

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Huber, Gerhard

Ein Beitrag zur Erschütterungsausbreitung bei Zügen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102779>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Huber, Gerhard (1995): Ein Beitrag zur Erschütterungsausbreitung bei Zügen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 72. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 79-92.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Ein Beitrag zur Erschütterungsausbreitung bei Zügen

Gerhard Huber

Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe

Zusammenfassung

Die Erschütterungen abseits des Gleises können durch die Berücksichtigung kleiner stochastischer Schwankungen der dynamischen Materialeigenschaften, beispielsweise der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen, im Boden erklärt werden. Diese Annahmen im Modell werden durch Messungen bestätigt. Erschütterungen von fahrenden Zügen führen bei Anwohnern an Bahnstrecken oft zu erheblichen Belästigungen. Um diese Belästigungen minimieren zu können, ist es notwendig die Ursachen der Entstehung von Erschütterungen zu kennen. Für die Entstehung der Erschütterungen wird üblicherweise der Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene betrachtet. Danach sind vor allem Unebenheiten von Schienen- und Radlaufflächen, Steifeschwankungen (parametrische Erregung), Systemresonanzen der Fahrzeuge und Unwuchten des drehenden Rades Massenkraftanregung wesentliche Ursachen für die Entstehung der Erschütterungen (z.B. Heckl, M.; Müller, H. A., 1994).

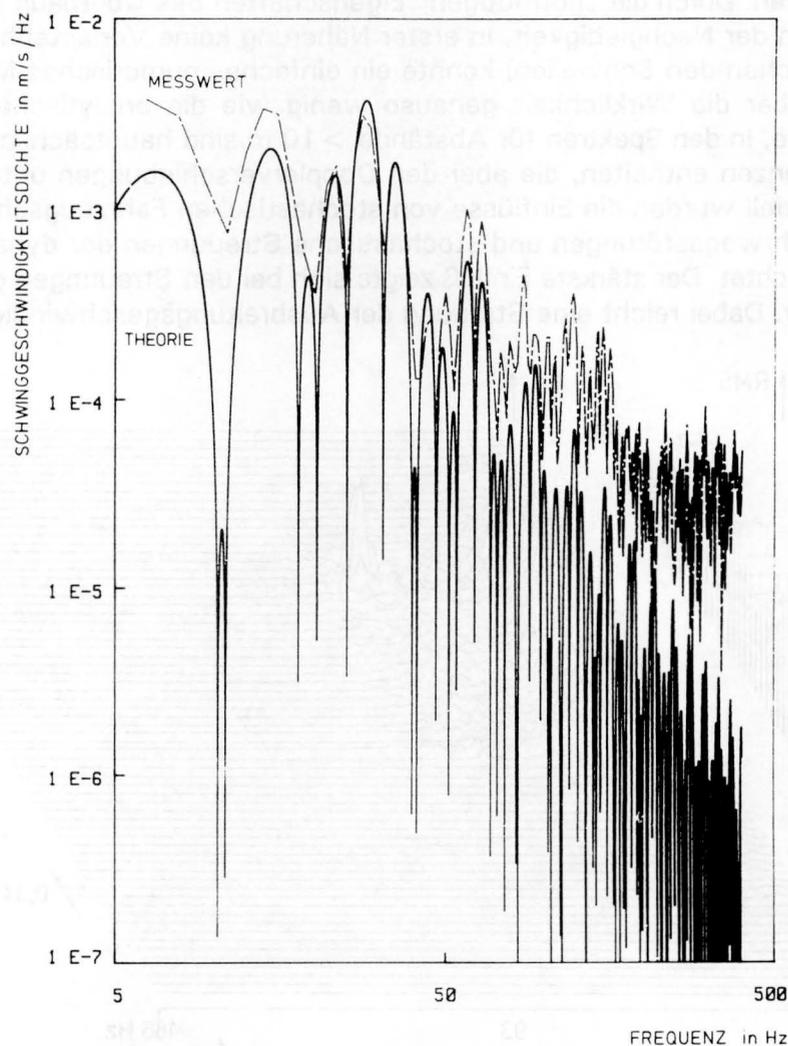


Bild 1 Theoretische und gemessene Schwingungsgeschwindigkeitsdichte bei Überfahrt einer Lok 103 mit $v = 250$ km/h. Bezugsort: Schwelle

In diesem Betrag besitzen Gleis, Oberbau und Fahrzeug keine Fehlstellen. Betrachten wir zunächst die Überfahrt über eine Schwelle. Ausgehend von einer elastisch gebetteten Schiene kann das Spektrum bei der Überfahrt abgeschätzt und mit einem gemessenen Spektrum verglichen werden (Prange et. al., 1980) (Bild1). In der Abschätzung bestimmt die Form der Einsenkung der Schwelle die Einhüllende des Spektrums; die Anordnung der Lasten führt zu den Einbrüchen (theoretisch Nullstellen) im Spektrum. Auch die Berücksichtigung der Biegelinie bei hohen Fahrgeschwindigkeiten (Triantafyllidis, Th. und Prange B., 1994) führt bezüglich der Erschütterungen zu keinen wesentlichen Änderungen.

Für eine mit konstanter Geschwindigkeit bewegte Einzellast auf der Halbraumoberfläche gibt Payton (1964) für den Vertikalanteil eine geschlossene Lösung an. Die dabei beobachteten Frequenzanteile für Abstände > 10 m liegen weit unterhalb des mit üblichen Miniaturgeophonen meßbaren Frequenzbereichs. Das gleiche Problem löst Lansing (1965) mit einer für Bahnzwecke passenden Vorgehensweise. Er betrachtet, anstelle einer mit konstanter Geschwindigkeit v bewegten Last, in konstantem Abstand Δx entlang der x -Achse örtlich verteilte Lastpulse $\delta(t - i \cdot \Delta x / v)$, die auf die Oberfläche des Halbraums am Punkt i mit dem Zeitversatz $i \cdot \Delta x / v$ aufgesetzt werden. Die Wirkung an jedem Punkt der Oberfläche zu jedem Zeitpunkt ergibt sich aus der Superposition über die Wirkungen aller Pulse. Für den Grenzübergang $\Delta x \rightarrow 0$, geht diese Lösung in die Lösung von Payton über. Die in konstantem Abstand Δx angeordneten Punkte können als idealisierte Lasteinleitungspunkte betrachtet werden. Durch die „gutmütigen“ Eigenschaften des Oberbaus (keine Resonanzüberhöhungen in der Nachgiebigkeit, in erster Näherung keine Vorlastabhängigkeit bei der Kopplung zwischen den Schwellen) konnte ein einfaches numerisches Modell entwickelt werden, das aber die Wirklichkeit genauso wenig wie die analytischen Lösungen beschreiben konnte. In den Spektren für Abstände > 10 m sind hauptsächlich die Schwellenabstandsfrequenzen enthalten, die aber den Dopplerverschiebungen unterworfen waren. Mit diesem Modell wurden die Einflüsse von stochastischen Fahrzeugschwingungen, stochastischen Fahrwegstörungen und stochastische Streuungen der dynamischen Bodenparameter betrachtet. Der stärkste Einfluß zeigte sich bei den Streuungen der dynamischen Bodenparameter. Dabei reicht eine Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Prozent-

