

Dynamische Gleismessungen und spektrale Analyse – wie man messen und was man daraus erfahren kann

Dr.-Ing. Frank H. Müller-Boruttau, Dr.-Ing. Norbert Breitsamter,
imb-dynamik, D-82266 Inning-Buch

Zusammenfassung

Zunehmende Fahrgeschwindigkeiten und schwerere Fahrzeuge (mit großen unabgefederten Radsatzmassen) erhöhen die dynamischen Beanspruchungen des Fahrweges. Um die Folgen dieser Beanspruchungen abzuschätzen und zielgerichtet Maßnahmen zur Minderung dimensionieren zu können, ist ein tief reichendes Verständnis des dynamischen Zusammenwirkens von Fahrzeug und Fahrweg erforderlich. Es wird gezeigt, wie mit dynamischen Gleismessungen die benötigten Daten erhoben und diese zur Systemidentifikation verwendet werden können. Die besondere Bedeutung der spektralen Analyse mittels Terzspektren und die weit reichenden Analysemöglichkeiten werden an Beispielen demonstriert.

1 Einführung

An der vertikalen Dynamik des Fahrzeug-Oberbau-Unterbau-Systems sind gut identifizierbare Einzelkomponenten beteiligt, z.B. Radsatz-Schiene-Befestigung-Schwelle. Um das frequenzabhängige Verhalten der Einzelkomponenten des Gleises zu verstehen und in Rechenmodellen beschreiben zu können, muss man sich Informationen verschaffen, die es einem erlauben, auch auf physikalisch (noch) nicht messbare Größen zu schließen, z.B. die Kraft Schwelle-Schotter.

imb-dynamik [1] führt seit mehr als 10 Jahren unterschiedlichste Messungen an allen Oberbauformen durch und hat dabei eine Vielfalt von Erfahrungen gesammelt und Analysetechniken entwickelt, die eine vollständige Beschreibung der vertikalen Dynamik erlauben. Der Schwerpunkt unserer Arbeit liegt dabei in der grundsätzlich Frequenz abhängigen Betrachtung: Es ist nahezu nie entscheidend, welchen (kurzzeitigen) Maximalwert eine bestimmte physikalische Größe aufweist, sondern welcher Frequenzgehalt bzw. genauer welcher Energiegehalt bei welcher Frequenz vorhanden ist.

2 Messverfahren

Zum vollständigen Aufschluss der Dynamik von aus mehreren Elementen zusammenge-

Widmung

Diese Veröffentlichung widmen die Autoren dankbar ihrem verehrten baudynamischen Lehrer Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Harry Grundmann, Lehrstuhl für Baumechanik der Technischen Universität München, aus Anlass der Vollendung seines 65. Lebensjahres

setzten schwingungsfähigen Konstruktionen zerlegt man diese zunächst gedanklich in Komponenten mit klar abgrenzbarem dynamischen Verhalten, wie z.B. Biegebalken, Masse, Feder-Dämpfer-Kombination etc.. Diese Grundannahmen werden bei der Modellbildung entsprechend berücksichtigt. Im Gleis werden Sensoren eingesetzt, um die physikalischen Größen

- a) Verformungen an ausgezeichneten Punkten und
 - b) Kräfte / Pressungen
- messtechnisch zu erfassen.

Punkt a) ist prinzipiell vergleichsweise einfach zu realisieren. Punkt b) dagegen ist im Gleis aufwendig bzw. technisch mit den heutigen Mitteln überhaupt nicht darstellbar. Da es sehr viel leichter ist, Verformungen zu messen, wird man sich sehr viel eher der Verformungsmessungen bedienen. „Verformung“ ist dabei generalisiert zu verstehen: es kann sich bei der eigentlichen Messung selbst um Wege, Schwinggeschwindigkeiten oder Beschleunigungen handeln.

Wenn man die Verformungen bzw. ggf. die Kräfte an geeignet ausgewählten Punkten kennt, können anhand der Systemantwort auf bekannte Anregungen die Systemparameter identifiziert werden. Die für eine zuverlässige Modellbildung benötigten Daten stehen dann zur Verfügung.

2.1 Beschleunigung

2.1.1 Anwendung

Obwohl für die Analyse praktisch nie die Beschleunigungen selbst, sondern meist Schwinggeschwindigkeit (= Schwinggeschwindigkeit) oder Schwingwege / Amplituden benötigt werden, messen wir grundsätzlich mit Beschleunigungsgebern. Sie haben viele Vorteile:

- kein ruhender Referenzpunkt erforderlich (einen solchen gibt es in der direkten Nähe eines Gleises nicht)
- Linearität im Frequenzgang von z.B. 0,1 Hz bis in den kHz-Bereich
- Zusammen mit entsprechend gewählten Verstärkern prinzipieller Dynamikbereich von $1 : 10^9$ entsprechend 180 dB oder 30 bit (Zum Vergleich: eine CD hat einen Dynamikbereich von rund 100 dB oder 16 bit)
- geringe Baugröße und folglich geringe mechanische Störung des Systems
- in jeder Raumrichtung montierbar
- nachträglicher Einbau ohne Störung des Gleisbettes möglich (imb-dynamik Platumsmesssonde)

Wichtigster Nachteil: Weil Beschleunigungen gemessen werden, muss für Analysen der Schwinggeschwindigkeit einfach, für Wege / Verformungen / Zusammendrückungen zweifach inte-

griert werden. Dies ist im Frequenzbereich äußerst einfach, im Zeitbereich dagegen muss man einige Tricks anwenden, um zum Erfolg zu gelangen (s.u.).

