

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Achilles, Stephan; Hebener, Hans L.

Untersuchungen der Erschütterungsemission für den Ausbau von Straßenbahnstrecken mit angrenzender historischer Bebauung

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102780>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Achilles, Stephan; Hebener, Hans L. (1995): Untersuchungen der Erschütterungsemission für den Ausbau von Straßenbahnstrecken mit angrenzender historischer Bebauung. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 72. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 93-105.

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.



Untersuchungen der Erschütterungsemission für den Ausbau von Straßenbahnstrecken mit angrenzender historischer Bebauung

Dipl.-Geophys. S. Achilles

Dipl.-Ing. H.-L. Hebener

GuD Geotechnik und Dynamik Consult, Berlin

1 Einleitung

Beim Um- und Ausbau von Straßenbahnstrecken ergibt sich u.a. auch die Frage nach Veränderungen der Erschütterungsemission und den damit verbundenen Auswirkungen auf nahegelegene Bauwerke.

Im Vordergrund stehen dabei weniger die Gefährdung der Gebäude durch direkte Schwingungseinwirkung - die entsprechenden Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3 werden i.d.R. nicht annähernd erreicht - als vielmehr das Risiko dynamisch bedingter Setzungsschäden und der Beeinträchtigung von Personen innerhalb der Gebäude.

Insbesondere Setzungs- und Kornumlagerungsprozesse im Baugrund mit nachfolgenden Gründungsetzungen und Rißbildungen bis in die obersten Stockwerke können eine ernst zu nehmende Gefährdung der Bauwerke darstellen, für die allein im Berliner Raum eine Reihe von Schadensbeispielen zu nennen sind.

Bei welchen Schwingungsgrößen derartige Setzungserscheinungen beginnen ist schwer abschätzbar, da eine Vielzahl von Einflußfaktoren und Parametern mitbestimmend sind. Es hat sich jedoch gezeigt, daß im besonderen Maße statisch hoch ausgelastete Gründungen auf Fein- und Mittelsanden in lockerer bis mitteldichter Lagerung schon bei Schwinggeschwindigkeiten weit unterhalb der Anhaltswerte der DIN 4150 Teil 3 zu Setzungen neigen. Hohe Grundwasserstände vergrößern dabei das Gefährdungspotential. Derartige Gründungssituationen finden sich besonders häufig an älteren Gebäuden.

Am folgenden Beispiel soll eine Möglichkeit zur Behandlung dieser Problematik gezeigt werden.

2 Ausgangssituation

Für eine Straße im Stadtzentrum von Cottbus ist der zweigleisige Ausbau einer bisher eingleisig etwa in Straßenmitte verlaufenden Straßenbahnstrecke (überpflastertes Querschwellengleis) geplant (Bild 1). Daraus ergibt sich eine Annäherung der Gleisachsen an die vorhandene Bebauung von bisher 5,5 m bis 7,5 m auf 3,8 m bis 5,8 m. Der betroffene Straßenabschnitt ist nur 9,75 m bis 14,3 m breit.

Die Gebäude, drei- bis viergeschossige Mauerwerksbauten aus dem vergangenen Jahrhundert, stehen z.T. unter Denkmalschutz.

Zur Baugrunderkundung wurden mehrere Rammkern- und schwere Rammsondierungen (DPH) bis in 6 m Tiefe durchgeführt. Ein typisches Sondierergebnis zeigt Bild 2. Der vorgefundene Baugrund unmittelbar unter den Gebäudefundamenten besteht zwischen 1,8 m und 3,1 m bis 3,5 m Tiefe unter GOK überwiegend aus Fein- bis Mittelsanden in lockerer bis mitteldichter Lagerung.

GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH

PROJEKT Straßenbahnausbau Fr.-Ebert-Str. in Cottbus

Straßenbahnstrecke durch die Friedrich-Ebert-Straße in Cottbus



Bild 1 Straßenbahnstrecke durch die Friedrich-Ebert-Straße in Cottbus

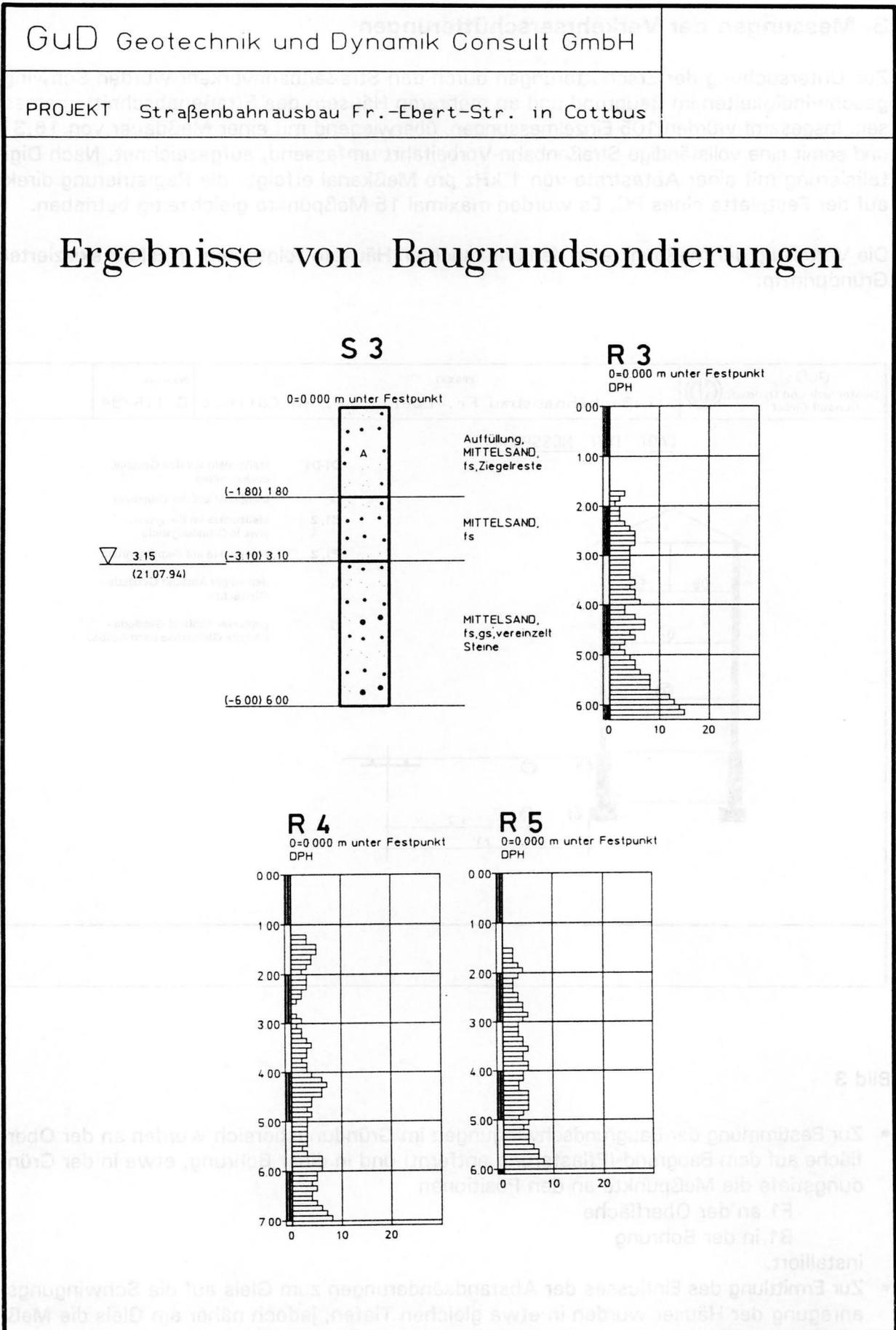


Bild 2 Ergebnisse von Baugrundsondierungen

3 Messungen der Verkehrserschütterungen

Zur Untersuchung der Erschütterungen durch den Straßenbahnverkehr wurden Schwinggeschwindigkeiten im Baugrund und an mehreren Häusern des Straßenabschnitts gemessen. Insgesamt wurden 105 Einzelmessungen, überwiegend mit einer Meßdauer von 16,3 s und somit eine vollständige Straßenbahn-Vorbeifahrt umfassend, aufgezeichnet. Nach Digitalisierung mit einer Abtastrate von 1 kHz pro Meßkanal erfolgte die Registrierung direkt auf der Festplatte eines PC. Es wurden maximal 15 Meßpunkte gleichzeitig betrieben.

Die Verteilung der Meßpunkte an den untersuchten Häusern folgte dem in Bild 3 skizzierten Grundprinzip:

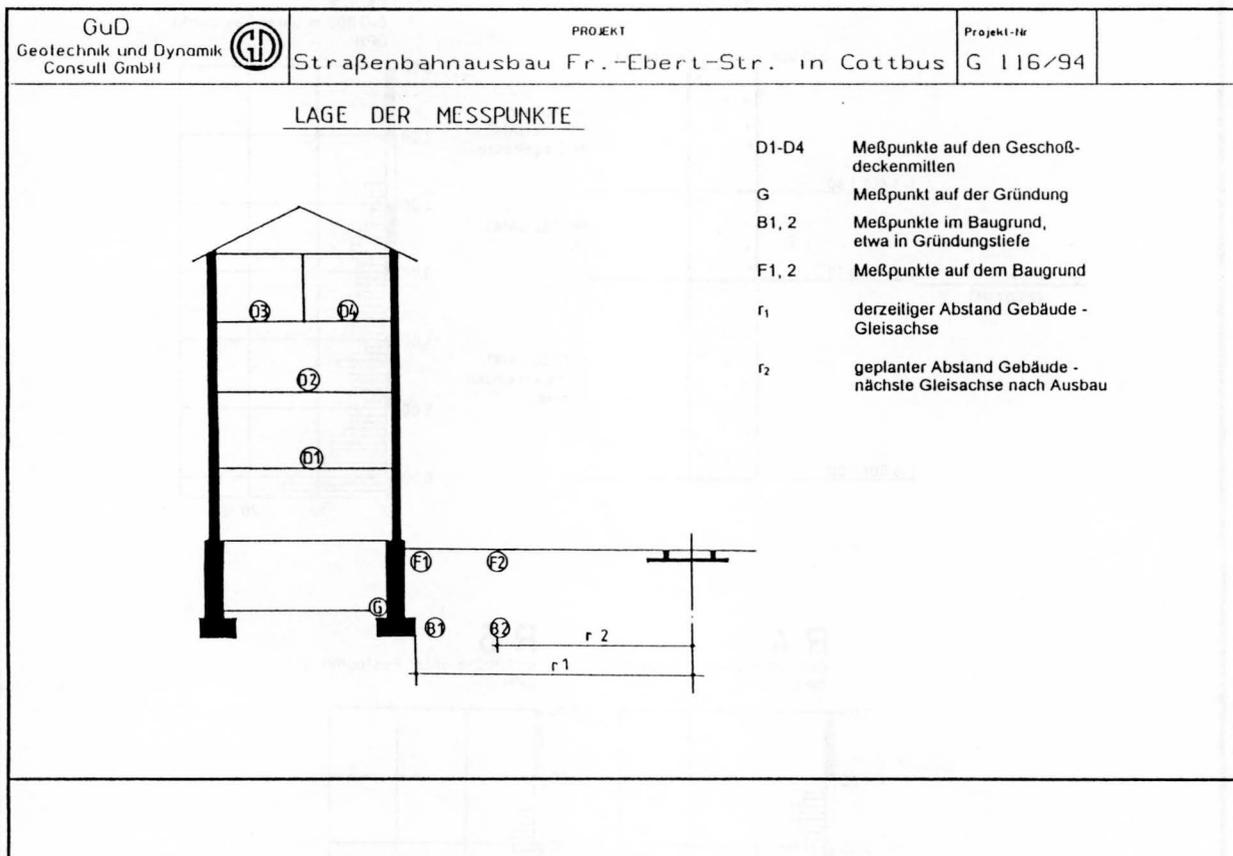


Bild 3

- Zur Bestimmung der Baugrundschrwingungen im Gründungsbereich wurden an der Oberfläche auf dem Baugrund (Pflasterung entfernt) und in einer Bohrung, etwa in der Gründungstiefe die Meßpunkte an den Positionen
 F1 an der Oberfläche
 B1 in der Bohrung
 installiert.
- Zur Ermittlung des Einflusses der Abstandsänderungen zum Gleis auf die Schwingungsanregung der Häuser wurden in etwa gleichen Tiefen, jedoch näher am Gleis die Meßpunkte an den Positionen

- F2 an der Oberfläche
B2 in der Bohrung
eingrichtet.
- Zur Messung der Gebäudeerschütterungen im Gründungsbereich befand sich der Meßpunkt auf der Position G auf den Grundmauern des Hauses.
 - Drei bis sechs Meßpunkte an den Positionen D1 6 waren zur Erfassung von Deckenschwingungen auf Fußbödenmitten in verschiedenen Obergeschossen eingerichtet.

