Großmaschinen am Markt nur zu Schichtpreisen angeboten werden. Da die Kosten weitgehend unabhängig von der erbrachten Leistung anfallen, ist es Aufgabe der Instandhaltungsplanung, eine höchstmögliche Produktivität der eingekauften Ressourcen sicherzustellen und so den Preis je Leistungsmeter zu minimieren.

Bild 11 zeigt die Zusammensetzung der Einsatzzeit (in der Regel eine Schicht mit acht bis zehn Stunden Dauer) beim Schienenschleifen. Die Produktionszeit (Zeit für Schleifen, Wenden, Messen, Reinigen) erreicht bei korrigierenden Schleifstrategien mit kurzen, über das Netz verteilten Arbeitsabschnitten international kaum mehr als 60 % der Ein-

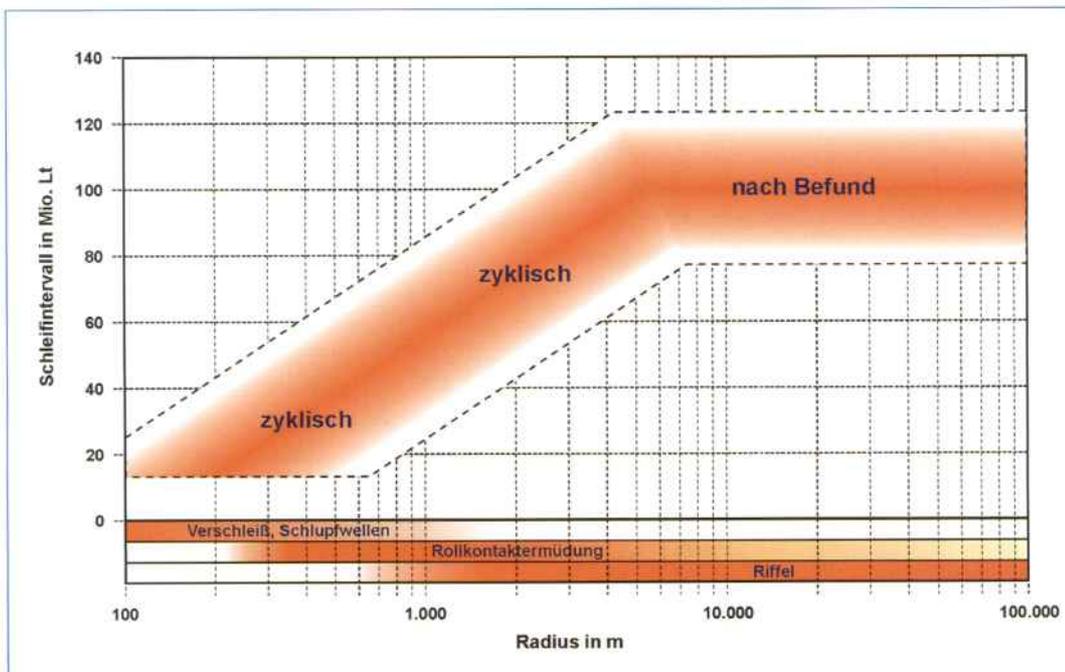


Bild 10: Empfehlung für technisch-wirtschaftlich optimale Schleifzyklen

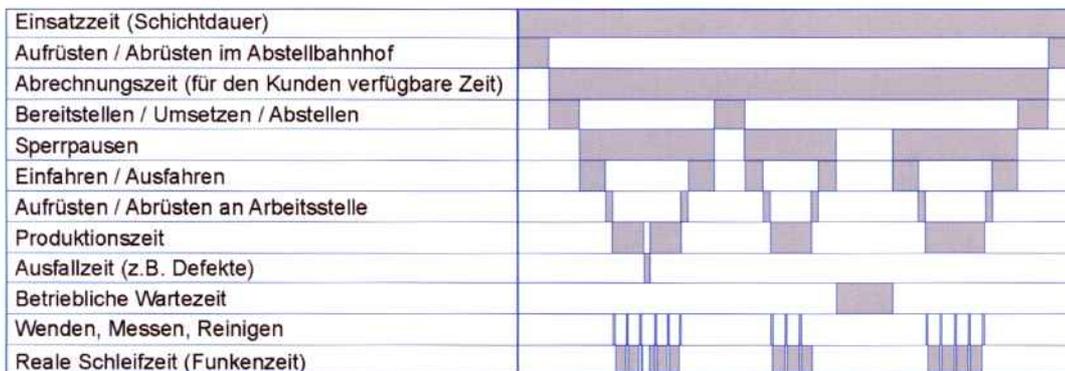


Bild 11: Zusammensetzung der Einsatzzeit beim Schienenschleifen

satzzeit. Die übrige Zeit wird mit Überführungen und Warten auf Sperrpausen verbracht. Bei Schichtkosten von rund 20000 bis 25000 EUR für das Schleifen kostet jede einzelne Minute 40 bis 50 EUR. Oberstes Ziel der Einsatzplanung muss es deshalb sein, dass die Maschine Leistung bringt. Stillstandszeiten sind bei derartigen Großmaschinen absolut intolerabel. Schleiffahrten werden in Abhängigkeit der Maschinenleistung und des erforderlichen Materialabtrags als Pendelfahrten durchgeführt. Die Länge der Arbeitsabschnitte wirkt sich durch das mehrmalige Ein- und Ausfahren der Maschine in den bzw. aus dem Arbeitsabschnitt und die Herstellung von Übergangsrampen besonders bei kleinen Abschnittslängen ungünstig auf die