2.1.2 Typische Messpositionen

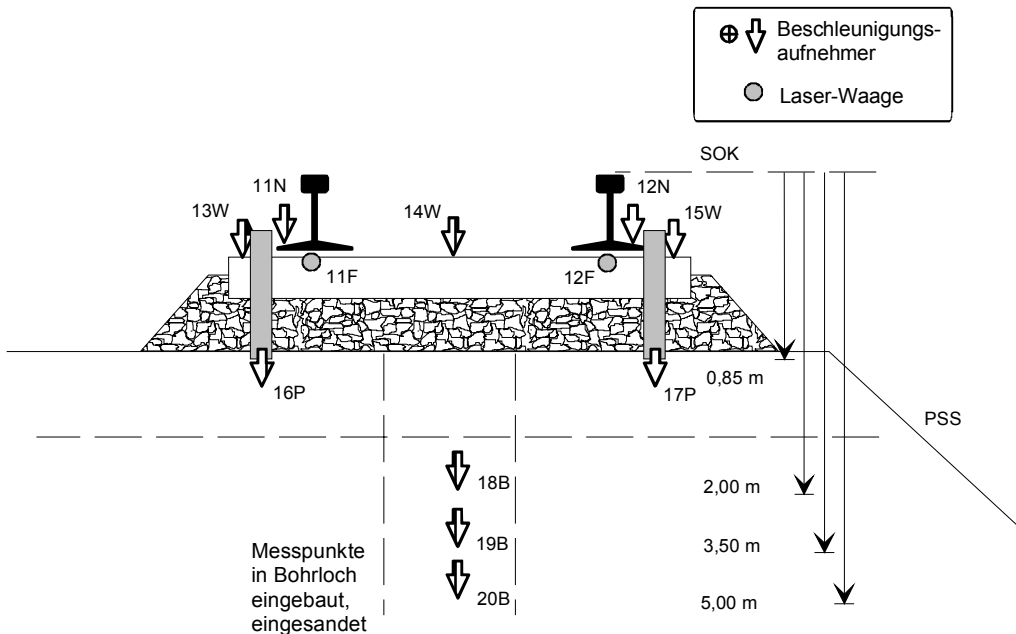


Bild 1 Beispiel einer Messpunktanordnung mit Beschleunigungsgebern und Laser-Waagen auf einem Damm mit Messpunkten in Oberbau und Unterbau

Beschleunigungssensoren können – außer auf dem Schienenkopf - praktisch an jeder beliebigen Stelle des Gleises angewandt werden. Typische Messpositionen sind:

- **Schiene** (im Schwellenfach / über der Schwelle, Schienenkopf / Schienensteg / Schienenfuß, vertikal / horizontal quer / horizontal längs Gleisachse),
- **Schwelle** (Schwellenkopf / neben Schiene / Mitte / Fünftelpunkte, wenn Schwellenverbiegung gefragt ist),
- **Schotter** (Oberkante, beliebige Tiefe im Schotterbett und darunter bis ca. 1,0 m mit der imb-dynamik-Planumsmesssonde) bzw. alternativ
- **Schichten der Festen Fahrbahn,**
- **Unterbau** (vorkonfektionierte Sensoren (eigene Entwicklung) in Bohrlöcher auch bei bestehendem Gleis in beliebiger Tiefe eingebaut),
- Oberkante benachbartes **Gelände**

Die Auswahl erfolgt flexibel je nach Fragestellung. Mit diesen Messpositionen ist das Verhalten des Systems an allen Schicht- oder Komponentengrenzen bekannt.

2.2 Dehnung

2.2.1 Anwendung

Mit aufgeklebten Dehnungsgebern (Dehnmessstreifen DMS) werden die Dehnungen z.B. von Schiene oder Schwelle gemessen. Messungen mit örtlich geklebten DMS am Betriebs-

gleis sind wegen der hohen Anforderungen an die Applikation jedoch immer problematisch und verursachen hohe Installationskosten. Außerdem sind die Dynamik und der nutzbare Frequenzbereich verglichen etwa mit Beschleunigungsgebern beschränkt.

2.2.2 Messpositionen

Der Einsatz bei imb-dynamik beschränkt sich aus den vorgenannten Gründen auf die gelegentliche Ermittlung von Schienenspannungen / Schienenbeanspruchung.

2.3 Laserwaage Lasca (laser scale)

2.3.1 Anwendung

Die INNOTECH GmbH Worms hat ein neuartiges Verfahren Lasca zur Detektion von Rad-Schiene-Kräften und Rundlaufabweichungen von Rädern entwickelt [2]. Ein Sensor besteht im Prinzip aus einem Laser und einem Detektorchip. Der Strahlweg beträgt ca. 250 mm. Der Detektor ist so empfindlich, dass bereits eine Belastung mit 10 kg oder die Verbiegung durch Erwärmung der Schiene mit der Hand zu einem verwertbaren Signal führen. Der Frequenzbereich ist durch die Wahl der Abtastrate bis in den 100 kHz-Bereich nutzbar. Da die Anlage nur angeschraubt wird, ist sie mobil bei fliegenden Messungen einsetzbar. Mit einer Lasca können die statischen und dynamischen Rad-Schiene-Kräfte ermittelt und in der Analyse verwendet werden.



Bild 2 Sensor der Laserwaage Lasca

2.3.2 Messpositionen

Um die Rad-Schiene-Kräfte über einen Weg von z.B. 6 Schwellenfächer zu messen, werden je Schiene 6 Sensoren in aufeinanderfolgenden Schwellenfächern angebracht.

2.4 Schotterdruck

2.4.1 Anwendung

Über die detaillierten Beanspruchungen des Schotterbettes im Betriebsgleis und seiner einzelnen Körner ist auch heute noch vergleichsweise wenig bekannt. Im Zusammenhang mit

einer Untersuchung über die Beanspruchung der Beton-Bodenplatte der Oberbauform SYSTEME GRÖTZ BSO/MK hat imb-dynamik erstmals übliche Erddruckmessdosen eingesetzt, um im Betriebsgleis real auftretende Schotterdrücke mit einer flächenmäßig hohen Auflösung unter verschiedensten Bedingungen zu messen [3].