Darüber hinaus befanden sich weitere Meßpunkte am Fassadenmauerwerk in der Deckenebene des obersten Vollgeschosses.

4 Meßergebnisse und Auswertung

Bild 4 zeigt typische Schwinggeschwindigkeitsregistrierungen und daraus errechnete lineare Amplituden-Frequenz-Spektren für Baugrund- und Gebäudemesspunkte.

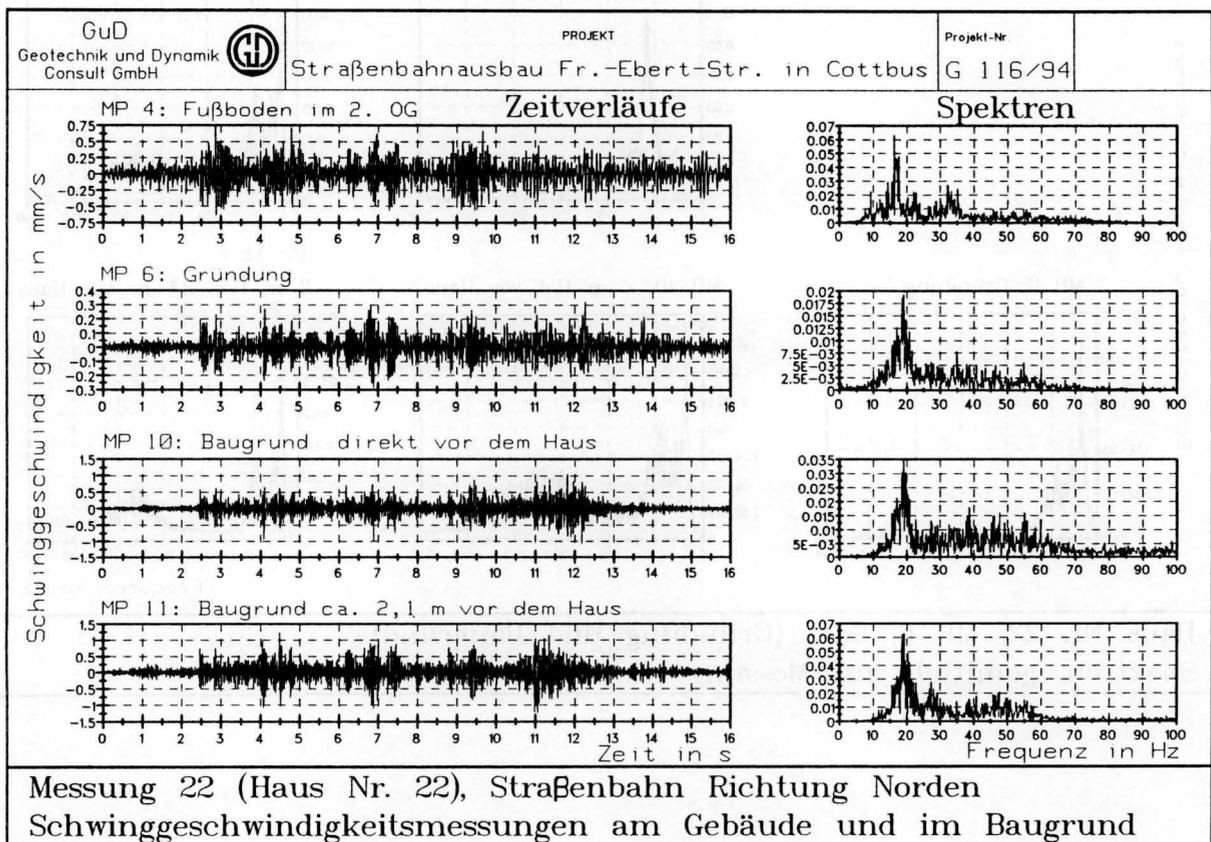


Bild 4

Durch arithmetische Mittelung konnten für jeden Meßpunkt repräsentative Spektren berechnet werden. Die große Anzahl der Messungen gewährleistete eine relativ hohe statistische Sicherheit der Mittelungsergebnisse.

Bild 5 enthält Darstellungen der mittleren Spektren für die im Bild 3 gezeigten Systemmeßpunkte an einem der untersuchten Gebäude. Die relativ breitbandige Schwingungsemission der Straßenbahnen geht aus den Spektren der Baugrundmeßpunkte deutlich hervor. Beim Übergang auf die Gebäudegründung erfolgte eine Reduzierung des Spektrums auf niederfrequenterer Schwingungsanteile. Die spektralen Veränderungen an der Bodenoberfläche (vgl. Meßpunkt 9 und Meßpunkt 8) sind vermutlich auf die Wirkung schwerer Gehwegplatten in der Nähe des Meßpunktes 8 zurückzuführen und verdeutlichen die Notwendigkeit der Platzierung von Meßpunkten in Baugrundbohrungen.