Produktionsleistung aus. Bild 12 enthält eine Darstellung der erzielbaren Fertigmeter je Stunde in Abhängigkeit der Schleifabschnittslänge. Zur Berücksichtigung von Überführungsfahrten und Wartezeiten wurde für jeden Schleifabschnitt eine „Leerlaufzeit“ angenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine angemessene Maschinenauslastung für Abschnittslängen < 500 m praktisch nicht mehr gegeben ist. Insbesondere bei einer geringen Anzahl Überfahrten sollte die Abschnittslänge > 1000 m gewählt werden, um die Zahl der Leerfahrten zu begrenzen. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass durch eine ganzheitliche Einsatzplanung die Fahrzeiten zwischen benachbarten Arbeitsabschnitten so gering wie möglich gehalten werden.

Bei benachbarten Arbeitsabschnitten entlang einer Strecke ist zu hinterfragen, wann die Zwischenabschnitte zum Schleifen anstehen. Muss ein Gleisabschnitt zwischen zwei benachbarten Arbeitsabschnitten ohnehin ein Jahr später geschliffen werden, ist ein Durchschleifen möglicherweise wirtschaftlich sinnvoll. Kann der Abschnitt jedoch noch einige Jahre ohne Schleifen gehalten werden, kann sich die gesonderte Behandlung zu einem späteren Zeitpunkt lohnen.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurde eine LCC-Analyse durchgeführt, die den Zeitpunkt der Schleifwürdigkeit des Zwischenabschnitts berücksichtigt (Bild 13). Dabei wurden die Kosten des Durchschleifens (L1 + LZ + L2) zum Zeit-