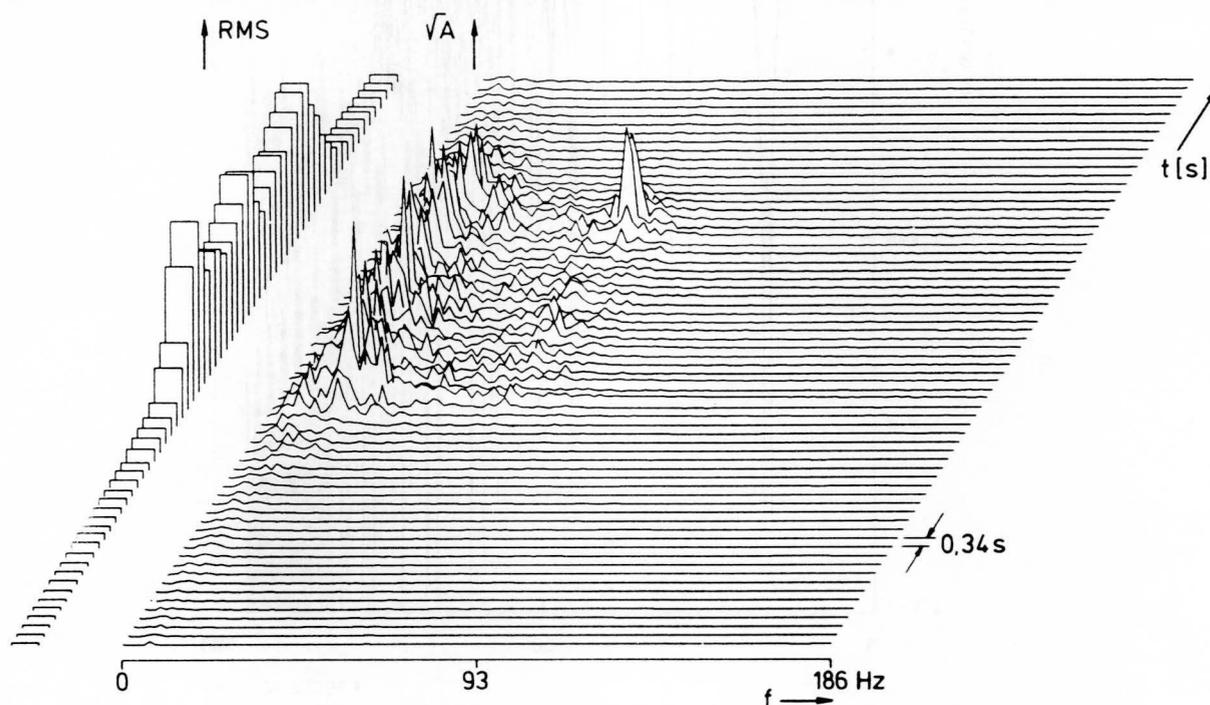


Bild 2 Zeitvariante Leistungsdichtespektren und Effektivwertverlauf der Schwinggeschwindigkeit eines IC-Zuges (Lok 103 mit 11 Wagen und einem Speisewagen) mit $v = 45.3$ m/s im Abstand von 24 m

bereich aus, den aus gemessenen Spektren bekannten Verlauf wiederzufinden. Ein Boden mit derart geringen Streuungen ist in bodenmechanischer Betrachtungsweise als homogen zu bezeichnen. Bild 2 zeigt die Spektren eines realen Zuges in Wasserfalldarstellung (Zeitausschnitte mit 50 % Überlappung). Bild 3 gibt in gleicher Darstellung ein Ergebnis der Modellrechnung für eine Lastenverteilung entsprechend der Lok 103 wieder.

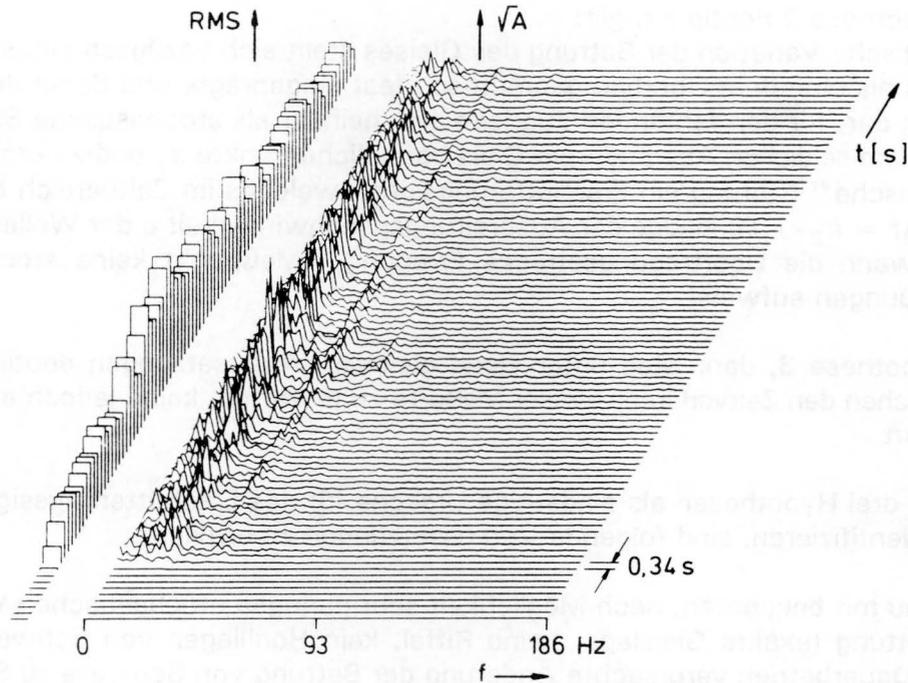


Bild 3 Zeitvariante Leistungsdichtespektren und Effektivwertverlauf der Schwinggeschwindigkeit, vertikal, 6 Einzellasten entsprechend einer Lok 103, Abstand $y_B = 24$ m, Geschwindigkeit $v = 44.4$ m/s, Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle $c_R = 180$ m/s, Standardabweichung der Ausbreitungsgeschwindigkeit $0.028 c_R$

Meßtechnischer Nachweis

Der anhand des einfachen numerischen Modells gefundene starke Einfluß der Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit muß durch Messungen verifizierbar sein. Es soll hier anhand grundsätzlicher Überlegungen eine Meßanordnung gesucht werden, die es gestattet, die aufgestellten Hypothesen über die Ursachen der speziellen Form der Erschütterungsspektren gegeneinander abzuwägen.

Für die Entstehung von Erschütterungen bei schnellfahrenden Zügen wurden folgende Hypothesen genannt:

1. stochastische Fahrzeugschwingungen
2. stochastische Variation der Bettung des Gleises
3. stochastische Streuung der Untergrundparameter

Falls die Hypothese 1 richtig ist, dürfen bei zwei Überfahrten mit identischen Bedingungen (identisches Fahrzeug, Geschwindigkeit, Gleis, Messort, Fahrtrichtung) die Zeitverläufe nicht identisch sein, da es sich um stochastische Fahrzeugschwingungen handelt.

Sind die Hypothesen 2 oder 3 gültig, so kann das System Fahrweg/Übertragungsstrecke Untergrund als zeitinvariant betrachtet werden. Diese Annahme erfordert, daß die Fahrten in kurzem zeitlichen Abstand nacheinander erfolgen und Veränderungen am Oberbau, wie sie nach sehr vielen Lastwechseln auftreten, nicht eingetreten sind. Die Trennung der beiden möglichen Ursachen ist nach folgender Überlegung möglich.

Falls die Hypothese 2 richtig ist, gilt:

Eine stochastische Variation der Bettung des Gleises stellt sich bezüglich eines ortsfesten Beobachters als eine dem Oberbau geometrisch fest eingeprägte und damit deterministische Störung dar, für den fahrenden Zug jedoch scheinbar als stochastische Störung. Für zwei in gleichem seitlichen Abstand vom Gleis befindliche Punkte x_1 und x_2 ergibt die o.g. „deterministische“ Störung ein Erschütterungssignal, welches im Zeitbereich bis auf den Zeitversatz $\Delta t = (r_2 - r_1)/c$ infolge der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Wellen identisch sein muß, wenn die Übertragungsstrecke Erregung - Meßpunkt keine stochastischen Laufzeitstreuungen aufweist.