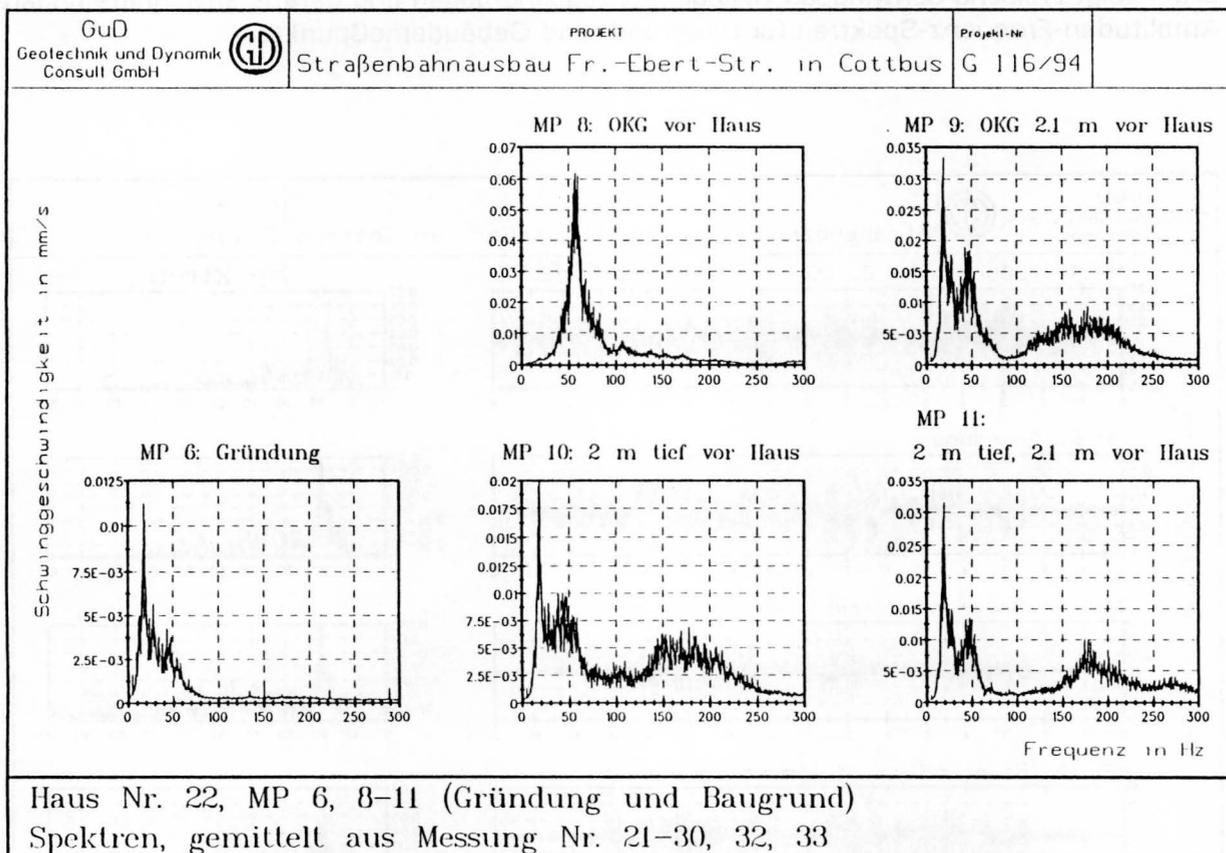


Bild 5

Die Meßergebnisse lieferten das notwendige Datenmaterial zur Abschätzung der Erschütterungssituation nach Gleisumbau und stellen darüber hinaus eine umfassende Dokumentation im Sinne einer Beweissicherung der Erschütterungssituation vor Gleisumbau dar.

5 Abschätzung der Erschütterungen nach Gleisumbau und Schlußfolgerungen

Mit den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten in der Größenordnung von maximal etwa 1 mm/s an den Gründungen und ca. 3 mm/s im Baugrund waren schon vor Gleisumbau Werte festgestellt worden, die in Hinsicht auf dynamisch bedingte Setzungen als bedenklich gelten können. Diesbezügliche Schäden waren an der vorhandenen Bebauung jedoch nicht feststellbar.

Die auf den Geschoßdecken ermittelten KB-Werte lagen i.d.R. über den Anhaltswerten der DIN 4150, Teil 2, in der die Beeinträchtigungen von Personen durch Schwingungen in Gebäuden behandelt wird. Obwohl diese Norm laut Absatz 5.5.3 der DIN 4150 nicht für Erschütterungen durch oberirdisch geführten Straßenbahnverkehr gilt, wird sie in Ermangelung anderer Richtlinien häufig zum Vergleich und zur Einschätzung herangezogen.

Aufgrund dieser Ausgangssituation erschien es notwendig, durch erschütterungsdämmende Ausführung der neuen Gleise, die infolge der Abstandsverringerungen zu erwartende stärkere Schwingungsübertragung zumindest soweit zu kompensieren, daß die Gebäudeerschütterungen das derzeitige Maß auch nach Gleisumbau nicht überschreiten.

Um ein Maß für die erforderliche Dämmung zu erhalten, wurde zuerst berechnet, welche Veränderungen sich für die Gebäudeschwingungen ergäben, wenn das jetzige Gleis an die Gebäude um einen Abstand herangerückt würde, der dem zweigleisigen Streckenausbau entspräche.

Dabei wurden die für stochastische Prozesse anwendbaren Übertragungsbeziehungen linearer Systeme im Frequenzbereich verwendet:

$$H_{G/B1}(f) = Y_G(f) / X_{B1}(f),$$

$$X_{B1}(f) = \text{Erregerspektrum, gemittelt aus den gemessenen Spektren am Baugrundmeßpunkt in der Bohrung direkt vor der Gründung des Gebäudes (B1)}$$

$$Y_G(f) = \text{Antwortspektrum, gemittelt aus den gemessenen Spektren an der Gründung des Gebäudes (G).}$$

Durch Anwendung des Erregerspektrums, gemittelt aus den gemessenen Spektren in der Baugrundbohrung (B2) im verminderten Gleisabstand $X_{B2}(f)$ auf die Übertragungsfunktion $H_{G/B1}(f)$ ergibt sich das zu erwartende mittlere Spektrum der Gebäudeschwingungen im Gründungsbereich $Y_{GE}(f)$ des jeweiligen Gebäudes

$$Y_{GE}(f) = X_{B2}(f) \cdot H_{G/B1}(f) .$$

Auf ähnliche Weise können aus den Übertragungsfunktionen von den Gründungen auf die Geschoßdecken die Spektren der zu erwartenden Geschoßdeckenschwingungen aus den zu erwartenden Spektren der Gründung berechnet werden.