2.4.2 Messpositionen

Wir haben diese Messtechnik bisher an Stellen eingesetzt, wo eine klar definierte Grenzfläche z.B. Schotter : Betonplatte vorhanden war. Damit konnten Schotterpressungen vertikal und horizontal jeweils an der Berandung des Schotterbettes erfasst werden. Innerhalb des Schotterbettes selbst oder auf einer schlecht definierten Auflagefläche ist der Einsatz vermutlich nicht zu empfehlen.

2.4.3 Beispiel für Messergebnis Schotterdruck

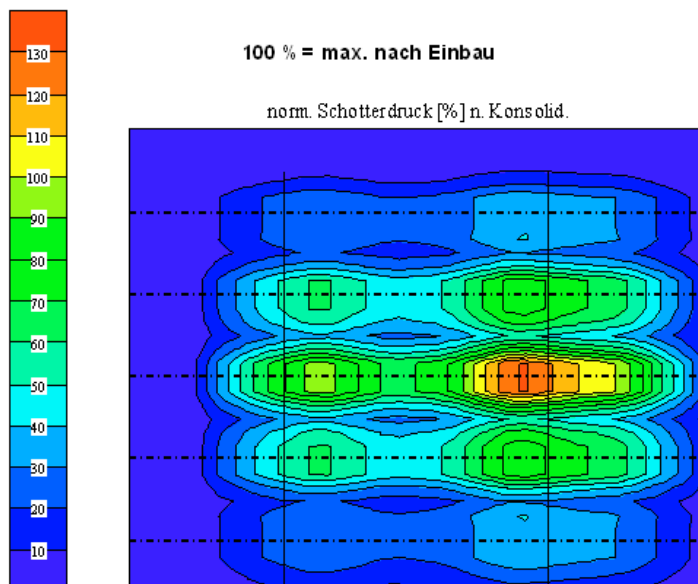


Bild 3 Normierte Schotterdruckverteilung unter einer Achse im Oberbau SYSTEME GRÖTZ BSO/MK nach Konsolidierung (100 % = max. Druckspannung nach Einbau der Geber und neu hergestelltem Schotterbett [3])

2.5 Ergänzende Messmethodiken

2.5.1 Verformungen, Relativwege

Absolute Verformungen – z.B. Einsenkungen der Schiene - mit einem Weggeber direkt zu messen, ist in der Praxis eher selten möglich, da die Anforderung „ruhender Referenzpunkt“ nicht ausreichend erfüllt werden kann. Im üblichen Schottergleis müsste dieser Referenzpunkt mehrere Meter tief gegründet werden. Es gibt weiter Probleme mit den Eigenschwingungen des Trägerpfostens. Außerdem leiden Weggeber ähnlich wie DMS unter den Problemen geringer Dynamik und beschränkten Frequenzbereichs.

Mit gewissen Einschränkungen können Weggeber herangezogen werden, um z.B. die Zusammendrückung von Zwischenlagen oder die Bewegungen von besohnten Schwellen gegenüber dem Schotterbett zu messen. Allerdings lassen sich diese Informationen auch aus den doppelt integrierten Beschleunigungen ermitteln (s.a. Abschnitt 3.3). Aus diesen Gründen setzen wir Weggeber nur in sehr geringem Maße ein.

2.5.2 Temperatur, Sonneneinstrahlung

Die Erfahrungen aus vielen Jahren Messungen haben uns gelehrt, dass Temperaturveränderungen das Gleis massiv beeinflussen. Dabei handelt es sich hauptsächlich um 2 Effekte:

- 1) Elastische Elemente des Gleises (Zwischenlagen, Schwellensolehnen / Schwellenlager, Unterschottermatten bzw. elastische Schichten / Lager) werden in ihren frequenzabhängigen dynamischen Steifigkeiten erheblich durch die Eigentemperaturen beeinflusst.
- 2) Temperaturdifferenzen in der Schwelle bei Sonneneinstrahlung (morgens oben warm, unten kalt → Hohllage in der Schwellenmitte; abends oben kalt, unten warm → Hohllagen unter den Schwellenköpfen) führen zu unterschiedlichem Hohlliegen der Schwellen. Die Stichmaße können dabei ca. 0,5 mm erreichen. Gerade bei relativ harten Zwischenlagen hat dies auf Schiene-Schwelle-Kräfte und das Schwingungsverhalten der Schwelle einen deutlich merkbaren Einfluss.

Insb. wenn es um einen Vergleichsversuch elastischer Elemente geht, müssen daher einige Temperaturen wie die von Luft, Schiene, bzw. von elastischen Elementen mit erfasst werden. Die Messung der Sonneneinstrahlung unterstützt die Analyse.

Temperaturmessungen sind außerdem noch wichtig im Zusammenhang mit Schienentemperaturerhöhungen durch die Wirbelstrombremse, die z.B. beim ICE3 zum Einsatz kommt. Es geht hierbei jedoch nicht um die vertikale Gleisdynamik, sondern vorrangig um die Stabilität des Gleisrostes gegen seitliches Ausknicken.

2.5.3 Luftschall

Durch den Einsatz elastischer Elemente verändert sich nicht nur das Schwingungsverhalten des Gleises, sondern auch der abgestrahlte Luftschall. Da dies von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung sein kann, ist dieser oft mit zu berücksichtigen. Zu der Analyse der Gleisdynamik tragen Luftschallmessungen jedoch eher wenig bei.

3 Analyseverfahren

3.1 Zeitbereichskenngrößen: Maximalwerte, Mittelwerte, Streuungen

Die dynamischen Vorgänge im Gleis sind von Natur aus transient und werden von vielen Zufälligkeiten stark beeinflusst. D.h. aber, dass einzelne Spitzenwerte von physikalischen Größen stark streuen können, selbst bei der Überfahrt ein und desselben Zuges mit gleicher

Fahrgeschwindigkeit. Dies liegt daran, dass sich die Radstellungen geringfügig unterscheiden, der Lauf des einzelnen Rades im Grundriss schwankt (Sinuslauf), eine Störstelle in der Schienenfahrfläche bzw. eine Störstelle auf der Radlaufläche sich einmal bemerkbar machen kann und ein andermal nicht. Messsignale mit Anteilen höherer Frequenzen sind davon stärker betroffen als solche mit Anteilen niedriger Frequenzen. Vereinfacht lässt sich folgende Übersicht zusammenstellen.

