

Bernhard Lichtberger

Schottergleisverhalten und Einflussparameter – der Versuch eines Überblicks

Teil 2: Die Suche nach dem optimalen Fahrzeug aus der Sicht des Instandhalters des Gleises

Der folgende Artikel ist der zweite Teil eines drei Teile umfassenden Überblickes über Schottergleisverhalten und Einflussparameter. Der erste Teil wurde in der Vorjahresausgabe des EIK abgedruckt. Er zeigte, dass die Anfangsqualität und die Verschlechterungsrate der Gleislage nach einer Instandhaltungsarbeit die wichtigsten Qualitätskenngrößen eines Schottergleises sind. Der Teil 3 wird die Suche nach der optimalen Instandhaltungsstrategie zum Inhalt haben.

1 Kostenbeeinflussende Parameter des Schottergleises

Die Reform der Staatsbahnen der Europäischen Union, welche in der EG-Richtlinie 91/440 zusammengefasst wurden, führten zu mehr Eigenständigkeit und kommerzieller Handlungsfreiheit der Bahnen, zu einer Trennung zwischen Fahrweg und Betrieb – mit dem Ziel der finanziellen Sanierung der Eisenbahnunternehmen – sowie der Öffnung der Schienen-Infrastruktur für Dritte. Die Aufspaltung der Verantwortlichkeit bei den europäischen Bahnen in Fahrweg und Betrieb birgt die Gefahr des kurzfristigen und auf den eigenen Bereich eingeschränkten Kostenblickes mit sich.

Die Gesamtkosten einer Gleisanlage bestehen aber im wesentlichen aus drei kostentragenden bereichsübergreifenden Parametern die sich gegenseitig beeinflussen:

Dr. Bernhard Lichtberger, Forschungs- und Versuchsabteilung, Firma Franz Prasser, Linz

- der Infrastruktur
Je weniger Instandhaltungsaufwand notwendig ist und je haltbarer die eingesetzte Infrastruktur ist, um so höher sind die Investitionskosten.
- dem Fahrzeugmaterial
Der Einfluss der ins Gleis eingebrachten Kraftspektren auf die Gleisqualitätsverfallsrate kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Daher haben die für eine Strecke geplante Betriebsart und das verwendete rollende Material einen großen Einfluss auf die Häufigkeit der durchzuführenden Instandhaltungsarbeiten und die damit verbundenen Kosten.
- den Instandhaltungskosten
Die Qualitätsverfallsrate der Gleislage hängt neben der Bauart mit den entsprechenden Gleiskomponenten, von der beim Bau und der Instandhaltung verwendeten Arbeitstechnologie, sowie hinsichtlich der erzielbaren inherenten Qualität auch vom Stand der Technik der eingesetzten Oberbaumaschinen ab.

Die Suche nach der optimalen Infrastruktur, dem optimalen Fahrzeug und der optimalen Instandhaltungsstrategie in Hinsicht auf ein Gesamtkostenminimum über die gesamte Lebensdauer kann daher nur mit gleichzeitigem Blick auf alle drei Parameter erfolgen.

2 Die Suche nach dem optimalen Fahrzeug

Das optimale Fahrzeug, aus der Sicht der Gesamtkosten, ist jenes, welches unter Berücksichtigung der anteiligen Beschaffungskosten für die Laufqualität des Fahrwerkes bei vorgegebener Gleiskonstruktion die geringsten Gleislageveränderungen und Gleisschädigungen bewirkt.

2.1 Fahrzeugreaktion und Gleisfehler

Das Fahrverhalten von Fahrzeugen und wegen der Fahrzeugreaktion auch die Beanspruchung des Gleises hängt

- von der **Qualität des Fahrweges** und
- von der **Bauart des Fahrzeuges** ab.