Gilt die Hypothese 3, dann sind unter sonst gleichen Voraussetzungen deutliche Unterschiede zwischen den Zeitverläufen zweier Meßorte zu erwarten, keine jedoch am gleichen Beobachterort.

Um eine der drei Hypothesen als eindeutige Ursache für das Erschütterungssignal experimentell zu identifizieren, sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- a) Oberbau mit bekannten, nach Möglichkeit sehr geringen stochastischen Variationen der Bettung (exakte Gleislage, keine Riffel, kein Hohlliegen von Schwellen, keine durch Dauerbetrieb verursachte Änderung der Bettung von Schwelle zu Schwelle)
- b) Vorbeifahrten identischer Fahrzeuge
- c) Vorbeifahrten mit jeweils gleicher Fahrgeschwindigkeit
- d) Vorbeifahrten jeweils auf demselben Gleis
- e) Vorbeifahrten in derselben Fahrtrichtung
- f) exakte Identifikation der Radaufstandspunkte zum Zweck der Synchronisation der jeweiligen Vorbeifahrten.

Aus der großen Zahl von Bahnerschütterungsdatensätzen, die am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik vorhanden sind, erfüllten nur zwei die genannten Voraussetzungen, insbesondere die Synchronisationsbedingungen.

Im Betriebsgleis der Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart km 18,2084 waren die genannten Voraussetzungen erfüllt, außerdem wurde dort erstmals das am IBF entwickelte Gerät zur Ortung des Radaufstandspunkts eingesetzt (Prange et al., 1994). Der Radaufstandspunkt kann mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern lokalisiert werden. Die exakte Synchronisierung der Zeitsignale wurde dadurch erreicht.

In diesem Teil der Neubaustrecke besteht der Fahrweg aus dem konventionellen Schotteroberbau (Schwelle B70W, Schiene UIC60). Die Meßdaten wurden bei der Überfahrt eines ICE-Zuges gewonnen. Die Anordnung der Aufnehmer ist in Bild 4 dargestellt.

Bild 4 zeigt das Achspositionssignal der ersten Achse des Zuges, das bei den beiden Überfahrten den Bezug für die Zeitverläufe der Geophonsignale in den nachfolgenden Bildern herstellt. Aus der Zeitdifferenz der Achspositionssignale der ersten und der letzten Achse des Zuges wird mit den gegebenen Achsabständen des Zuges die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Die Fahrgeschwindigkeit betrug bei der ersten Vorbeifahrt 197.54 km/h und bei der zweiten Vorbeifahrt 197.91 km/h.

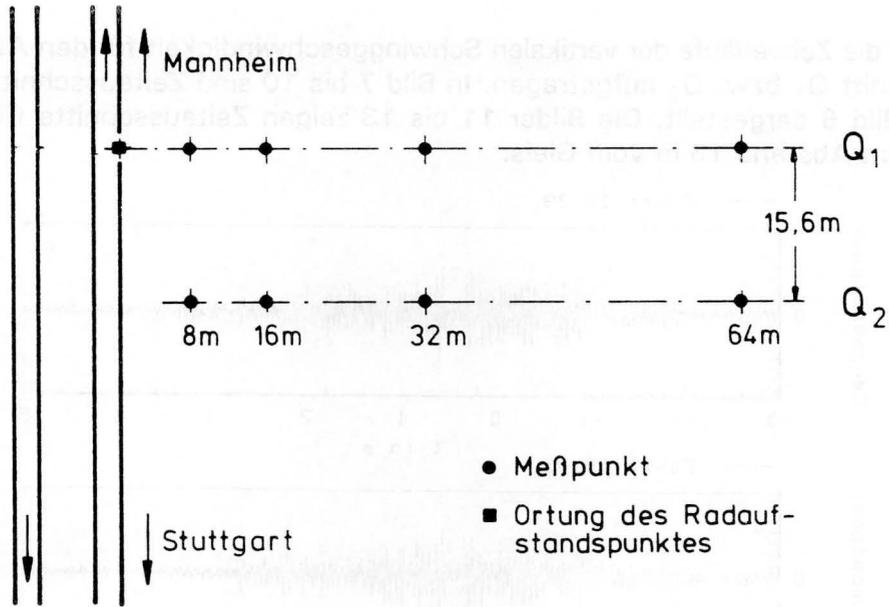


Bild 4 Meßaufbau an Querschnitt Q_1 und Q_2
Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart, km 18,2084

Der im unteren Teil von Bild 5 dargestellte Zeitversatz der letzten Achse des Zuges von 3.7 ms folgt aus den unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten bei den beiden Überfahrten.

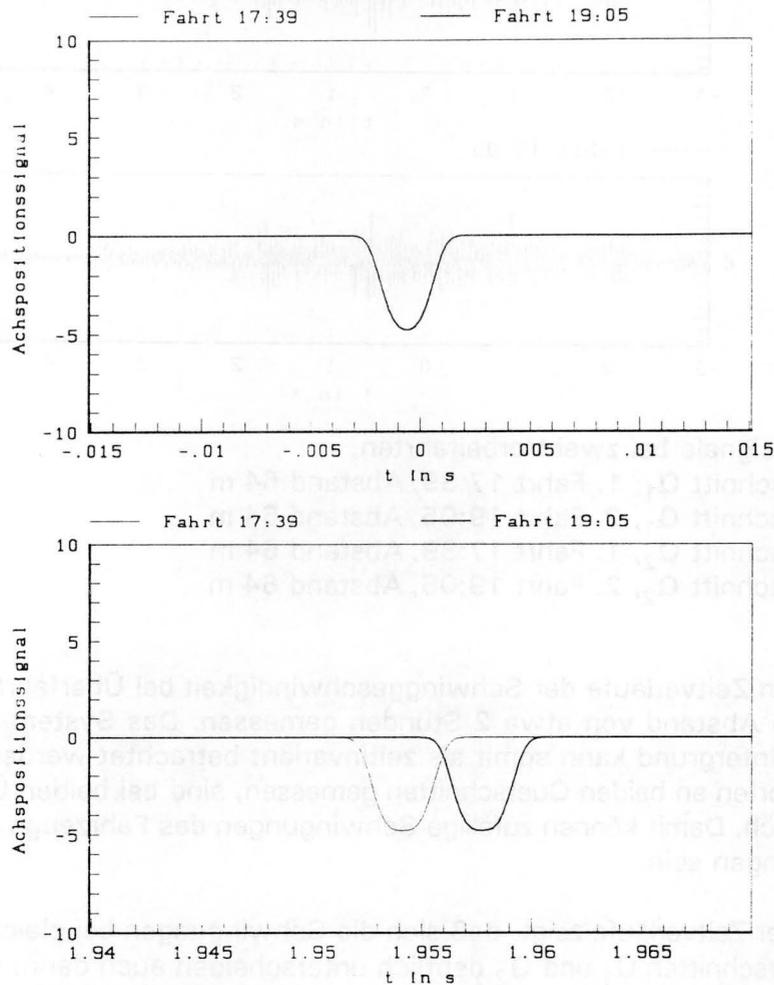


Bild 5 Achspositionssignale bei zwei Überfahrten,
oben: erste Achse des Zuges; unten: letzte Achse des Zuges

In Bild 6 sind die Zeitverläufe der vertikalen Schwinggeschwindigkeit für den Abstand 64 m bei Querschnitt Q₁ bzw. Q₂ aufgetragen. In Bild 7 bis 10 sind Zeitausschnitte von 0.5 s Dauer aus Bild 6 dargestellt. Die Bilder 11 bis 13 zeigen Zeitausschnitte für die beiden Meßpunkte im Abstand 16 m vom Gleis.