Tabelle 1: Empfindlichkeit des Zeitverlaufes physikalischer Größen gegenüber hochfrequenten (teilweise zufälligen) Anteilen

| Empfindlichkeit / Streuungen der Signale | sehr empfindlich = hohe Streuungen | durchschnittlich empfindlich = mittlere Streuungen | wenig empfindlich = geringste Streuungen |
|--|------------------------------------|--|--|
| Verformungen | Beschleunigung | Schwingschnelle | Schwingweg, Zusammendrückung |
| Kräfte | Rad-Schiene-Kraft | Schwelle-Schotter-Kraft | Pressung Unterkante Schotterbett oder darunter |

Dies bedeutet, dass wichtige physikalische Größen von den Zufälligkeiten bei der Vorbeifahrt eines identischen Zuges noch erhebliche Streuungen aufweisen können. Umsomehr ist das der Fall bei Vorbeifahrten von Lokomotiven oder Wagen derselben Bauart, die zwar im großen und ganzen dasselbe Gewicht aufweisen, aber deren Radeigenschaften deutlich unterschiedlich sein können (s. dazu auch Abschnitt 4.2.1). Die Systemidentifikation ist anhand dieser Messergebnisse weniger leicht vorzunehmen als mit der unten beschriebenen Spektralanalyse.

Daher verwenden wir Daten wie Maximalwerte, Mittelwerte und deren Statistik nur in relativ seltenen Fällen. Exemplarisch sei hier nur ein Anwendungsfall dargestellt, nämlich eine Klassierung von Schotterdrücken, die Rückschlüsse auf die Bandbreite der dynamischen Lasteinwirkungen auf das Gleis erlaubt.

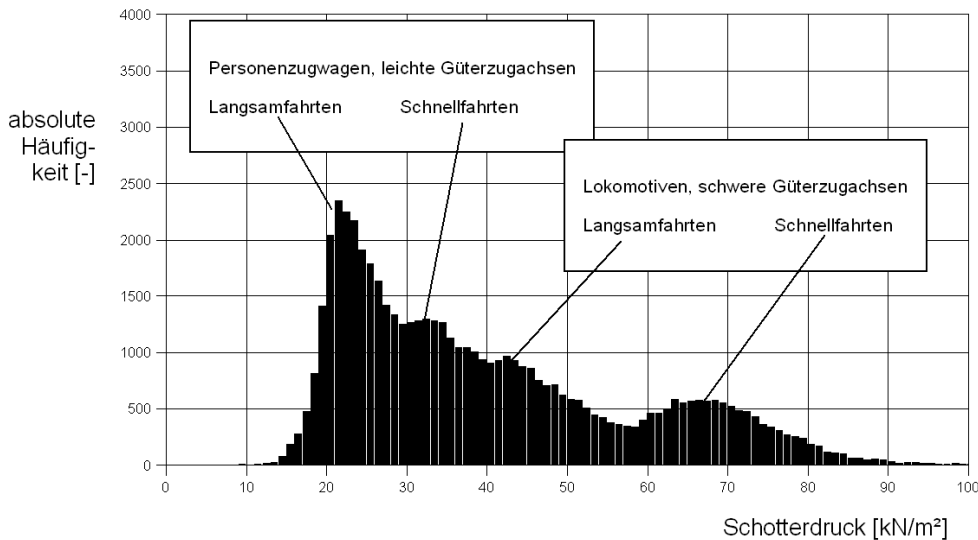


Bild 4 Histogramm der Druckkraft im Schotter unter einem Stützpunkt, maximale Werte je Radübergang

3.2 Lok / Wagen-Trennung

Lok und Wagen unterscheiden sich, was die Gleisdynamik betrifft, in zwei wichtigen Punkten:

- 1) Die Achslasten sind unterschiedlich (typischerweise Lok ca. 20 t/Achse, Reisezugwagen 13 t/Achse, Güterzugwaggon 5 bis 25 t/Achse). Dadurch werden das Gleis bzw. insb. elastische Elemente unterschiedlich stark zusammengepresst, was wiederum zu unterschiedlichem dynamischen Verhalten führt.
- 2) Die unabgefederten Massen (Räder + Achswelle + Lager + Anteil Federung) sind unterschiedlich. Dadurch verändert sich die so genannte Radsatz-Oberbau-Resonanzfrequenz und die gesamte vertikale Dynamik.

Daher trennen wir bei gleisdynamischen Analysen grundsätzlich nach den zu Lok bzw. Wagen gehörenden Signalanteilen.

3.3 Doppelintegration für Schwingwege

Die zu lösende Hauptaufgabe bei der doppelten Integration von Beschleunigungen zu Schwingwegen ist, eine möglichst grundgeräuschfreie Messung und Aufzeichnung der Messsignale zu erreichen. Das zu messende Beschleunigungssignal wird von den hochfrequenten Anteilen um z.B. 1 - 2 kHz bestimmt. Die Messkette muss auf diese hohen Beschleunigungen – z.B. bei der Schiene bis zu 3000 m/s² - ausgereicht werden. Besonders störend sind hier schlechte Räder oder eine schlechte Schienenfahrfläche. Maßgebend für die Einsenkungen sind aber die tieffrequenten Anteile im Frequenzbereich bis zu ca. 40 Hz, deren absolute Größe oft deutlich weniger als 10 m/s² beträgt. Nur wenn auch noch diese Anteile im gemessenen Signal mit einem ausreichenden Grundgeräuschabstand vorhanden sind und aufgezeichnet werden, ist eine zuverlässige doppelte Integration möglich. Daraus

folgt auch sofort, dass dieses Verfahren um so einfacher angewandt werden kann, je weiter die Messposition von der Rad-Schiene-Kontaktstelle entfernt ist und je höher die Fahrgeschwindigkeit ist.