Diese Verfahrensweise setzt eine ausreichende Anzahl von Messungen für die Mittelung der Spektren zum Erreichen einer genügenden statistischen Sicherheit voraus. Diese ist i.d.R. dann gegeben, wenn das Ergebnis der Mittelung sich nach Einbeziehen weiterer Meßergebnisse in den Mittelungsprozeß nicht mehr wesentlich ändert.

Bild 6 zeigt exemplarisch für eines der untersuchten Häuser auf der linken Bildseite die berechnete Funktion der Übertragung vom Baugrund auf die Gründung $H_{G/B1}(f)$. Auf der rechten Bildseite sind das mittlere Spektrum der derzeitigen Verkehrserschütterungen im Gründungsbereich $Y_G(f)$ (Bild oben) und das nach Abstandsverringern bei gleicher Gleisbeschaffenheit zu erwartende Spektrum $Y_{GE}(f)$ (Bild unten) dargestellt. Die Übertragungsfunktion weist auf die bevorzugte Immission von Schwingungsfrequenzen unter 20 Hz hin. Die Ursache dieses Schwingungsverhaltens wird durch die Biegeeigenfrequenzen der Geschosdecke (überwiegend Holzbalkendecke) erklärt. Wie aus Bild 7 ersichtlich waren die Deckenresonanzen i.d.R. stark ausgeprägt und lagen überwiegend unterhalb von 20 Hz.

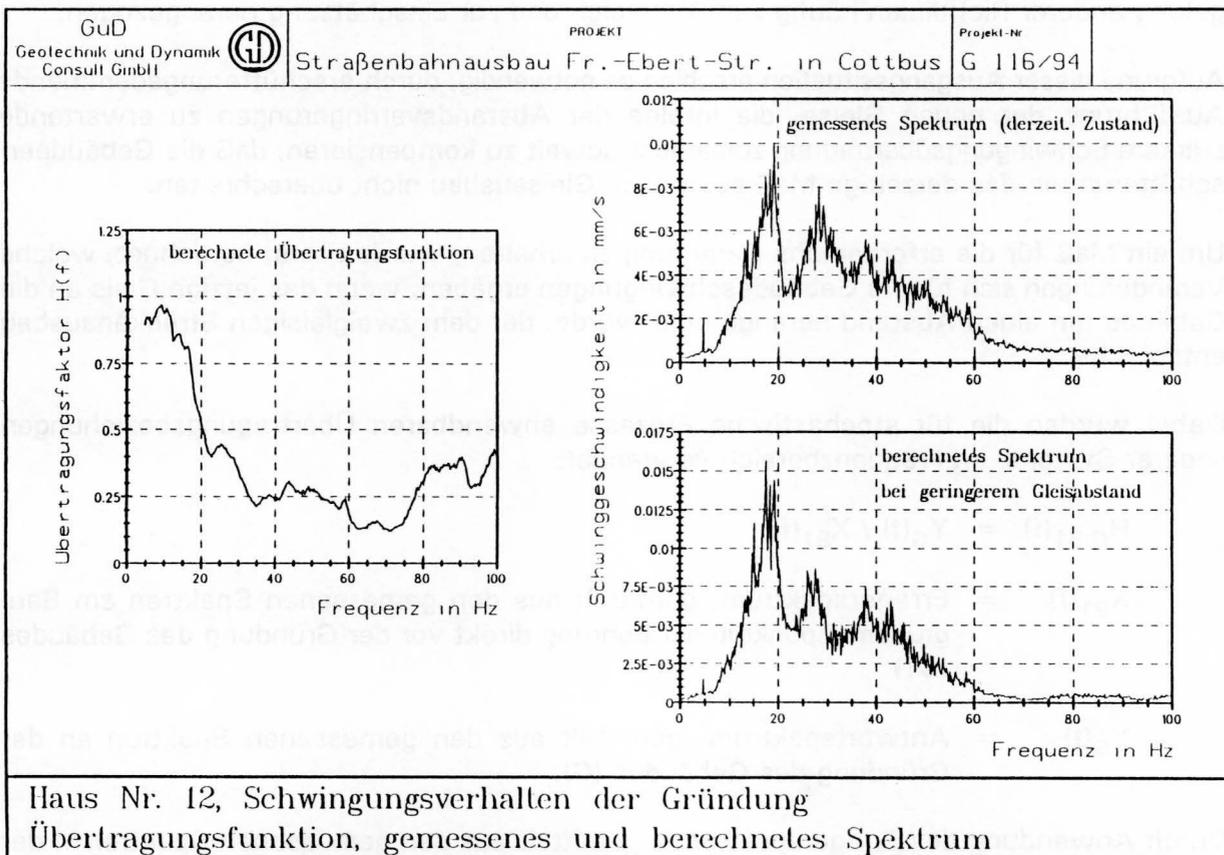


Bild 6

Im nächsten Schritt wurde aus den Differenzen der gemessenen und der prognostizierten Spektren der Gebäudeschwingungen ein mindestens erforderliches Einfügedämmmaß bestimmt, das im Mittel eine Vergrößerung der derzeitigen dynamischen Belastungen der Gebäude ausschließt. Dieses Einfügedämmmaß ist einerseits eine frequenzabhängige Größe, die von Herstellern erschütterungsdämmender Gleissysteme üblicherweise zur Beschreibung der dämmenden Wirkung ihrer Produkte angegeben wird. Andererseits ist durch Vorgabe eines Mindest-Einfügedämmmaßes ein objektives Kriterium für die Auswahl eines neuen Gleissystems hinsichtlich erschütterungsmindernder Wirkung gegeben.