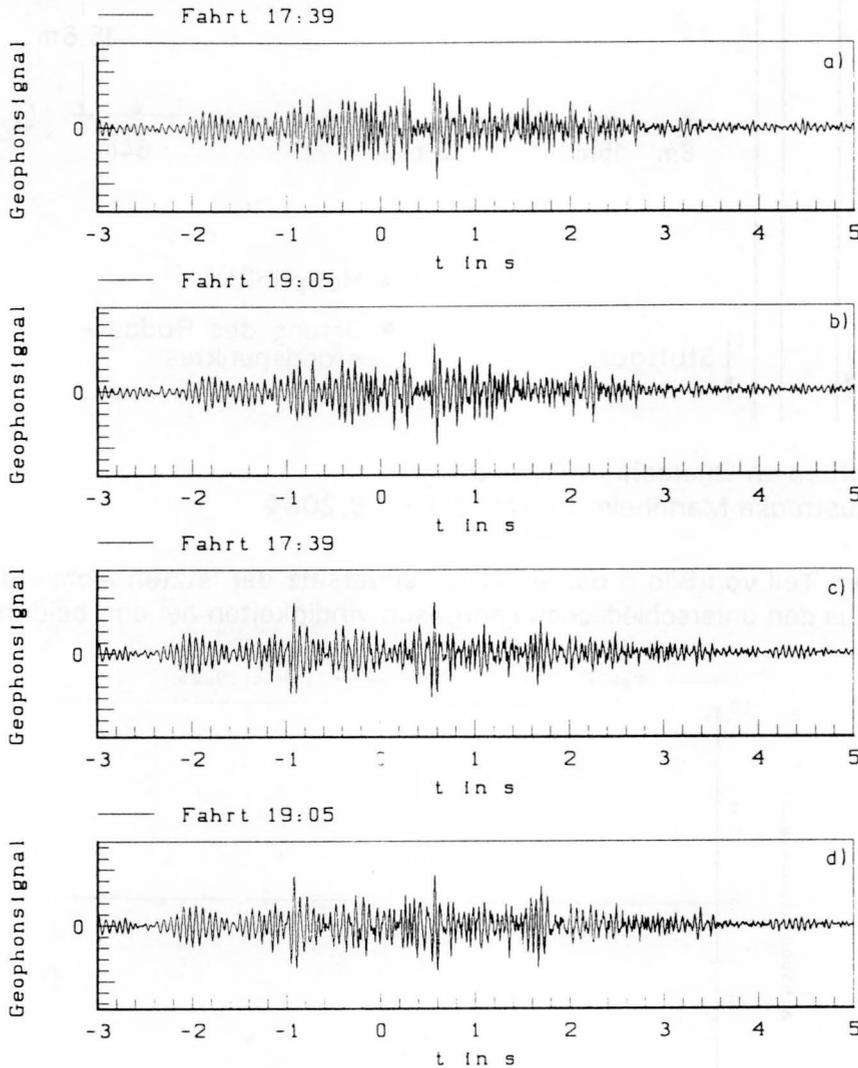


Bild 6 Geophonsignale bei zwei Vorbeifahrten,
 a) Querschnitt Q₁, 1. Fahrt 17:39, Abstand 64 m
 b) Querschnitt Q₁, 2. Fahrt 19:05, Abstand 64 m
 c) Querschnitt Q₂, 1. Fahrt 17:39, Abstand 64 m
 d) Querschnitt Q₂, 2. Fahrt 19:05, Abstand 64 m

Die dargestellten Zeitverläufe der Schwinggeschwindigkeit bei Überfahrten desselben Zuges wurden im Abstand von etwa 2 Stunden gemessen. Das System Fahrweg/Übertragungsstrecke Untergrund kann somit als zeitinvariant betrachtet werden. Die Kurven, an denselben Meßorten an beiden Querschnitten gemessen, sind bei beiden Überfahrten nahezu deckungsgleich. Damit können zufällige Schwingungen des Fahrzeugs nicht die Ursache für Erschütterungen sein.

Der Vergleich der Zeitverläufe zeigt, daß sich die Schwingungen bei gleichen Abständen in den beiden Querschnitten Q₁ und Q₂ deutlich unterscheiden auch dann, wenn der Zeitversatz durch den Abstand zwischen Q₁ und Q₂ von $15.6 \cdot 3.6 / 197.7 \text{ s} = 0.284 \text{ s}$ berücksichtigt wird. Das gilt für alle Abstände y seitlich vom Gleis. Mit wachsender Entfernung der Meßpunkte vom Gleis nehmen die verbleibenden Unterschiede immer mehr ab.

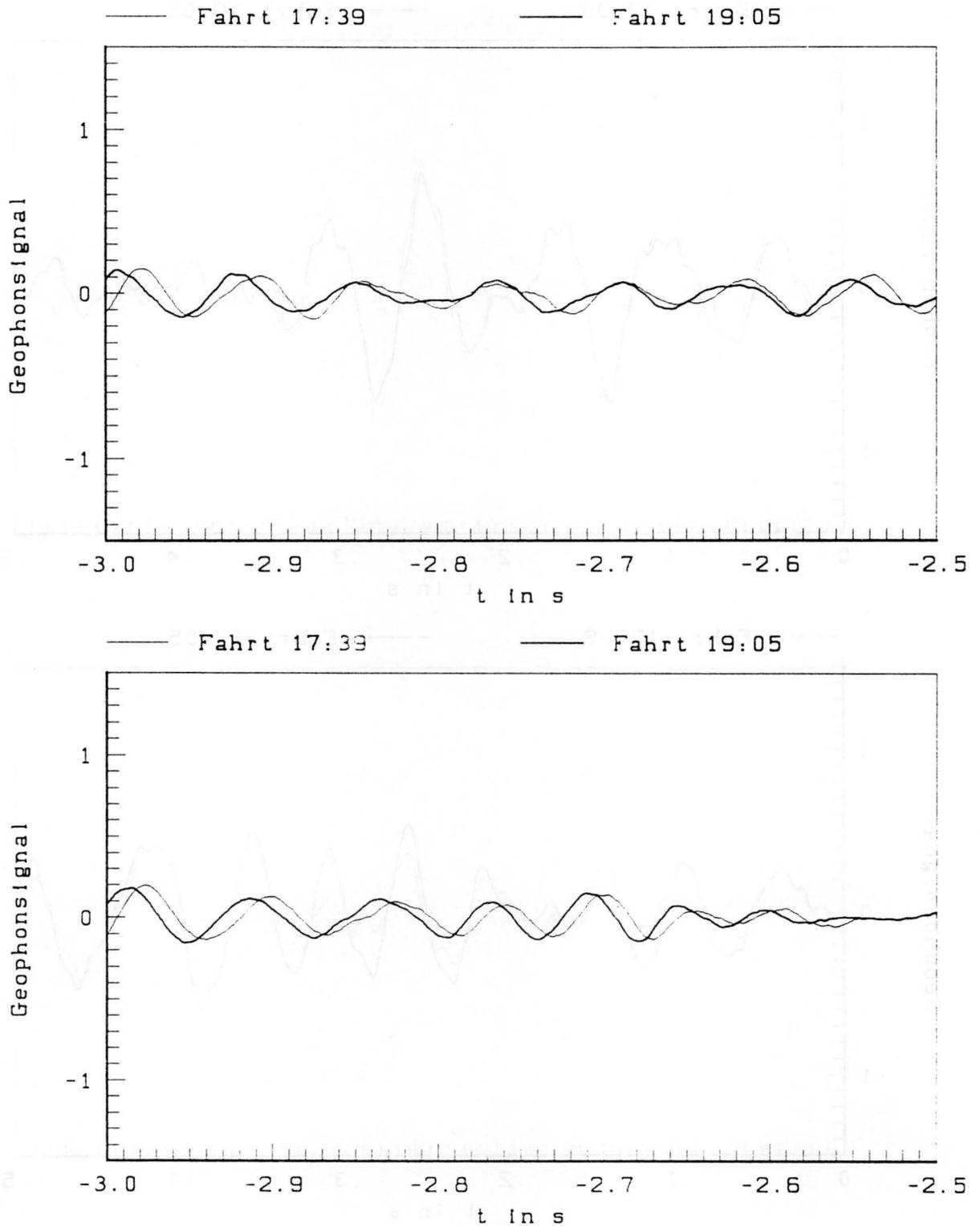


Bild 7 Zeitausschnitt (-3, -2.5)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q₁, Abstand 64 m
unten: Querschnitt Q₂, Abstand 64 m