2.1.1 Der Einfluss der Berührgeometrie Rad/Schiene

Die Berührgeometrie Rad/Schiene ist für das Laufverhalten der Fahrzeuge von wesentlicher Bedeutung. Dass es trotz auf dem Rollprüfstand erprobter Fahrzeuge zu Problemen auf der Strecke im praktischen Einsatz kommen kann zeigen Versuche, die bei der ÖBB und der SBB durchgeführt wurden [1]. Insbesondere die äquivalente Konizität und mit ihr der Schienentyp, seine spezifische Abnutzung und die damit einhergehende Verlagerung des Berührungspunktes in Richtung Hohlkehle, die Spurweite, die Schieneneinbauneigung,

Schienenbefestigung, unterschiedlicher Schienenverschleiß der bogenäußeren zur bogeninneren Schiene zeigen schwerwiegende Einflüsse auf die Laufstabilität. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die äquivalenten Konizitäten unter 0.4 liegen sollten.

Maßgebend sind daher nicht die geometrischen Gleislagefehler allein, sondern erst die sich mit den Fahrzeugen ergebenden Reaktionen und Wirkungen.

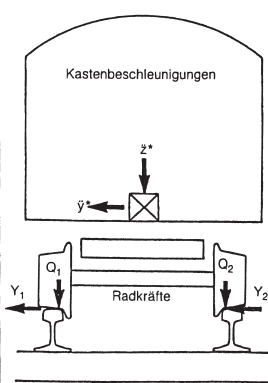
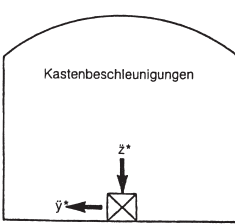
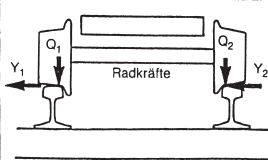
2.1.2 Die Beurteilung und Messung der Fahrzeugreaktionen

Neben den Gleismessfahrzeugen zur Erfassung der Gleisgeometriefehler gibt es daher auch Bestrebungen, die Reaktionskräfte des Fahrzeuges zu messen. Diese dienen als Kenngrößen für den Fahrkomfort, die Fahrzeug-Gleis-Dynamik und erlauben damit auch Aussagen über die Sicherheit der Fahrzeuge und die Beanspruchung des Gleises.

Bild 1 gibt einen Überblick über die Beurteilungsgrößen und die wirkenden Kräfte. Die grundlegenden Sicherheitskennwerte, die in den Eisenbahnnormen angegeben werden, werden durch Kräfte zwischen Rad und Schiene beschrieben. Dies sind insbesondere Grenzwerte für die Summe der Seitenkräfte Y_{2m} , die vertikale Radlast Q und der Entgleisungskoeffizient Y/Q .

Der Fahrkomfort wird üblicherweise durch Wagenkastenbeschleunigungen, die nach menschlichen Wahrnehmungskriterien bewertet werden, beurteilt.

Die dynamischen Reaktionen von Schienenfahrzeugen stellen ein sehr gutes Kriterium für den aktuellen Erhaltungszustand des Schienengleises dar.

Kriterien	Beurteilungsgrößen		
	Einzelfehlerbeurteilung	Abschnittsbeurteilung über 500 m Länge	
Sicherheit: <ul style="list-style-type: none"> – Spurkranzaufklettern – Gleisquerverschiebung – Ladungsverschiebung 	$Y/Q_{(2m)}$ bzw. $\min Q_{(2m)}$ $\Sigma Y_{(2m \text{ Wert})}$ \ddot{y}^*	<hr/> <hr/> <hr/>	<div style="text-align: center;"> <p>Kastenbeschleunigungen</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Radkräfte</p>  </div>
Komfort: <ul style="list-style-type: none"> – Beschleunigung <ul style="list-style-type: none"> – vertikal – horizontal 	\ddot{z}^* (frequenzbewertet) \ddot{y}^* (frequenzbewertet)	$\text{rms } z^{1)}$ $\text{rms } y$	
Gleisbeanspruchung: <ul style="list-style-type: none"> – Schienenkopf – Schienenfuß – Schwelle – Schotter 	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \text{max } Q$	<hr/> <hr/> <hr/>	

¹⁾ rms: Wurzel aus dem quadratischen Mittelwert

Quelle: Gleislagebeurteilung mit der Oberbaumeßwageneinheit der Deutschen Bundesbahn, W. Hehenberger, ETR 39 (1990), Heft 4, S. 213 ff.