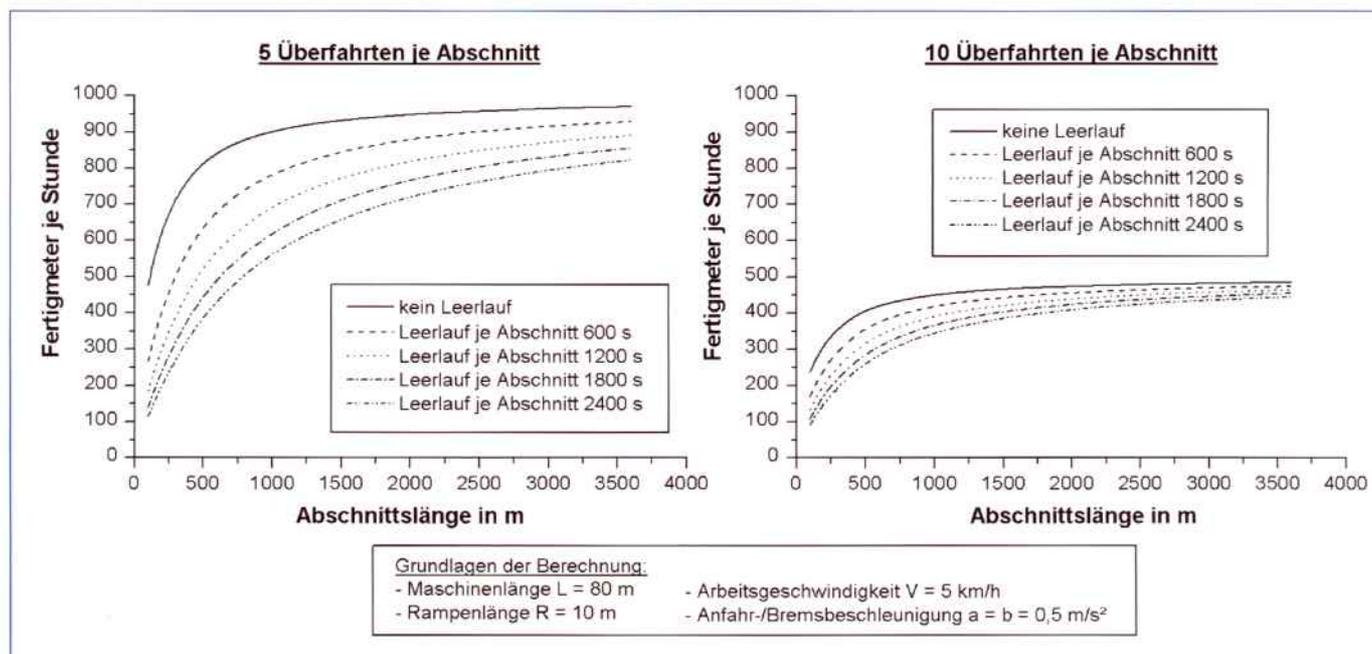


Bild 12: Produktionsleistung in Abhängigkeit der Arbeitsabschnittslänge bei fünf und zehn Überfahrten je Abschnitt

punkt $t=0$ („heute“) mit den Kosten des Schleifens von $L1 + L2$ bei $t=0$ („heute“) zuzüglich den Kosten zum Schleifen von LZ bei $t=n$ („nach n Jahren“) verglichen. Je später der Abschnitt LZ geschliffen werden kann, desto mehr wird der zunächst größere Arbeitsaufwand durch den Abzinsungseffekt der Barwertberechnung relativiert. Der Berechnung wurde ein Schichtpreis von 25000 EUR zugrunde gelegt. Weiterhin wurde von fünf Überfahrten je Arbeitsabschnitt ausgegangen. Aus Bild 13 kann die Grenze der Wirtschaftlichkeit des Durchschleifens in Abhängigkeit der Abschnittslänge LZ und der Maschinenlänge abgelesen werden. Dabei wird die Anzahl Jahre angegeben, die

Gleise mit Rollkontaktermüdung sowie enge Bögen mit Schlupfwellenbildung, sollten zyklisch geschliffen werden. So können Synergien in Planung und Maschinenauslastung gehoben werden und zugleich eine LCC-optimale Instandhaltung sichergestellt werden. Für Hochgeschwindigkeitsstrecken ist zyklisches Schleifen unerlässliche Voraussetzung, um eine kontinuierliche Ebenheit der Schienenfahrfläche zu gewährleisten und Rollkontaktermüdung vorzubeugen.