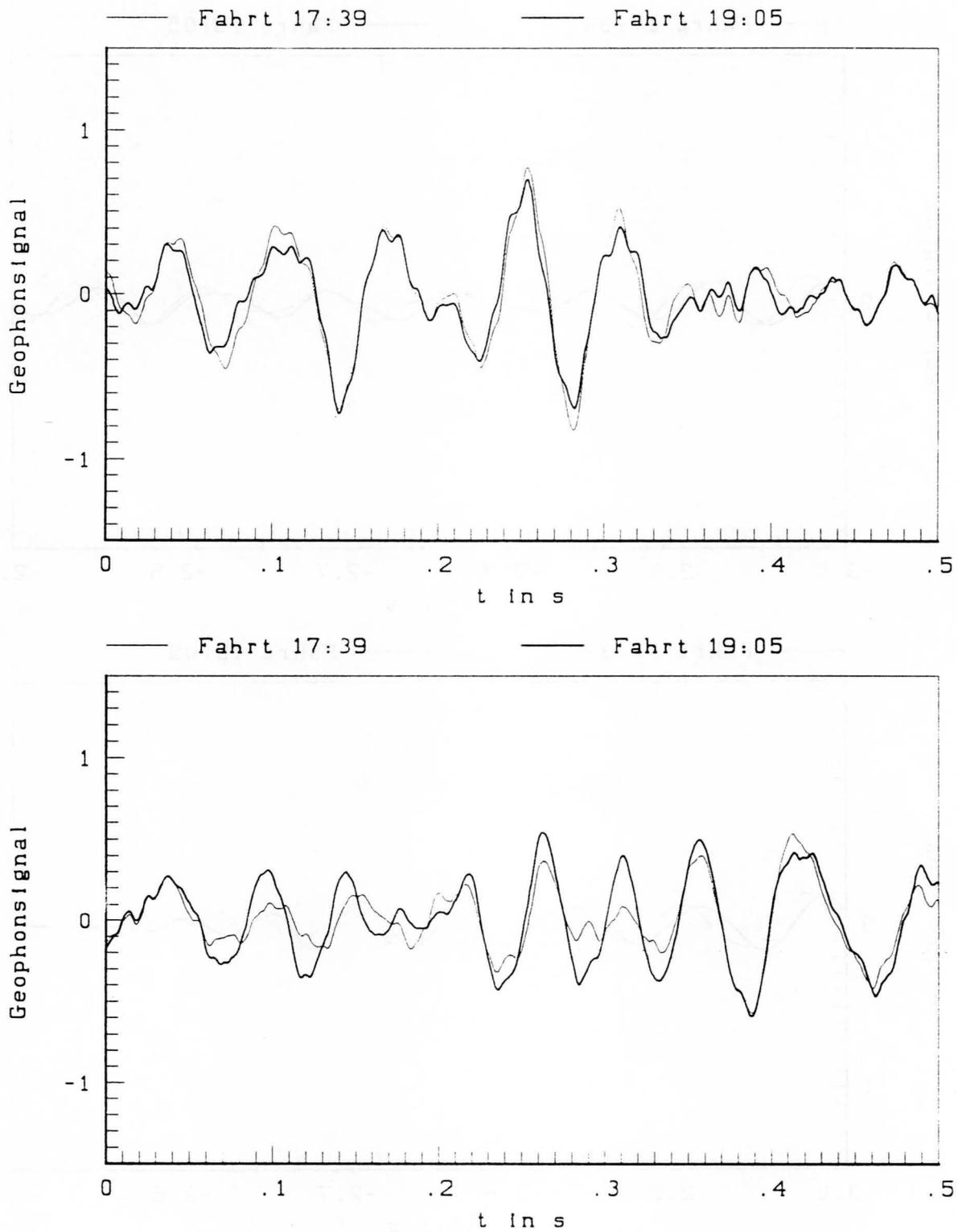


Bild 8 Zeitausschnitt (0, 0.5)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q₁, Abstand 64 m
unten: Querschnitt Q₂, Abstand 64 m

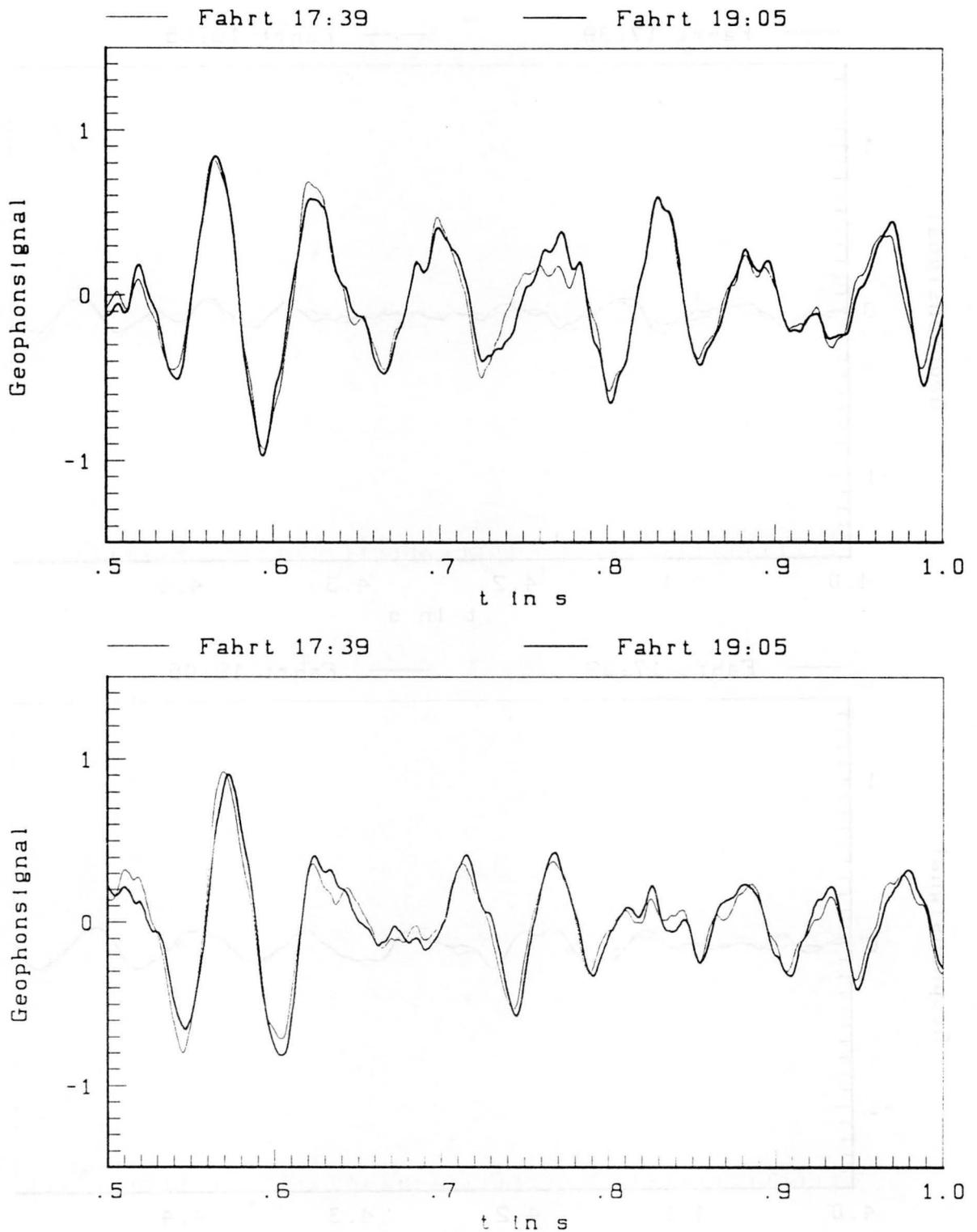


Bild 9 Zeitausschnitt (0,5, 1)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q_1 , Abstand 64 m
unten: Querschnitt Q_2 , Abstand 64 m