Bild 1: Kriterien und Beurteilungsgrößen für die Fahrzeug-Gleis-Dynamik

2.1.2.1 SR-Verfahren der DBAG [2, 3]

Mittels der von der DBAG entwickelten Oberbau-Messwagen-Einheit (OMWE) und einem eigenen Beurteilungsverfahren (SR ... Störgrößen-Reaktionen) werden für wählbare Zugkonfigurationen Reaktionen aus den gemessenen Geometrieparametern hochgerechnet. Als Ergebnis werden die Gleislagefehler wie bisher ausgegeben, es wird aber außerdem eine Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Fehler durchgeführt, sowie eine wirkungsbezogene Beurteilung gemacht. Das System basiert auf einem linearen Fahrzeugmodell aus einem Wagenkasten auf zwei Drehgestellen.

Nach DS 821 2001 werden zur Beurteilung der aktuellen Gleislage Regelinspektionsfahrten mit Gleismessfahrzeugen durchgeführt. Aus den Messstreifen ist zu entnehmen, wie die SR_{100} bzw. SR_{lim} Grenzlينien der jeweiligen Messparameter (Längshöhe, gegenseitige Höhenlage, Pfeilhöhe, Verwindung) punktuell überschritten werden und wo und wie viele Einzelfehler vorhanden sind.

Der Grenzwert SR_{100} stellt die technisch-wirtschaftlich sinnvolle Eingriffsschwelle dar. Der SR_{lim} -Grenzwert steht für eine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit und muss daher umgehend beseitigt werden, andernfalls ist die Geschwindigkeit auf mindestens 0,7 x zul. v zu reduzieren. Ist bei SR_{100} -Überschreitung die Instandsetzung der Gleislage bis zur nächsten Regelinspektion nicht möglich, muss die Geschwindigkeit soweit reduziert werden, dass der gemessenen SR_{100} Wert für diese Geschwindigkeit eingehalten wird.

2.1.2.2 VRA-System der NS [4, 5, 6]

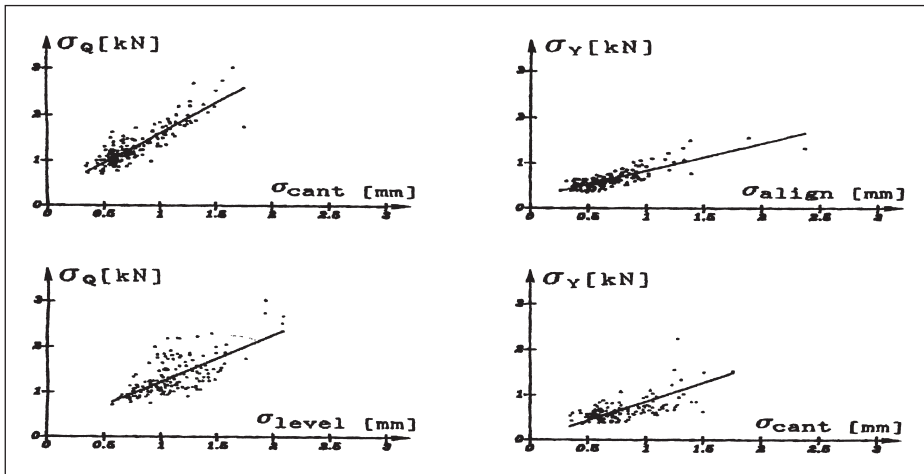
Das VRA-System (Vehicle Response Analysis) berechnet aus den Gleisgeometriemessungen in Echtzeit die Kräfte und Beschleunigungen für drei repräsentative Fahrzeuge mit fünf verschiedenen Geschwindigkeiten.

Bild 2 zeigt, dass die Reaktionskräfte bei gleichen geometrischen Gleisfehlern relativ breit streuen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Beurteilung der Gleisqualität nicht nur aufgrund der Geometriemessungen erfolgen soll.