Aber auch, wenn diese Bedingungen gut erfüllt sind, ist häufig noch ein weiterer Kunstgriff erforderlich. Es wird angenommen, dass die Einsenkungen unter der Fahrzeugmitte gleich Null sind. Damit gelingt es, so genannte Drifteffekte der Messkette zu beseitigen. Diese Annahme konnte in allen bisher untersuchten Fällen getroffen werden. Sie wäre nicht zulässig bei extrem weichen Untergründen, wie sie z.B. in Schweden vorkommen, oder auf sehr hohen Dämmen. Ein Nachweis des Funktionierens dieses Verfahrens ist in [4] geführt.

3.4 Spektrale Analysen

3.4.1 Warum spektrale Analysen, und warum gerade Terzspektren?

Im Gegensatz zu der einfachen Betrachtung von Einzahlwerten wie Maximum oder Mittelwert ermöglicht die spektrale Analyse sehr viel weiter gehende Einblicke in das dynamische Verhalten eines schwingungsfähigen Systems. Sie ist dem Fahrzeug-Fahrweg-System deswegen angemessen, weil praktisch alle Bestandteile frequenzabhängige Eigenschaften haben.

Frequenzanalyse bedeutet, dass wir einen gemessenen Zeitverlauf daraufhin ansehen, welche „Energie“ in welchem Frequenzband steckt. Als Beispiel für einen realen Analysator möge unser Gehör dienen, das einen gehörten Klang hervorragend analysiert und uns zu beurteilen erlaubt, ob es tief- oder hochfrequente Anteile gibt, wie laut diese jeweils sind (identisch mit dem Energiegehalt), ob es sich um eine Konsonanz oder Dissonanz handelt etc.. Die erste Auswahl, die man für die Analyse treffen muss, ist, ob man so genannte Schmalband- (bzw. Spektren mit konstanter absoluter Bandbreite) oder Terzspektren (bzw. Spektren mit konstanter relativer Bandbreite) heranzieht. (Der Sonderfall der Wavelet-Analyse bleibe hier außer Acht). Dies ist eine sehr wichtige Fallunterscheidung. Während in der Entwicklungsgeschichte der Signalanalyse zunächst praktisch nur Oktav-, Terz-, 1/12-Oktav, 1/24-Oktav-Spektren verwendet wurden, hat sich mit dem Aufkommen der digitalen Signalverarbeitung die Fast-Fourier-Transformation (FFT von Cooley-Tukey) stark verbreitet. Die FFT ist rechentechnisch extrem viel einfacher zu realisieren und sehr viel schneller als z.B. eine Terz-Analyse. Dennoch gibt es nach unserer Meinung sehr gute Gründe, bei der Terz-Analyse zu bleiben:

- 1) Das Zeitsignal der physikalischen Größen im Gleis ist immer transient, nicht stationär. (Dies ist im Fahrzeug anders, wo die z.B. Radumdrehungsfrequenz und deren ganzzahlige Vielfache bestimmende Größen sind.)

- 2) Die Zusammensetzung der Erregergrößen für die Gleisdynamik ist nicht: eine Grundfrequenz und deren 2-, 3-, 4-fache, n-fache Harmonische, sondern sie ist - aufgrund der Fahrzeug- und der Gleisgeometrie – beliebig über den Frequenzbereich verteilt.
- 3) Bei dem Fahrzeug-Fahrweg-System gibt es Eigenresonanzen und Erregerfrequenzen. In diesem Zusammenhang kommt es stets auf den Quotienten Erregerfrequenz : Eigenfrequenz an, nicht auf deren absolute Differenz. Dieser Sachverhalt wird nur durch die Analyse mit konstanter relativer Bandbreite angemessen wiedergegeben.
- 4) Die Schmalbandanalyse zeigt im unteren Frequenzbereich ein zu grobes Bild, im oberen Frequenzbereich ist sie viel zu detailliert und täuscht einen Informationsgehalt vor, der einfach nicht da ist. Kleine Schwankungen im Signal führen dazu, dass spektrale Anteile mal in die eine, mal in die benachbarte Linie fallen. Damit geraten dargestellte Schmalbandspektren sehr leicht unübersichtlich. Der Vergleich von mehr als zwei oder drei Grafen in einem Diagramm ist schwer möglich.
- 5) Bei der Schmalbandanalyse neigt man leicht dazu, eine zu hohe Linienanzahl zu wählen. Z.B bei einer Bandbreite von 5 Hz und einem Analysebereich 0 Hz bis 1000 Hz ergeben sich 201 Linien. Dabei ist es im Gleis doch fast völlig egal, ob eine bestimmte Einwirkung mit 990 oder mit 995 Hz erfolgt, es macht jedoch möglicherweise schon etwas aus, ob eine Einwirkung mit 6 oder mit 9 Hz erfolgt. Letzere würden jedoch in eine Linie fallen.
- 6) Die Anzahl der Linien beträgt bei einer Terzanalyse für 1 Hz bis 1000 Hz 31 Stück. Dies ist eine überschaubare Anzahl und den realen Streuungen sehr gut angemessen. Die Darstellung von z.B. 10 Zugfahrten in einem Diagramm ist problemlos möglich. Eine Oktavanalyse ist zu grob, und eine 1/12-Oktav-Analyse mit 121 Linien für denselben Frequenzbereich in der Regel schon wieder zu fein. Man bedenke auch, dass es sich bei dem Oberbau um ein relativ stark gedämpftes System handelt (von Ausnahmen abgesehen), daher sind Resonanzen nicht als scharfe Spitzen in Spektren zu identifizieren sondern eher als „breite Buckel“ (s.a. Abschnitt 4.2.3).