- *Streckenbezogene Planung und Baustellenreihung*
Hohe Maschinenleistungen und die Minimierung von Leerfahrten erfor-

- *Regelmäßige Präsenz der Maschine auf der Strecke*
Die regelmäßige Präsenz der Schleifzüge bei der Implementierung fester Schleifzyklen gestattet eine höhere Flexibilität, falls ein Schleifabschnitt einmal nicht vollständig bearbeitet werden kann.
- *Vorhaltung von Abstellmöglichkeiten*
Zur Minimierung von Leerfahrten ist schließlich auch die Vorhaltung von Abstellmöglichkeiten entlang der Strecke zu untersuchen. Die jährlichen Vorhaltekosten eines einseitig angeschlossenen Nebengleises mit ortsbedienter Weiche machen nur etwa 20 % der Kosten einer einzelnen Schleifschicht

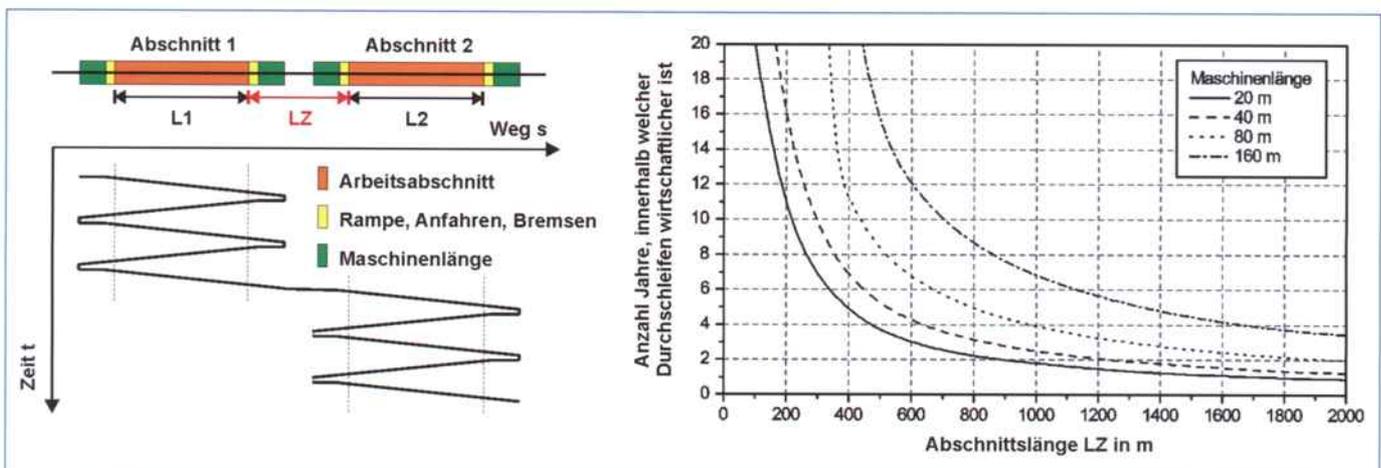


Bild 13: Wirtschaftlichkeit des Durchschleifens von Zwischenabschnitten

zwischen der Bearbeitung der Abschnitte $L1 + L2$ und LZ vergehen muss, damit eine getrennte Behandlung der Abschnitte wirtschaftlich ist. Die Ergebnisse sind von den Längen $L1 + L2$ unabhängig. Es zeigt sich, dass sich Durchschleifen bei kurzen Zwischenlängen und großen Maschinenlängen praktisch immer lohnt. So ist z. B. bei einer Maschinenlänge von 80 m und einer Länge $LZ = 1200$ m das Durchschleifen im Jahr $t=0$ wirtschaftlich, wenn der Abschnitt nach ein oder spätestens zwei Jahren ohnehin bearbeitet werden müsste. Für eine technisch-wirtschaftlich optimale Schleifeinsatzplanung gelten grundsätzlich folgende Empfehlungen:

- *Zyklisches Schleifen statt korrigierendes Schleifen nach Befund*
Gleisabschnitte mit absehbarer Verhaltensfunktion, dies sind insbesondere

den eine wenigstens streckenbezogene Planung. Baustellenlängen < 500 m sind nach Möglichkeit zu vermeiden.