2.1.3 Dynamische Beanspruchung des Gleises durch Fahrzeuge

2.1.3.1 Kritische Schwinggeschwindigkeit und dynamisches Setzungsverhalten

Rehfeld [7] postuliert in der Schwinggeschwindigkeit eine wichtige Größe für kritische dynamische Zustände im Schotterbett. Auf den Neubaustrecken NBS streuen die Schotterpressungen und Schwinggeschwindigkeiten von Schwelle zu Schwelle [8, 9] erheblich. Als unbedenklich gelten Schwinggeschwindigkeiten von 10-15 mm/s. Die Kornumlagerung ist bei dynamischer Einwirkung durch die Abhebewelle bei Zugüberfahrten am größten [10].



Quelle: Modern Railway Track, C. Esveld, MRT-Productions, 1989

Bild 2: Steuerung der Reaktionskräfte abhängig von gleisgeometrischen Kenngrößen

2.1.3.2 Radunrundheiten

Unrunde Räder können durch singuläre Abplattungen, Flachstellen, Bremsriffel, ovale Form und durch periodische Polygonisierung des Rades mit 3-6 Ecken bei Reisewagen oder 14-22 Ecken bei Triebfahrzeugen verursacht werden [11]. Diese Radunrundheiten führen neben der Lärm- und Erschütterungsbelastung der Umwelt zu einem Absinken des Fahrkomforts im Zuginneren, zur progressiven Schädigung der Radlauflächen und des Fahrwerkes.

Das Brummen des ICE z.B. ist auf eine Polygonisierung der Räder zurückzuführen. Derzeit wird deren Entstehung auf einen reibleistungsproportionalen Verschleiß zurückgeführt. Die Hochgeschwindigkeitsradsätze müssen rotodynamisch betrachtet werden, dabei sind die Gewichts- und Trägheitskräfte sowie die gyroskopischen Kräfte zu berücksichtigen [12]. Geringe Ausgangsunwuchten oder Radunrundheiten führen dabei über den Reibleistungsverschleiß und Eigenanregung zu einer Verstärkung der Polygonisierung. Das vertikal beschleunigte Rad führt zur Anregung einer Biegeschwingung der Radsatzwelle. Daran gekoppelt führen die starren Radscheiben Drehschwingungen um die Fahrzeuglängsachse aus, dabei tritt Querschleif mit seitlichem Materialabrieb auf. Neue Untersuchungen zeigen, dass die vertikale Elastizität des Gleises einen großen Einfluss auf die dabei auftretenden Normalkraftschwankungen hat [13]. Besonders kritisch ist dabei ein Gleis mit hartem Untergrund. Dabei verhält sich eine Gleiskonstruktion mit hartem Untergrund und sehr weichen Zwischenlagen wesentlich kritischer als eine Gleiskonstruktion mit mittelhartem Untergrund und steifen Zwischenlagen. Die angeregten kritischen Frequenzen liegen vorwiegend im Bereich von 50-150Hz. Es sind besonders die

Radunrundheiten mit 3-5 Perioden, die große Normalkraftschwankungen anregen. Dabei kann es bereits bei Radunrundheitsamplituden von 0,2mm zum Abheben des Rades kommen. Der Aufbau extrem harter Planumsschutzschichten sollte vermieden werden, weiche Zwischenlagen mit hoher Dämpfung sind vorteilhaft. Kann harter Untergrund (Brücken etc.) nicht vermieden werden, dann erscheinen Unterschottermatern oder besohlte Schwellen von Vorteil.

Aus Simulationsberechnungen ergibt sich, dass die optimale Gleissteifigkeit im Bereich zwischen 50-100kN/mm liegt. Als optimaler Einsenkungsbereich wird 1-1.5mm angegeben [14].