4 Anwendung

4.1 Direkte Verwendung von Einsenkungen, Zusammendrückungen

Diese Zahlenwerte werden gelegentlich benötigt, wenn etwa nachgewiesen werden soll, dass ein Oberbau eine bestimmte Schieneneinsenkung oder eine Zwischenplatte eine bestimmte Zusammendrückung aufweist. Diese Prüfung – oft mit einer mechanischen Messuhr statisch vorgenommen – verwendet man als einfachen Nachweis des Funktionierens eines Oberbaus mit elastischen Elementen, der etwa zu Emissionsschutzzwecken eingebaut wurde, oder um Alterungseffekte der elastischen Elemente zu überprüfen. Wenn dynamische Messungen vorgenommen werden, ist die spektrale Analyse die Regel.

4.2 Was man aus Spektren lernen kann: Beispiele für spektrale Analysen

4.2.1 Beispiel 1: Vergleich von Zugfahrten gleicher Gattung, aber mit unterschiedlichen Radunrundheiten

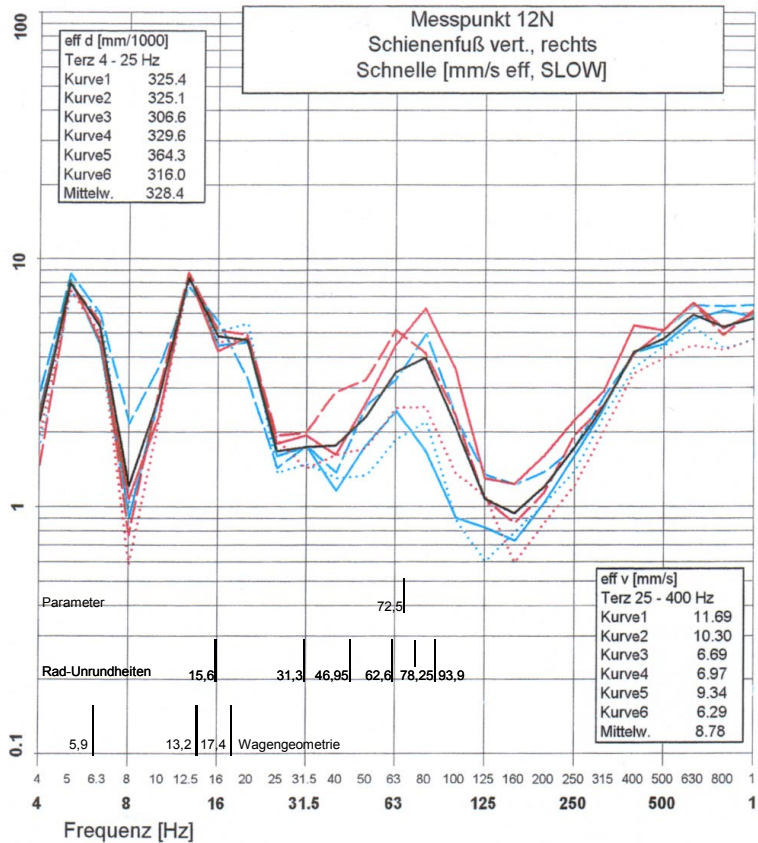


Bild 5 Schwingschnellespektren [mm/s eff], Messpunkt Schiene vertikal, ICE, unterschiedliche Radunrundheiten

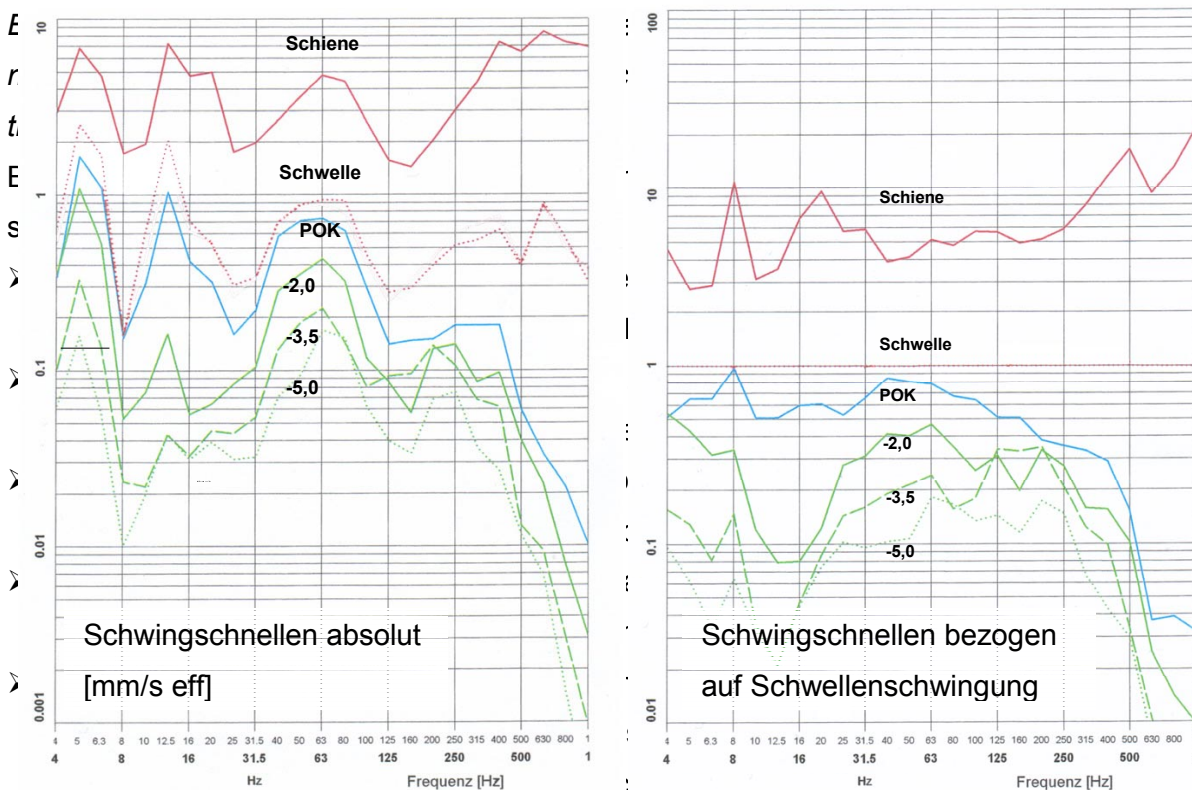
Dargestellt sind 6 ausgewählte IC-Zugfahrten mit 153 bis 160, im Mittel 156,5 km/h sowie (dick durchgezogen) das energetische Mittel. Charakteristische Anregungsfrequenzen sind eingezeichnet. In den eingefügten Kästen sind energetische Summen über die angegebenen Frequenzbereiche genannt, die bei der Analyse zahlenmäßig unterstützen.