- *Optimale Maschinenauslastung durch verlässliche Umlaufplanung*
Zyklisches Schleifen, streckenbezogene Planung und Baustellenreihung ermöglichen eine kalkulierbare Maschinenauslastung, die gegenüber einer quasi zufälligen Maschinenallokation zu erheblichen Kostensenkungen am Markt führen sollte.
- *Optimale Abstimmung von Bau und Betrieb*
Die zyklische Bearbeitung definierter Streckenabschnitte erleichtert die Bestimmung des Sperrzeitbedarfs und leistet einen Beitrag für eine bestmögliche Koordination von Bau und Betrieb.

aus [16], so dass sich auf hoch belasteten Strecken die Vorhaltung von Abstellmöglichkeiten durchaus rechnen kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Fahrweg der Bahn ist ein Produktionssystem, von dem eine hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bei geringen Kosten gefordert werden. Der alterungsbedingte Substanzverzehr und die andauernde Wechselbeanspruchung durch die Betriebsbelastung erfordern eine regelmäßige Durchführung von Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen, um eine kontinuierliche Qualität der Anlagen auf hohem Niveau sicherzustellen.

In dem vorliegenden Artikel wurde das Schienenschleifen als integraler Bestandteil technisch-wirtschaftlicher Gleisinstandhaltung vorgestellt. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Schienenschleifens erfordert eine langfristige Betrachtung, da sich ein monetärer Nutzen des Schleifens erst nach einigen Jahren einstellt.

Durch Anwendung der LCC-Methode konnte nachgewiesen werden, dass sich die Kosten der Schienenbewirtschaftung in Head Check-gefährdeten Bögen durch zyklisches Schleifen um 50 % senken lassen. Durch zyklisches Schleifen verlängert sich die Schienenliegedauer in Geraden und weiten Bögen auf rund 40 Jahre und entspricht damit der prognostizierten Nutzungsdauer von Betonschwellen. Die kontinuierlich ebene Fahrfläche leistet zusätzlich einen Beitrag zur Minimierung der Schotterbeanspruchung. Für Betonschwellengleise mit zyklisch geschliffenen Schienen ist deshalb davon auszugehen, dass sich die technische Nutzungsdauer des gesamten Oberbaus gegenüber heute üblichen 25 bis 30 Jahren auf bis zu 40 Jahre erhöhen lässt. Unabdingbare Voraussetzung dafür ist eine zielgerichtete, d. h. planvolle, rechtzeitige und kontinuierliche Instandhaltung. Vor allem neue Anlagen erfordern eine rechtzeitige Behandlung, um die langfristig angestrebte Nutzungsdauer sicher zu erreichen.

Mit der Implementierung definierter, zielgerichteter Instandhaltungsstrategien geht eine Verbesserung der Planungsqualität einher. Verlässlich planbare Maschineneinsätze führen zu einer weiteren Kostensenkung. Kann der Anteil der Produktionszeit an der Einsatzzeit allein von heute üblichen 60 % auf 70 % gesteigert werden, so entspricht dies einer Kostensenkung um 14 %. Bei einem errechneten Budgetbedarf von 60 Mio. EUR/a [16] entspricht dies einer Einsparung von 8,4 Mio. EUR/a, die sofort gehoben werden kann. – A 415 –

(Indexstichworte: Instandhaltung, Oberbau, Schienenschleifen)

(Bildnachweis: Bilder 1 und 3–13, Autoren; Bild 2, Literatur [3])