Bei einer höherfrequenten Anregung durch schnelle Züge (Körperschall 40-150Hz) führt diese unter dem Rad zu einer „Verflüssigung“ des Schotters [15]. Die unabgefederten Radsatzmassen verursachen dynamische Radlastschwankungen. Diese verursachen höhere Beanspruchung des Oberbaues. Dies kann durch einen sogenannten Dynamikfaktor berücksichtigt werden. Dieser Dynamikfaktor liegt z.B. unter angetriebenen Achsen bei einem guten bis sehr guten Oberbauzustand und einer Geschwindigkeit von 250km/h bereits in der Größenordnung von 1,7 [16]. Aus der Sicht der Fahrwegkonstruktion muss also eine möglichst geringe unabgefederte Fahrzeugmasse gefordert werden.

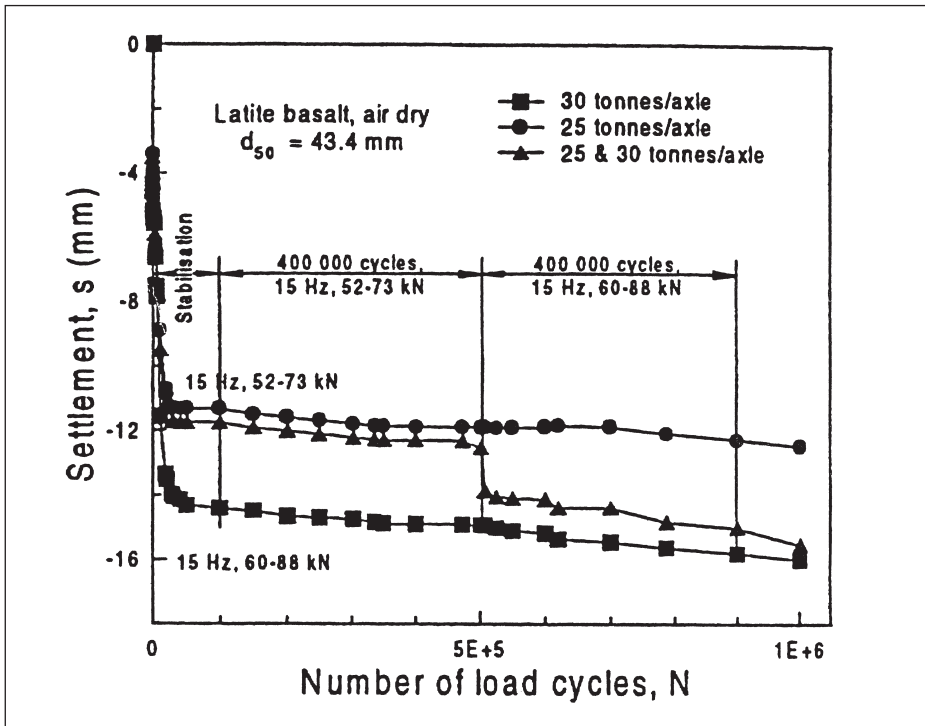
Zum anderen verursachen diese dynamischen Radlastschwankungen auch eine schnellere Gleislageverschlechterung. Eine Radlastschwankung von 30% zieht bereits eine 1,6-fach schnellere Gleislageverschlechterung nach sich. Man kann diesen Beziehungen entnehmen wie verheerend sich die Polygonisierung der Räder mit den damit verbundenen Normalkraftschwankungen auch auf die Gleislage auswirkt.

2.1.4 Forderungen an das Laufverhalten der Fahrzeuge

Die Forderung nach einem wirtschaftlich optimalen Oberbau muss auch die Fahrzeuge und ihre Kennwerte einschließen. Für einen wirtschaftlichen Oberbau sind also an die Fahrzeugkonstruktion und den Fahrzeugentwurf Forderungen zu stellen. Derzeit werden den Fahrzeugbauern vorrangig Sicherheitsgrenzwerte hinsichtlich dem Fahrzeuggewicht je Längeneinheit, der maximalen Achsfahrmasse, der Gleisverschiebungskraft ΣY , der dynamischen Radkräfte, der Entgleisungssicherheit in Bögen und Verwindungsrampen und Radunrundheiten vorgegeben.