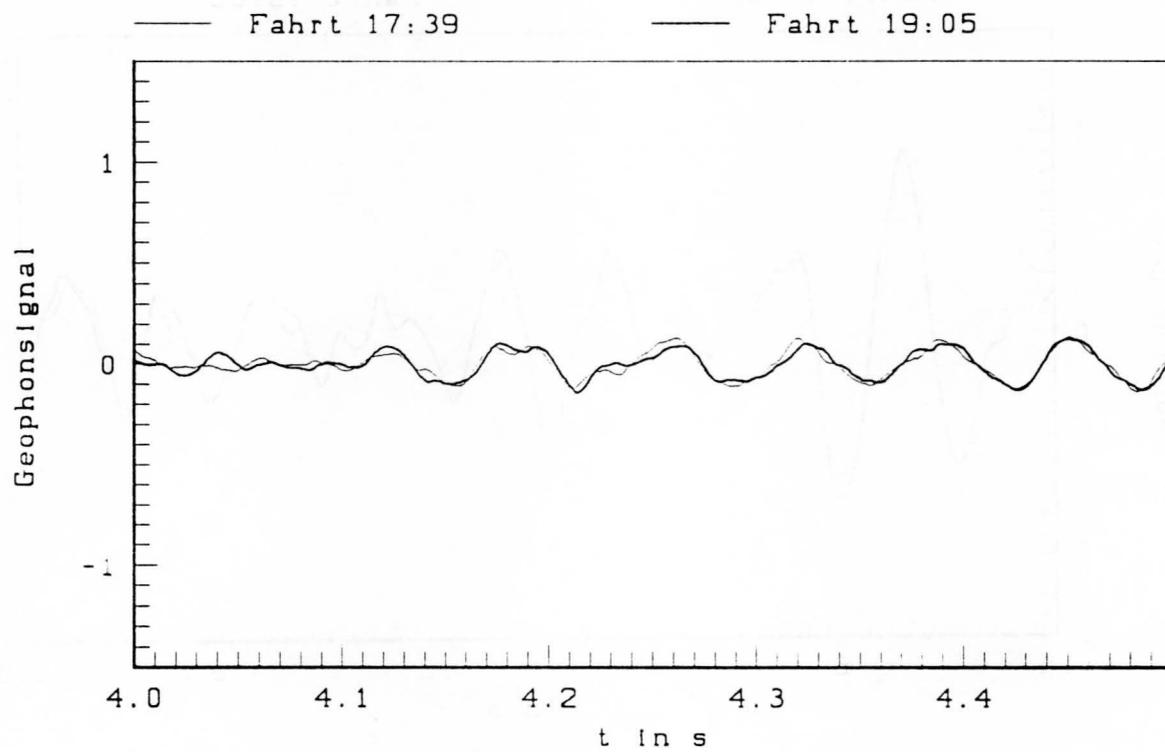
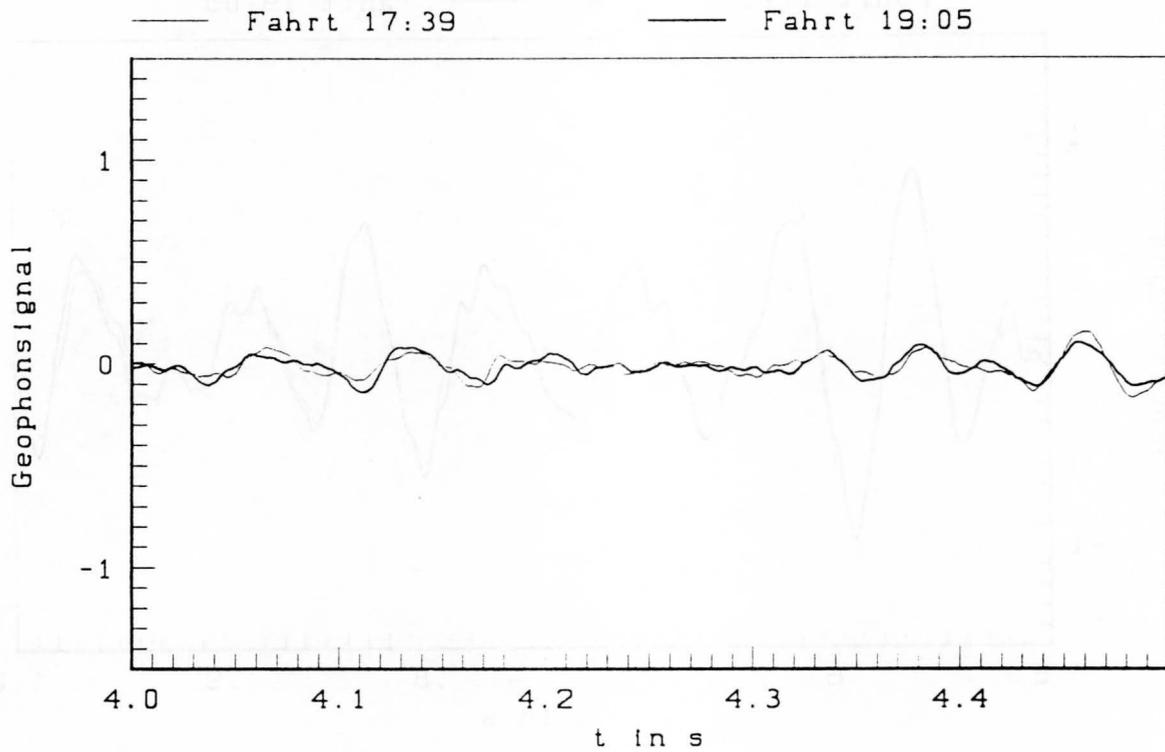


Bild 10 Zeitausschnitt (4, 4.5)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q_1 , Abstand 64 m
unten: Querschnitt Q_2 , Abstand 64 m