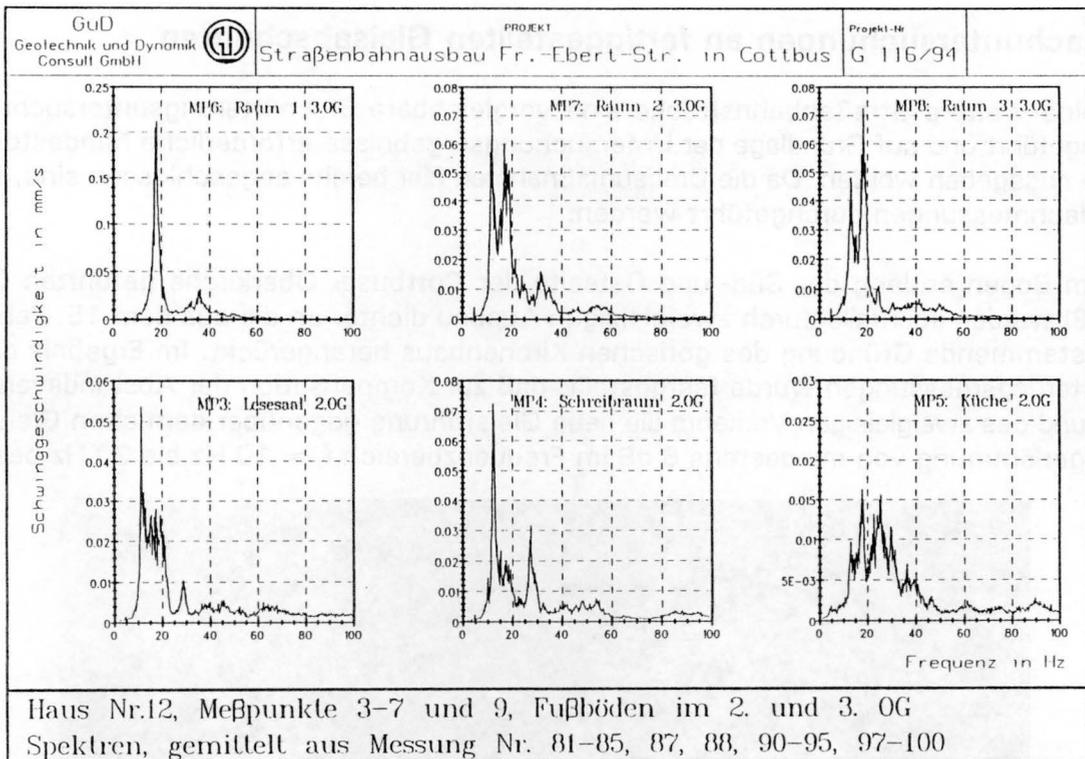


Bild 7

Bild 8 zeigt die errechneten Einfügedämmmaße für drei untersuchte Gebäude. Die Darstellung erfolgt i.d.R. als Terzpegel-Differenz-Spektren in dB_v (d.h., bezogen auf einen Effektivwert der Schwingungsgeschwindigkeit von 5×10^{-5} mm/s). Die umhüllende Linie gibt das letztendlich empfohlene Mindestdämmmaß an, welches auch zusätzliche Schwingungsverstärkungen bei Begegnungen von Bahnen auf der späteren zweigleisigen Strecke berücksichtigt.

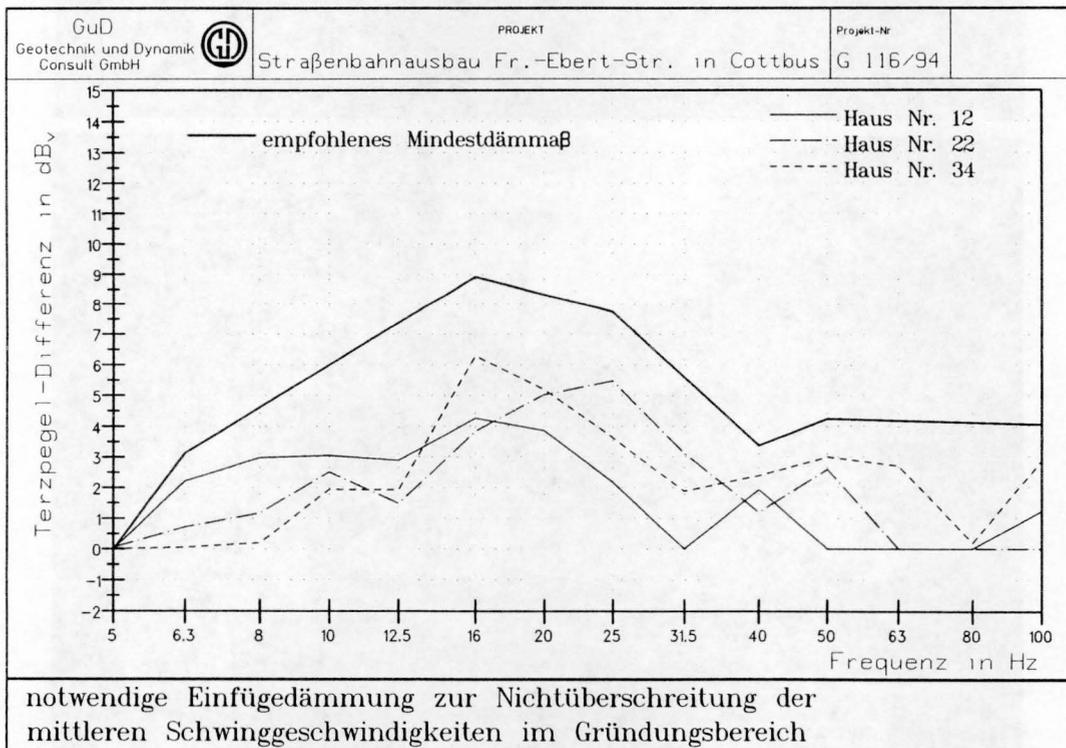


Bild 8

6 Nachuntersuchungen an fertiggestellten Gleisabschnitten

Für eine weitere Straßenbahnstrecke sind vergleichbare Erschütterungsuntersuchungen durchgeführt und auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse erforderliche Mindestdämmmaße angegeben worden. Da die Umbaumaßnahmen hier bereits abgeschlossen sind, konnten Nachmessungen durchgeführt werden.

Die im Bogen entlang der Süd- und Ostseite der Cottbuser Oberkirche geführten Gleise (Bild 9) wurden ebenfalls durch zweigleisigen Ausbau dichter an die aus dem 15. Jahrhundert stammende Gründung des gotischen Kirchenbaus herangerückt. Im Ergebnis der Erschütterungsmessungen wurde festgestellt, daß zur Kompensation der Abstandsverringering und des zweigleisigen Verkehrs die neue Gleisführung gegenüber dem alten Gleis eine Einfügedämmung von mindestens 6 dB im Frequenzbereich $f = 10 \text{ Hz}$ bis 30 Hz besitzen sollte.