Wie schon erläutert wurde, hängen die Setzungen und die sich daraus einstellenden Gleisfehler von den maximalen Kräften ab, die ins Gleis eingebracht werden (*Bild 3*). Das heißt, dass Fahrzeuge mit Radunrundheiten oder Laufinstabilitäten, das Gleis überproportional schädigen. Dazu kommen Setzungen wegen des „Flüssigwerdens“ (elasto-liquides Verhalten) des Schotters bei Frequenzen über 40Hz.

Forderungen an das Laufverhalten der Fahrzeuge bedingen:
die Vorgabe des zu befahrenden Betriebsgleises hinsichtlich seiner geometrischen Qualität in mathematischer Form, damit das Laufverhalten des zu entwerfenden Fahrzeuges schon



Quelle: Deformation of Railway Ballast Und Dynamic Loads; Daniele Ionescu, Buddhima Indraratna, Hugh David Christie; Conference on Railway Engineering, 7-9 September 1998, Queensland, Australia

Bild 3: Setzungsverlauf abhängig von den wirkenden Maximalkräften

zur Entwurfszeit simuliert werden kann und die Vorgabe der maximal zulässigen Kraftspektren und dynamischen Reaktionskräfte welche ins Gleis eingebracht werden dürfen. Aus dem gesagten ergibt sich außerdem, dass vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt aus die Kosten für die Benutzung des Fahrweges durch ein Fahrzeug von der Güte seines Laufverhaltens abhängig gemacht werden sollte.

2.1.5 Die Gleislage – mathematische Beschreibung als Grundlage für Fahrzeugauslegungen

Für die Fahrzeugauslegung interessiert nicht so sehr ein bestimmter Gleislagefehler sondern ein Querschnitt über die auftretenden Wellenlängen und Amplituden der Gleislagefehler. Für das Fahrzeug als schwingungsfähiges Gebilde wirkt das Gleis mit seinen Fehlern schwingungserregend. Als eine gute Beschreibungsmethode haben sich die sogenannten Unebenheitsleistungsdiagramme herausgestellt [17, 18].

Dabei werden mittels einer Fouriertransformation aus Messsignalen Spektren abgeleitet. Die Amplituden eines zu wählenden Frequenzbandes werden quadriert und durch die Frequenzbandbreite dividiert. Dadurch erhält man die Varianz einer Teilunebenheit auf die gewählte Frequenzbandbreite bezogen. Führt man diese Berechnung für alle Teilunebenheiten durch, dann erhält man als Ergebnis das Unebenheitsleistungslichtespektrum.

Das Unebenheitsleistungslichtespektrum sagt aus, welche Wellenlängen und welche dazugehörigen Effektivwerte der Gleisfehler in einem Gleis vorhanden sind.

Bild 4 zeigt verschiedene ermittelte Unebenheitslichtespektren. Man kann diese mit Umhüllenden versehen, denen man die Qualitäten „gutes“, „mittleres“ und „schlechtes“ Gleis zuordnen kann. Das Bestechende an dieser Darstellung ist, dass man diese beschreibenden umhüllenden kubischen Hyperbeln durch Gleichungen mit nur 2 Parametern beschreiben kann.