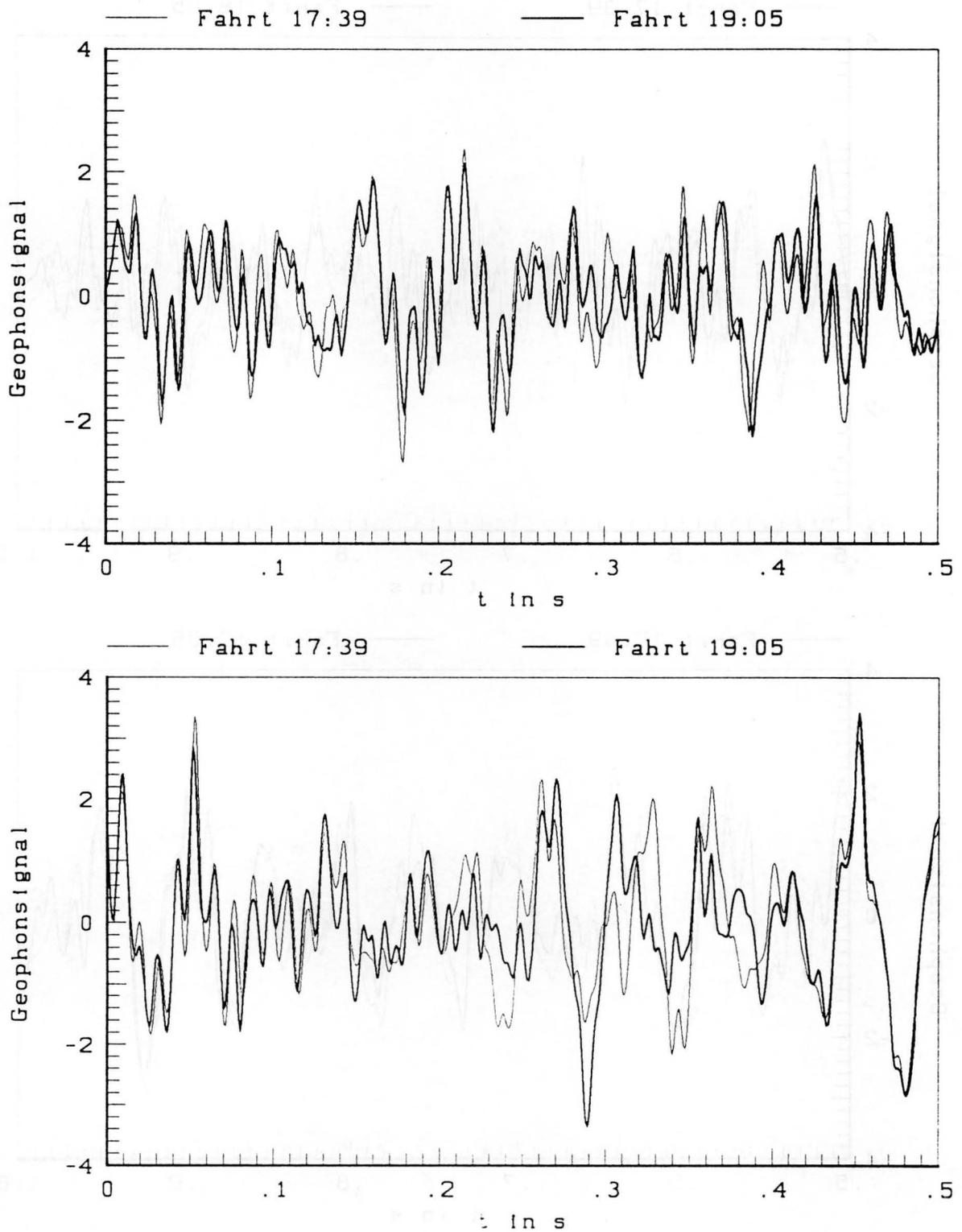


Bild 11 Zeitausschnitt (0, 0.5)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q₁, Abstand 16 m
unten: Querschnitt Q₂, Abstand 16 m

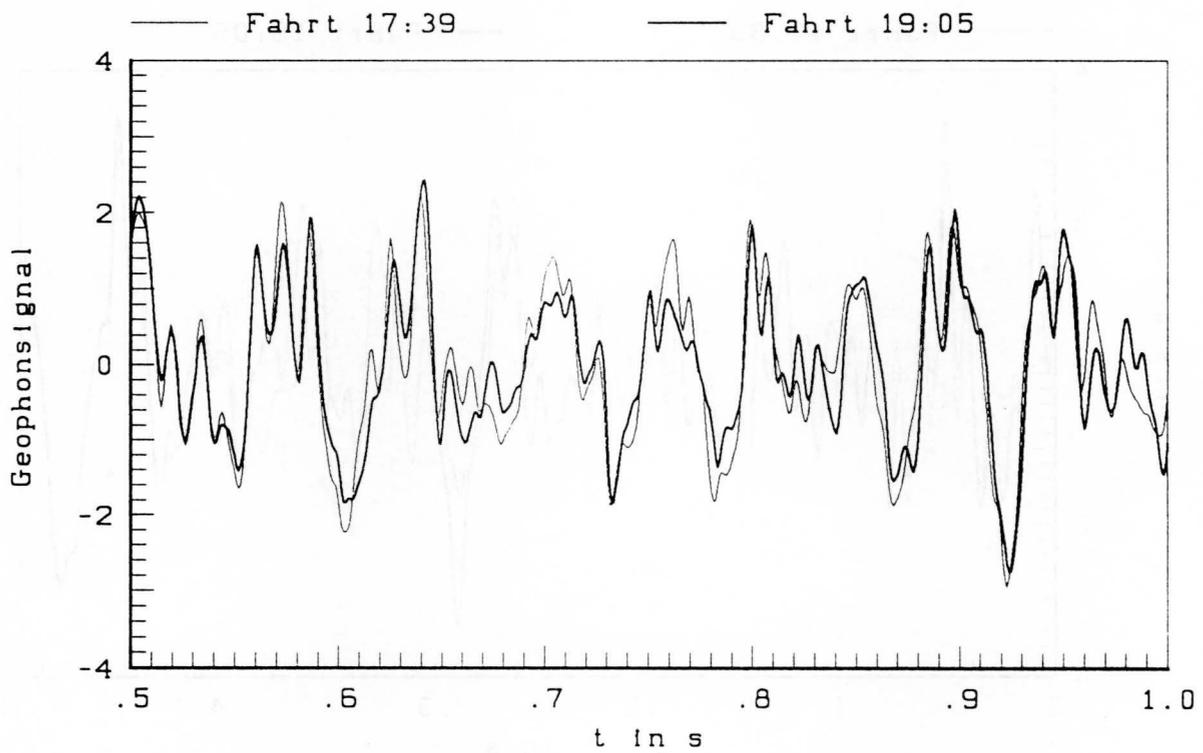
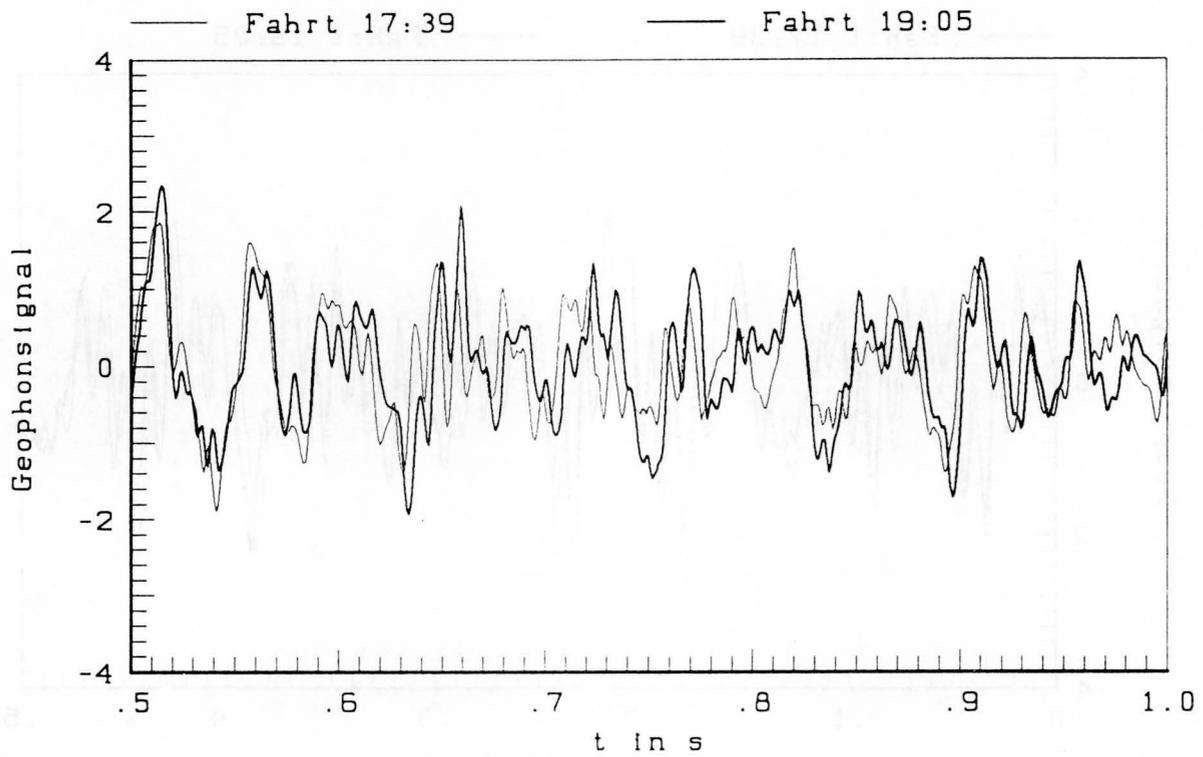