Analyse:

- Bis 25 Hz verlaufen die Spektren nahezu deckungsgleich (Zahlen im linken Kasten). Die noch vorhandenen Unterschiede sind auf geringe Fahrgeschwindigkeitsunterschiede zurückzuführen. In diesem niederfrequenten Bereich herrscht quasistatisches Verhalten vor. Die spektrale Struktur ist geprägt von den vorbeifahrenden Einsenkungsmulden der einzelnen gleich schweren Achsen (Kraftanregung) mit sich wiederholenden gleichen Abständen. Entsprechend lassen sich die spektralen Peaks Achsabständen zuordnen (Drehgestellabstand 7,40 m entsprechend 5,9 Hz, Achsabstände: 3,30 m im Mittel über eine Drehgestellgruppe bzw. 2,50 m im Drehgestell entsprechend 13,2 bzw. 17,4 Hz).

- Von 25 Hz bis 250 Hz streuen die Spektren stark. In diesem mittelfrequenten Bereich herrscht dynamisches Verhalten, die Radsatz-Oberbau-Resonanz liegt in diesem Bereich. Die spektrale Struktur ist geprägt von den Imperfektionen der Laufflächen (Differenzweganregung). Die Streuung der Spektren beweist, dass der dominante Anregungsbestandteil von den Rädern stammt (Radunrundheiten bei Vielfachen von 15,65 Hz). Der fahrwegseitige Anregungsanteil (zu dem auch die Parameteranregung bei 72,5 Hz entsprechend dem Schwellenabstand 0,6 m gehört) ist kleiner bzw. maximal gleich der unteren Einhüllenden der Spektren. D.h. aber, dass die Parameteranregung selbst von den vergleichsweise „runden“ IC-Rädern schon „übertönt“ wird.
- Ab 250 Hz nimmt die spektrale Streuung wieder ab. In diesem hochfrequenten Bereich sind die schienenseitigen Weganregungen (Riffel, Schlupfwellen, Schweißstöße, Schleuderstellen usw.) meist pegelbestimmend.

4.2.2 Beispiel 2: Gleis im vertikalen Querschnitt, Absolutpegel und Übertragungsfunktionen



ak infolge der großen elastischen Länge der Schiene (Durchlaufwirkung). Anschließend verläuft die ÜF Schiene/Schwelle relativ konstant (die Radsatz-Oberbau-Resonanz ist in der ÜF nicht sichtbar) und steigt ab 250 Hz infolge der zunehmenden Massenimpedanz

der Schwelle stark an. Die Schwelle kann den hochfrequenten Schwingungen aufgrund ihrer großen Trägheit nicht mehr folgen.

- Von 6,3 bis 20 Hz zeigen die ÜF Schwelle/Untergrund infolge der quasistatischen Lastverteilung im Dammkörper ein breites Minimum. Bei den Frequenzen darüber führt die Schwingungseinleitung und -ausbreitung im Damm zu höheren ÜF-Werten für die Untergrundmesspunkte.
- Ab 400 Hz besteht eine sehr starke Entkopplung der Untergrundmesspunkte infolge der Bodendämpfung.

4.2.3 Beispiel 3: Fahrgeschwindigkeitsstaffelung

Dargestellt sind (Bild 7 nächste Seite) für den Messpunkt Schienenfuß vertikal rechts Versuchszugfahrten mit gestaffelten Geschwindigkeiten von 200 bis 330 km/h.

- Im gesamten Frequenzbereich zeigt sich deutlich eine Rechtsverschiebung der spektralen Strukturen proportional mit der Fahrgeschwindigkeit.
- Im tieffrequenten Bereich bis ca. 40 Hz erfolgt gleichzeitig eine geschwindigkeitsproportionale Zunahme der Schnellepegel. Die linken drei Pfeile zeigen diese „quasistatische“ Reaktion an: Die der Schiene durch die Radkräfte eingeprägte Biegelinie wird nur mit zunehmender Geschwindigkeit an der Messstelle vorbeigeführt. Die Einsenkungen bleiben praktisch gleich, aber die Schwingschnellen nehmen frequenzproportional zu. Die Steigung der Pfeile beträgt Faktor 10 je Frequenzdekade.
- Im mittelfrequenten Bereich erfolgt bis 63 Hz eine überproportionale Zunahme und anschließend eine Abnahme der Schnellepegel. Dieser Verlauf ist durch den gebrochenen Pfeil nachvollzogen.
- Dies ist auf einen Resonanzeffekt zurückzuführen: Es handelt sich um die so genannte Radsatz-Oberbau-Frequenz, die in diesem Fall bei ca. 63 Hz zu liegen kommt.