Literatur

[1] *Wnukowsky, H.*: Schleifzug zur Beseitigung von Schienenriffeln. ETR 4 (1955) 8, S. 381 ff.
 [2] *Birmann, F.*: Schaffung annehmlicher Fahrt durch Schienenschleifen. Glas. Ann. 80 (1956) 4, S. 117–126.
 [3] *Ebersbach, D.*: Ressourcenschonung durch Schienenschleifen. EIK (1998), S. 215–237.
 [4] *Henn, W.*: Auswirkung von Oberbauform und Betriebsbelastung auf die Veränderung der Gleishöhenlage. Mitteilungen des Prüfamtes für den Bau von Landverkehrswegen, Heft 30, TU München 1978.
 [5] *Knothe, K.*: Gleisdynamik. Ernst&Sohn, Berlin 2001.
 [6] *Schultheiß, H.*: Die Schiene. ETR 33 (1984) 10, S. 773–779.
 [7] *Schultheiß, H.*: Schienen – ein Teil der Fahrbahn. EI 41 (1990) 6, S. 296–300.
 [8] *Cannon, D. F.; Edel, K.-O.; Grassie, S.L.; Sawley, K.*: Rail defects: an overview. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (2003) 26, S. 865–876.

[9] *Grohmann, H.-D.; Schnitzer, T.; Edel, K.-O.*: Head Checks and further damages. Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Wheel/Rail Systems, Gothenburg/Sweden, June 2003, S. 99–103.
 [10] *Grohmann, H.-D.; Hempelmann, K.; Groß-Thebing, A.*: A new type of RCF, experimental investigations and theoretical modelling. Wear 253 (2002) 1, S. 67–74.
 [11] UIC World Executive Council: Rail Defect Management. Final Report - Part B, Paris 2003.
 [12] *Schöch, W.*: Regelmaßnahme asymmetrisches Schleifen. ZEVrail Glas. Ann. 129 (2005) 8, S. 317–323.
 [13] *Hauck, G.; Onnich, H.; Prögler, H.*: Entwicklung eines Messwagens zur Erfassung der Fahrgeräuschanhebungen durch Schienenriffeln. ETR 46 (1997) 3, S. 153–159.
 [14] *Veit, P.*: Das Projekt „Strategie Fahrweg“ der ÖBB. ZEVrail Glas. Ann. 128 (2004) 9, S. 4–12.
 [15] *Hempe, T.*: Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen. Wissenschaftliche Arbeiten für den Schienenverkehr, IVE Nr. 67. Eurailpress Tetzlaff-Hestra, Hamburg 2006.
 [16] *Siefer, T.; Hempe, T.*: Einfluss des Schienenschleifens auf die LCC des Oberbaus. Forschungsvorhaben im Auftrag der Firma SPENO International SA. Leibniz Universität Hannover 2006 (unveröffentlicht).



Dr.-Ing. Thomas Hempe (31). 2000 Diplom Bauingenieurwesen an der Universität Hannover, 2000–06 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Universität Hannover; 2006 Promotion zum Dr.-Ing. an der Universität Hannover, seit August 2006 Mitarbeiter der DB AG, Technik/Beschaffung, Produktbereich Bauliche Anlagen, Systembetreuung und Koordination Teilsysteme (TBS)

Anschrift: Deutsche Bahn AG – TBS, Richelstr. 3, 80634 München, Deutschland. E-Mail: Thomas.Hempe@bahn.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Siefer (51). 1981 Diplom Bauingenieurwesen an der Universität Hannover; 1982–83 Baureferendar bei der Deutschen Bundesbahn; 1984 Zweite Große Staatsprüfung und Bauassessor; 1984–85 Mitarbeiter der Deutschen Bundesbahn; 1985–89 wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Universität Hannover; 1989 Promotion zum Dr.-Ing. an der Universität Hannover; 1989–97 Mitarbeiter der Deutschen Bundesbahn bzw. DB AG, dann DB Netz AG; seit 1997 Geschäftsführender Leiter des Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb (IVE) der Leibniz Universität Hannover.

Anschrift: Leibniz Universität Hannover – IVE, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Deutschland. E-Mail: siefer@ive.uni-hannover.de

Nichts zu verbergen !

www.speno.ch