Bild 9 Straßenbahnstrecke an der Oberkirche zu Cottbus

Um diese Dämmung zu erreichen, wurde eine elastische Rillenschienenleinbettung vorgeschlagen. Mit diesen durchgehend in Sylomerprofilen geführten Schienen konnten im Vergleich zu punktuell gelagerten Oberbauarten in Wien, Graz und Augsburg Dämmeffekte zwischen 7 und 10 dB im genannten Frequenzband erreicht und meßtechnisch nachgewiesen werden. Darüber hinaus erfolgte über elastische Matten eine Lagerung des Oberbaus auf längs zum Gleis verlaufende schwere Betonplatten.

Die Ergebnisse der Nachuntersuchungen an der Oberkirche bestätigen, daß trotz Abstandsverringerungen von 10 m bis 13,6 m auf 8,1 m bis 12 m die Schwinggeschwindigkeiten am Bauwerk zumindest konstant blieben. An der Mehrzahl der Meßpunkte war darüber hinaus eine deutliche Verringerung der Schwinggeschwindigkeiten zu verzeichnen.

Da die Lage der Meßpunkte an der Oberkirche bei den Messungen vor und nach Gleis-ausbau identisch war, kann eine direkte Gegenüberstellung der ermittelten Schwingungsgrößen erfolgen.

Die Bilder 10 und 11 ermöglichen anhand von Balkendiagrammen für jeden Gebäudemesspunkt den Vergleich der mittleren Maximalwerte (Mittel aus den Maximalwerten, die für jede einzelne Straßenbahnfahrt festgestellt wurden) und der maximalen Effektivwerte (größte festgestellte Effektivwerte der Schwinggeschwindigkeit).

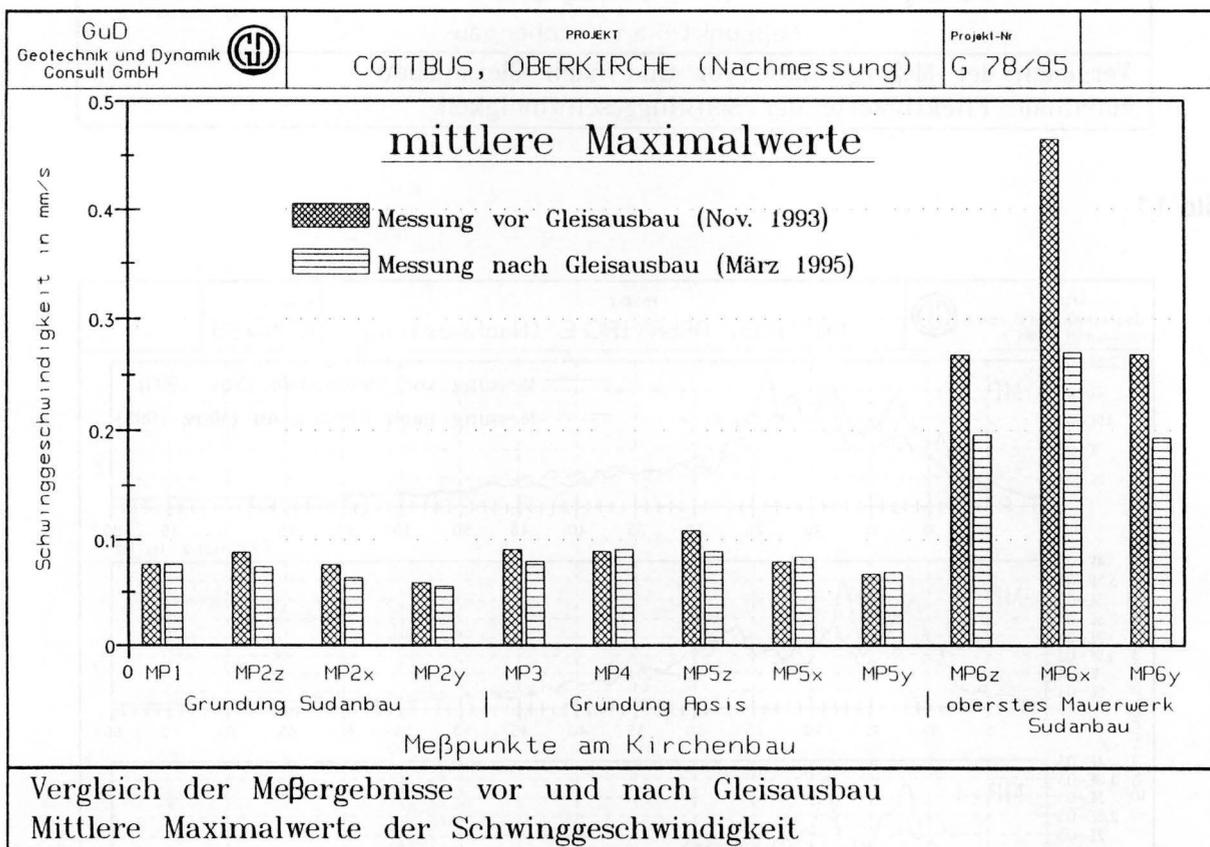


Bild 10

Eine Beurteilung der spektralen Unterschiede der Schwingungen im Gründungsbereich ermöglichen die Graphiken auf Bild 12. Dargestellt sind die mittleren Amplituden-Frequenzspektren für drei Gründungsmeßpunkte vor und nach Gleisausbau. Es zeigt sich, daß mit

der neuen Gleiskonstruktion, insbesondere in dem für das Bauwerk bedeutsamen Frequenzbereich zwischen 8 Hz und 35 Hz i.d.R. eine deutliche Minderung der Schwingungsimmision erreicht werden konnte.