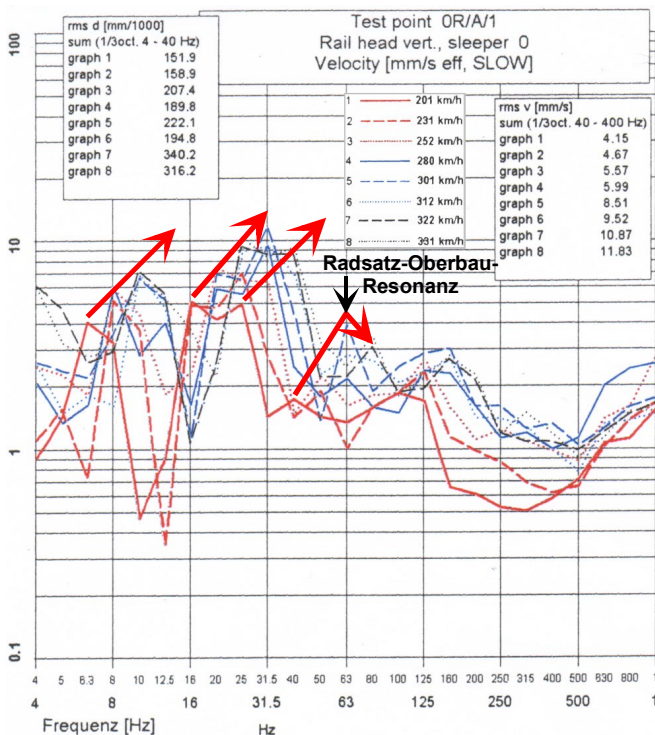


Bild 7 Beispiel für Spektren der Schwingschnelle [mm/s eff], Schiene vertikal, für gestaffelte Fahrgeschwindigkeit

4.3 Systemidentifikation und theoretische Analysen

Eine Hauptanwendung der gewonnenen Spektren ist die Identifikation von Systemparametern des Oberbaus zum Zweck der Nachrechnung, Prognose, Variantenuntersuchung u.ä.. Hierfür wurde das imb-dynamik-Simulationswerkzeug iSi geschaffen, das die vertikale Dynamik von Fahrzeug und Fahrweg angemessen nachbildet.

Aufgrund vieljähriger messtechnischer Untersuchungen und Erfahrungen wurde die in Bild 8 (nächste Seite) dargestellte Modellierung gewählt. Das Modell gestattet die Berechnung von Spektren unter exakt den gleichen Randbedingungen, wie sie im Gleis anzutreffen sind, sowie die Nachbildung aller Anregungsmechanismen aus dem Fahrzeug. Die optimale Anpassung zwischen den real vorhandenen Parametern und den im Modell verwendeten Größen ist dann erreicht, wenn nicht nur Einsenkungen, sondern die Schnellespektren der verschiedenen Systemkomponenten weitestmöglich übereinstimmen.

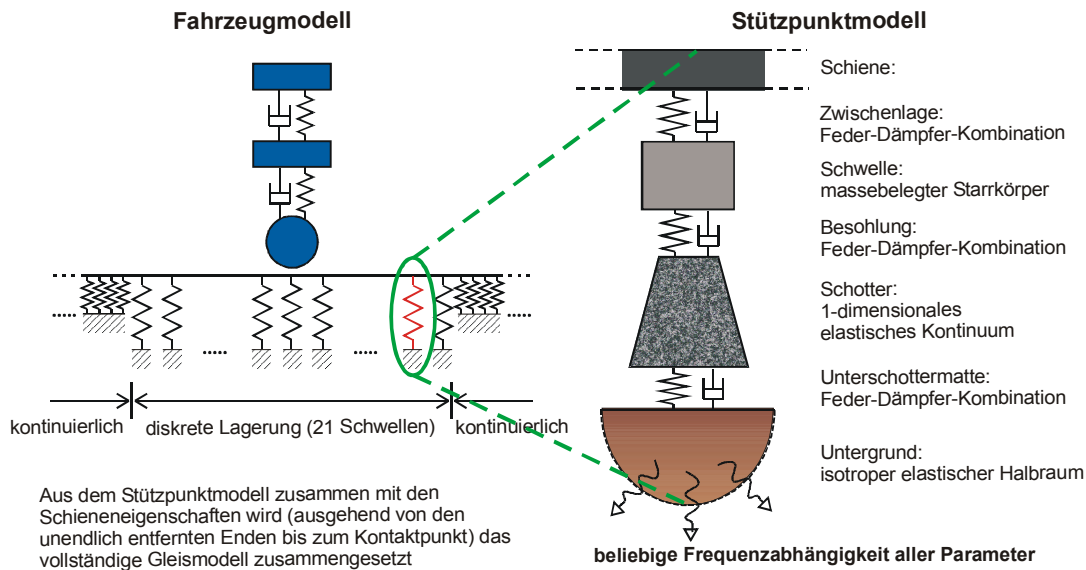


Bild 8 imb-dynamik Fahrzeug-Fahrweg-Simulation iSi-SchO für Schotteroberbau, schematischer Aufbau [6]

Das solchermaßen optimierte Rechenmodell kann dann zu vielfältigen Zwecken herangezogen werden, wobei sich in unserem Haus Untersuchungen vorwiegend auf den Einsatz von elastischen Elementen im Oberbau beziehen. Eine Hauptaufgabe ist z.B. die Ermittlung sogenannter Einfügungsdämmungen, also die Prognose der spektralen Veränderungen von Erschütterungsemissionen infolge einer (beliebigen) Modifikation des Gleises [4, 5].

5 Literatur

- [1] www.imb-dynamik.de
- [2] www.innotec-eu.de
- [3] Müller-Boruttau, Frank H.; Rosenthal, Volker; Breitsamter, Norbert: So trägt der Schotter Lasten ab - Messungen in situ am Oberbau SYSTEME GRÖTZ BSO/MK. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, Nov. 2001
- [4] Müller-Boruttau, Frank H.; Kleinert, Ullrich: Betonschwellen mit elastischer Sohle Erfahrungen und Erkenntnisse mit einem neuen Bauteil. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, März 2001
- [5] Müller-Boruttau, Frank H.; Breitsamter, Norbert: Elastische Gleiskomponenten verringern die dynamische Unterbau- und Untergrundbeanspruchung, EI-Eisenbahningenieur, Jan. 2001
- [6] Schienenverkehrswege / Fachinformationen: www.imb-dynamik.de