$$\sigma\left(\frac{1}{L}\right) = \frac{a}{\left(b + \frac{1}{L}\right)^3}$$

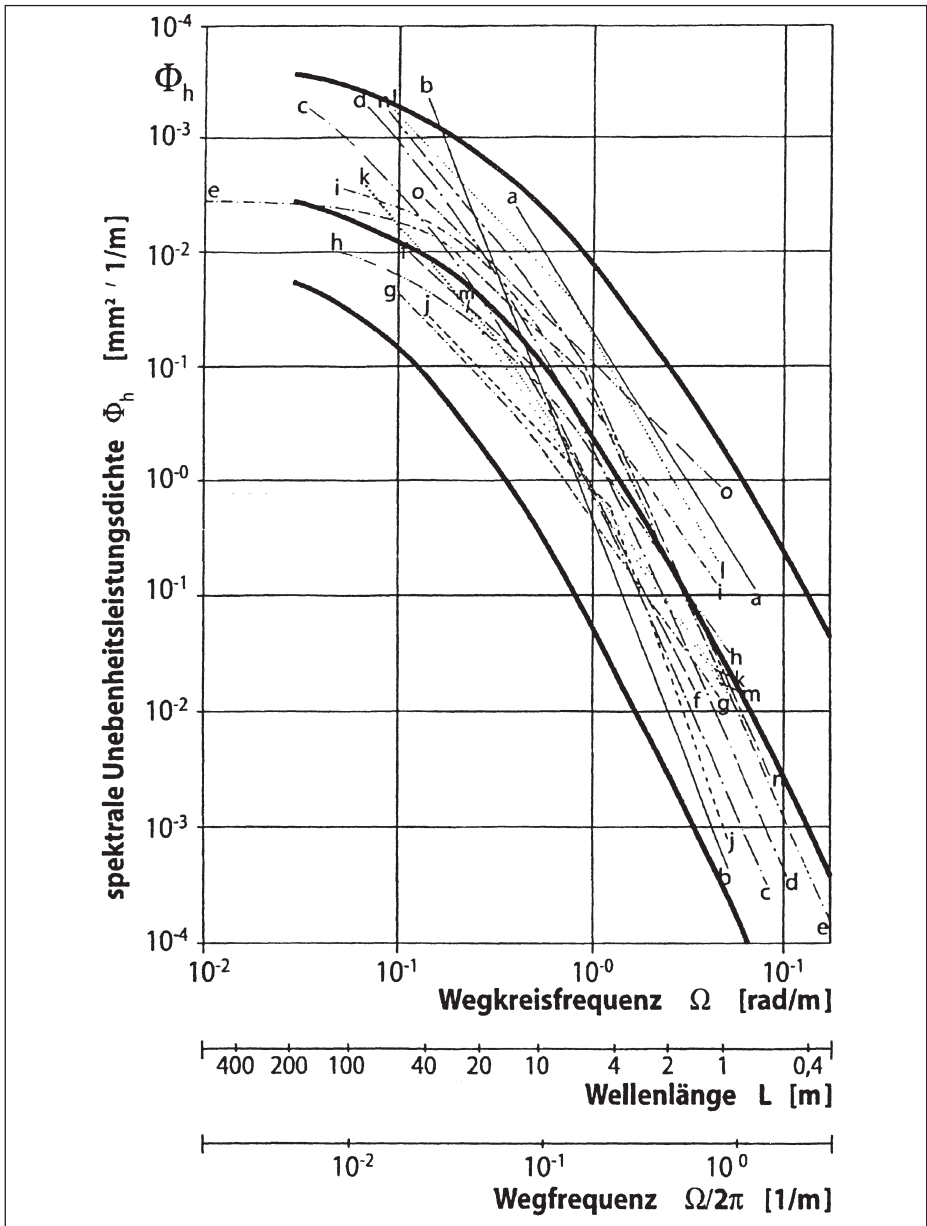
- a ... Maß für die Größe der Unebenheitsamplituden
- b ... Ausdruck für Welligkeit (größere Werte – höheren Anteil kürzerer Wellen)

2.1.6 Synthese eines klassifizierten Gleisfahrweges aus Gleisunebenheitslichtespektren

Damit die Fahrzeugreaktionen studiert und untersucht werden können, muss aus den so klassifizierten Gleisfahrwegen (gut, schlecht, mittel etc.) eine hypothetische Gleislage synthetisiert werden. Dazu brauchen nur die Amplituden der Einzelunebenheiten genommen und als periodische Sinusfunktionen dargestellt und überlagert werden. Die wegen der Quadrierung der Amplituden verlorengegangene Phaseninformation wird einfach über eine Zufallsfunktion generiert und den einzelnen Sinusschwingungen zugeordnet. Das entstehende Gleisfehlerbild ist dann zwar ein beliebiges, aber typisches für die angenommene Gleisqualität (mit statistisch gleichen Eigenschaften).