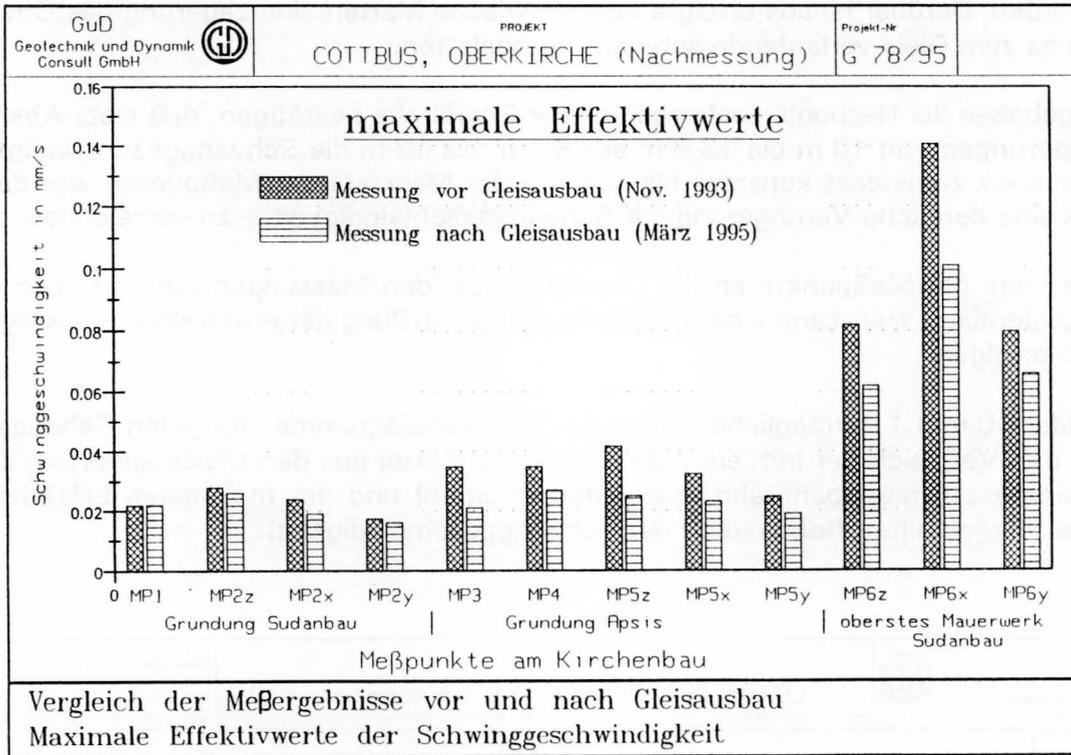


Bild 11

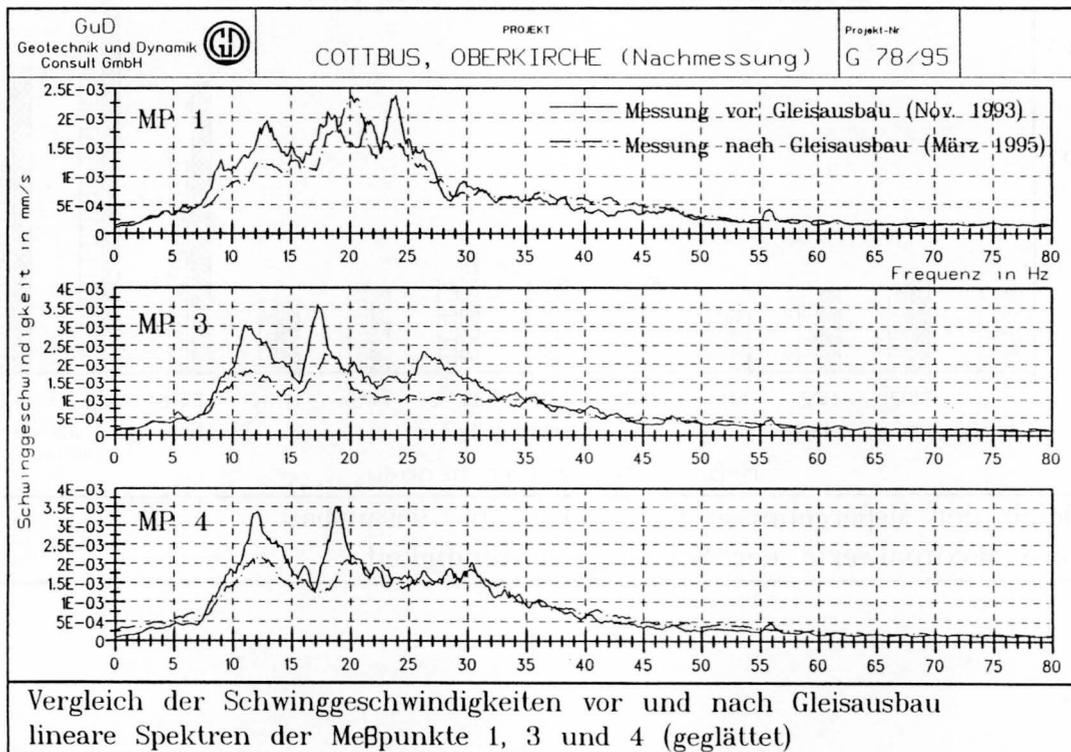


Bild 12

7 Schlußbemerkung

Mit dem vorgestellten Beispiel sollte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie Veränderungen der dynamischen Beanspruchungen von Gebäuden infolge von Gleisumbauten im voraus abzuschätzen sind. Aus den Untersuchungsergebnissen können Anforderungen an die Schwingungsdämmung der neuen Gleiskonstruktion abgeleitet werden. Werden diese Anforderungen beim Um- bzw. Ausbau der neuen Gleise berücksichtigt, so können Zunahmen der Schwingungsbeanspruchung und damit insbesondere die Gefahr dynamisch bedingter Setzungen benachbarter Gebäudegründungen weitgehend ausgeschlossen werden. Nachuntersuchungen an einem abgeschlossenen Gleisausbau haben die Anwendbarkeit der Verfahrensweise bestätigt.

Literatur

Holzlhöner, U.: Setzungen von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn. BAM-Bericht 48, Oktober 1977

Lehnert, J.: Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, BAM-Bericht 106, Oktober 1984

Tschebatarioff, G.: Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures, Mc Graw-Hill Book Comp. New York, 1953

LIN, Y. K.: Probabilistic Theory of Structural Dynamics, McGraw-Hill New York, 1967

Rücker, W.: Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung, TU Berlin, Fachbereich Physikalische Ingenieurwissenschaften, Dissertation D 83, 1979