Bild 12 Zeitausschnitt (0.5, 1)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q₁, Abstand 16 m
unten: Querschnitt Q₂, Abstand 16 m

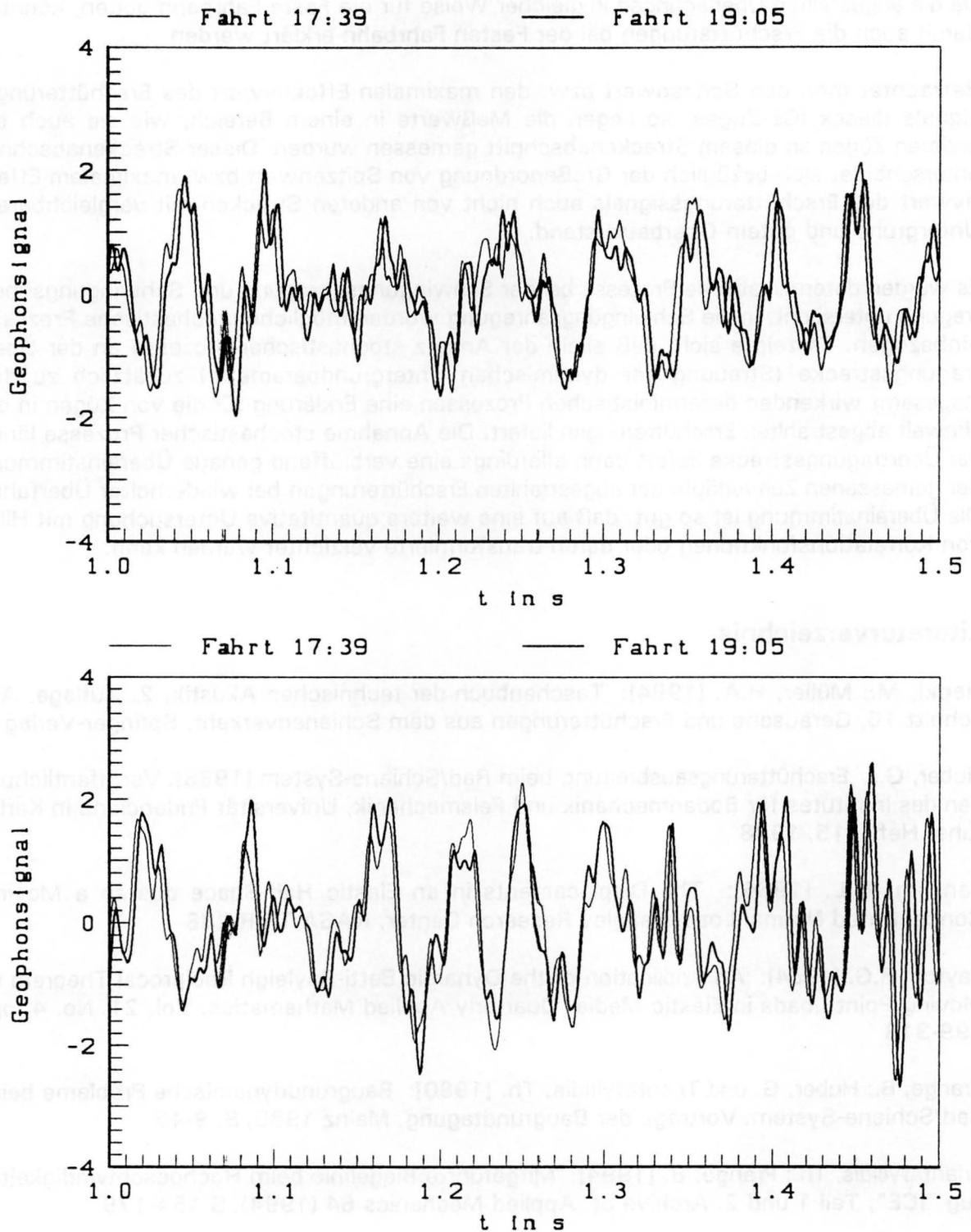


Bild 13 Zeitausschnitt (1, 1.5)s bei zwei Vorbeifahrten,
oben: Querschnitt Q₁, Abstand 16 m
unten: Querschnitt Q₂, Abstand 16 m

Allein die Hypothese 3 - die stochastische Streuung der Untergrundparameter - kann die dargestellten Meßergebnisse befriedigend erklären.

Da die angestellten Überlegungen in gleicher Weise für die Feste Fahrbahn gelten, könnten damit auch die Erschütterungen bei der Festen Fahrbahn erklärt werden.

Betrachtet man den Spitzenwert bzw. den maximalen Effektivwert des Erschütterungssignals dieses ICE-Zuges, so liegen die Meßwerte in einem Bereich, wie sie auch bei anderen Zügen an diesem Streckenabschnitt gemessen wurden. Dieser Streckenabschnitt unterscheidet sich bezüglich der Größenordnung von Spitzenwert bzw. maximalem Effektivwert des Erschütterungssignals auch nicht von anderen Strecken mit vergleichbarem Untergrund und gutem Oberbauzustand.

Es wurden deterministische Prozesse bei der Schwingungsanregung und Schwingungsübertragung untersucht. In die Schwingungsanregung wurden mögliche stochastische Prozesse einbezogen. Es zeigte sich, daß allein der Ansatz stochastischer Prozesse an der Übertragungsstrecke (Streuung der dynamischen Untergrundparameter) zusätzlich zu den insgesamt wirkenden deterministischen Prozessen eine Erklärung für die von Zügen in die Umwelt abgestrahlten Erschütterungen liefert. Die Annahme stochastischer Prozesse längs der Übertragungsstrecke liefert dann allerdings eine verblüffend genaue Übereinstimmung der gemessenen Zeitverläufe der abgestrahlten Erschütterungen bei wiederholter Überfahrt. Die Übereinstimmung ist so gut, daß auf eine weitere quantitative Untersuchung mit Hilfe von Korrelationsfunktionen oder deren transformierte verzichtet werden kann.

Literaturverzeichnis

Heckl, M.; Müller, H.A. [1994]: Taschenbuch der technischen Akustik, 2. Auflage, Abschnitt 16, Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr, Springer-Verlag

Huber, G.: Erschütterungsausbreitung beim Rad/Schiene-System [1988]. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 115, 1988

Lansing, D.L. [1966]: The Displacements in an Elastic Half-Space due to a Moving Concentrated Normal Load. Langley Research Center, NASA TR R-238

Payton, R.G. [1964]: An Application of the Dynamic Betti-Rayleigh Reciprocal Theorem to Moving Point Loads in Elastic Media. Quarterly Applied Mathematics, Vol. 21, No. 4, pp. 299-313

Prange, B.; Huber, G. und Triantafyllidis, Th. [1980]: Baugrunddynamische Probleme beim Rad/Schiene-System. Vorträge der Baugrundtagung, Mainz 1980, S. 9-45

Triantafyllidis, Th.; Prange, B. [1994]: Mitgeführte Biegelinie beim Hochgeschwindigkeitszug "ICE", Teil 1 und 2. Archive of Applied Mechanics 64 (1994), S.154-179