2.1.7 Analyse der Fahrzeugreaktionen anhand klassifizierter Gleisfahrwege

Will man vorhandene Fahrzeuge hinsichtlich der Kräfte, die sie ins Gleis einbringen untersuchen, dann können die klassifizierten Gleisfahrwege als Vergleichsbasis zwischen verschiedenen Fahrzeugen dienen. Eine international vereinheitlichte Klassifizierung von entsprechenden Gleisqualitäten wäre aus diesen Gründen sinnvoll und zielführend.



Quelle: Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit – oder – wie gut muss ein Gleis sein? K. Riessberger, ÖVG Spezial, Band 41, S. 64 ff.

Bild 4: Gleisunebenheitsdichtespektren

Literatur

- [1] Müller, Roland: Die Problematik der Berührgeometrie Rad/Schiene; ÖVG-Spezial, Bd 33, September 1994, Linz, S279ff
- [2] Hehenberger, Walter: Gleislagebeurteilung mit der Oberbaumesswageneinheit der Deutschen Bundesbahn, ETR 39 (1990), Hr. 4 – April, S213ff
- [3] Hehenberger, Walter: Gleisdiagnose für den Hochgeschwindigkeitsverkehr; ETR 41 (1992), H.6 – Juni, S399ff
- [4] Esveld, Conraad: Neue Verfahren zur Planung der Oberbauinstandhaltung; Rail International, 1996
- [5] Esveld, Conraad: Track Geometry and Vehicle Reactions; Rail Engineering International Edition 1989 Number 4, p13
- [6] Esveld, C.: Fahrzeugreaktionsanalyse (VRA); Schienen der Welt, Juni 1989, S9ff
- [7] Rump, Reinhold; Ehling, Bèla; Rehfeld, Erich: Wirkungen von Verkehrserschütterungen auf Erdbauwerke und ungebundene Tragschichten im Oberbau, ETR 45(1996) – Juli/August, S485ff
- [8] Eisenmann, Josef; Rump, Reinhold: Ein Schotteroberbau für hohe Geschwindigkeiten; ETR 46 (1997), Nr. 3 – März, S99ff
- [9] Leykauf, Günther; Mattner, Lothar; Steinbeißer, Lorenz: Schwingungsmessungen mittels Schotter-Messsteinen; ETR 47 (1998) – Januar, S37ff
- [10] Eisenmann, Josef; Kaess, Gerhard: Das Verhalten des Schotters unter Belastung; ETR (29) 3 – 1990, S201ff
- [11] Müller, Roland: Veränderungen von Radlaufflächen im Betriebseinsatz und deren Auswirkungen auf das Fahrzeugverhalten (Teil 1); ZEV+DET Glas. Ann. 122 (1998) 11 November, S675ff
- [12] Meinke, Peter; Morys, Bernhard: Radunrundheiten, Entstehung und Verstärkung bei hohen Fahrgeschwindigkeiten; EI – Eisenbahningenieur (50) 2/99, S44ff
- [13] Knothe, Klaus; Wu, Yongfang: Einfluss der Elastizitätsanordnung im Gleis auf die Beanspruchung durch Radunrundheiten; ETR 49 (2000), H.3 – März, S150ff
- [14] Eisenmann, Josef: Verstärkter Schotteroberbau und/oder Feste Fahrbahn; ZEV+DET Glas. Ann. 117 (1993) Nr. 4 April, S130ff
- [15] Eisenmann, Josef: Oberbaudynamik; Eisenbahningenieur 41 (1990) 5, S239ff
- [16] Eisenmann, Josef: Anforderung der Fahrbahn an das Fahrzeug; EI – Eisenbahningenieur (48) 7/97, S8ff
- [17] Frederich, Fritz: Die Gleislage – aus fahrzeugtechnischer Sicht, ZEV-Glas. Ann 108 (1984), Nr. 12 Dezember, S355ff
- [18] Riessberger, Klaus: Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit – oder – wie gut muss ein Gleis sein?; ÖVG Spezial, Bd 41, September 1997, Graz, S64ff